TAEE 2024 Málaga

Libro de actas
Livro de atas
Proceedings

XVI Congreso Tecnología Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica 2024

E.T.S.I. Telecomunicación
E.T.S.I. Informática

Málaga (España)
26 - 28 de junio de 2024

XVI Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (TAEE 2024). Libro de actas

XVI Conferência em Tecnologia, Aprendizagem e Ensino da Eletrónica (TAEE 2024). Livro de atas.

XVI International Conference of Technology, Learning and Teaching of Electronics (TAEE 2024). Proceedings book.

© Organizadores TAEE 2024

Portada:	Francisco Gabriel Báez Moya
ISBN:	978-84-09-63040-0
Coordinación:	Rafael de Jesús Navas González, Francisco Velasco Álvarez y Francisco Javier González Cañete

ÍNDICE – ÍNDICE – INDEX

ÍNDICE – ÍNDICE – INDEX I

ÍNDICE DE ARTÍCULOS – ÍNDICE DE ARTIGOS – PAPERS INDEX III

BIENVENIDA - BOAS-VINDAS - WELCOME VII

ORGANIZADORES Y PATROCINADORES - ORGANIZADORES E PATROCINADORES - ORGANISERS AND SPONSORS XI

COMITÉS – COMITÊS – COMMITTEES XIII

REVISORES – REVISORES – REVIEWERS XIX

MODERADORES – MODERADORES – CHAIRS XXIII

ÁMBITOS – ÁREAS – AREAS XXV

PONENCIAS – APRESENTAÇÕES – PRESENTATIONS XXIX

PROGRAMA – PROGRAMA – PROGRAM XXXIII

ARTÍCULOS – ARTIGOS – PAPERS 1

AUTORES – AUTORES – AUTHORS 751

A ÍNDICE DE ARTÍCULOS – ÍNDICE DE ARTIGOS – PAPERS INDEX

MIÉRCOLES 26 1

S1A - DEVICE TECHNOLOGY 1
46 - Diseño de un pulsioxímetro en una asignatura de Electrónica Digital 3
118 - Simulation-Based Learning on Electric and Magnetic Devices: A Project-Based Learning Experience 9
S1B – SIGNAL PROCESSING 17
121 - Metodología y Recursos para la Enseñanza Práctica de los Circuitos Mixtos Analógico-Digitales 19
177 - Sistema de medición de flujo de gases para procesos asociados a la economía del Hidrogeno 29
185 - Un acercamiento a la enseñanza de teoría de señales mediante utilitarios de cálculo 35
S1C – OPEN-HARDWARE 41
147 - Ruby: the sensory module in the GEMS ERASMUS+ project 43
51 - Microcredenciales como medio enseñanza del ecosistema RISC-V 51
S2A – SECONDARY EDUCATION AND VOCATIONAL TRAINING EXPERIENCES AND PROJECTS 1 59
20 - DSPACE: diseño y desarrollo de un nuevo entorno de aprendizaje adaptativo mediante inteligencia artificial. 61
153 - Motivando al estudiantado de Electrónica básica mediante el aprendizaje basado en retos 67
154 - Fomento de la perspectiva de género en el diseño de prototipos electrónicos para soluciones biomédicas .. 73
S2B – TEACHING EXPERIENCES AND TRANSVERSAL SKILLS 1 79
49 - Estudio del impacto de la IA ChatGPT en las prácticas de Instrumentación Electrónica 81
100 - Explorando Chat-GPT para su uso en asignaturas de Instrumentación Electrónica y Biomédica 85
95 - Uso de IA para fomentar el estudio de teoría en asignaturas de Instrumentación Electrónica 95
36 - CloudIA: Portfolio de aplicaciones y gadgets de inteligencia artificial para la educación 105
S2C – AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS 111
71 - Control automático de corriente en un regulador 113
133 - Sistema de ensayo y caracterización de baterías de vehículos eléctricos 119
139 - 10 años formando ingenieros/as en el Máster Universitario en Automatización, Electrónica y Control Industrial 125
PÓSTERES 1 – SESIÓN DE PÓSTERES 133
6 - Space probe to search for habitable worlds 135
21 - Laboratorio remoto basado en una plataforma hardware reconfigurable 143
38 - Módulo de radiocomunicaciones digitales para aplicaciones docentes y sensorización remota 149
44 - Programación concurrente y colas en adquisición de datos basada en computador: Casos prácticos 157
45 - Tecnología en la universidad de la experiencia. Acercando la electrónica a los mayores. 163
61 - Material didáctico en abierto sobre simulación de dispositivos fotovoltaicos con Pspice 169
63 - Iniciación a la investigación en nuevas aplicaciones fotovoltaicas: Agrivoltaica 177
70 - Modelado de componentes magnéticos en convertidores con aislamiento 183
DEMOSTRADORES 1 – SESIÓN DE DEMOSTRADORES 189
9 - PCI para visualizar problemas de EMC en circuitos electrónicos digitales 191
16 - Prototipado de una cerradura de combinación digital en un circuito FPGA 199
62 - Metodología basada en Proyectos para el desarrollo de Sistemas IoT 207

DEMOSTRADORES 2 – SESIÓN DE DEMOSTRADORES 213
26 - Libraries and tools for the design of a GUI on a touch screen controlled by ESP32 ..... *215*
25 - Codificación de un Grafcet en un uC ESP32 siguiendo la norma 60848 ..... *223*
140 - Demostrador de WSAN ZigBee basado en plataformas de desarrollo y dispositivos domóticos comerciales *231*
DEMOSTRADORES 3 – SESIÓN DE DEMOSTRADORES 239
78 - Integración de Matlab en plataforma SoC de Xilinx: diseño de un regulador PI *241*
12 - Módulos para prácticas con microcontroladores: PIC16F88 y ATMega328 en Arduino *249*
84 - Use Case: Design, Characterization, Prototyping and Digital Twin of a Stewart platform. *255*
122 - Laboratorio Remoto para Múltiples Plataformas de Desarrollo Basadas en FPGA *263*

JUEVES 27 ..... **269**

S3A – POWER ELECTRONICS 269
13 - Trazador didáctico de curvas I-V de módulos fotovoltaicos basado en un convertidor DC/DC comercial *271*
93 - Un enfoque educativo en ingeniería a través del diseño de un vehículo eléctrico fotovoltaico *279*
127 - Hardware-in-the-loop techniques in teaching Power Electronics for Renewable Energies *285*
128 - Project-Based Learning for Tech and Soft Skills Development in a Renewable Energy course *291*
183 - Implementación de energía eólica en un proceso de acuicultura como estrategia sostenible *299*
S3B – UNIVERSITY - COMPANY COLLABORATION, COMPANY INTERNSHIPS 307
39 - Fidelización del alumno en Diseño y Síntesis de Sistemas Digitales *309*
67 - Aplicación de metodologías activas basadas en casos reales - Colaboración Universidad-Empresa *313*
109 - Experiencias de investigación formativa como factor diferencial en egresados de Ingeniería *321*
161 - Modelo de vinculación con socios formadores y retos para el desarrollo de competencias. *325*
173 - Modelo de experiencias significativa en el desarrollo de competencias *331*
S4A – COMMUNICATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS 339
40 - Acústica Musical: los alumnos frente al reto de realizar un proyecto personal *341*
58 - Uso de Arduino en prácticas de Instrumentación. *347*
146 - Automatización de un Banco de Pruebas para caracterizar convertidores analógico-digitales *353*
S4B – ANALOG ELECTRONICS 359
17 - A B-learning strategy for teaching electric circuits *361*
103 - Análisis deductivo para la comprensión y diseño de lazos de realimentación en amplificadores *369*
90 - Píldoras audiovisuales como metodología docente en electrónica *375*
S5A – SECONDARY EDUCATION AND VOCATIONAL TRAINING EXPERIENCES AND PROJECTS 2 381
171 - Estudiantes de ingeniería enseñando electrónica y programación a niños en un curso curricular *383*
172 - Modelo de Formación para Estudiantes de Secundaria con Vocación STEM *389*
76 - Salinas Fotovoltaica: un proyecto de investigación educativa sobre aprovechamiento solar *395*
S5B – TEACHING EXPERIENCES AND TRANSVERSAL SKILLS 2 403
132 - Experiencia educativa basada en Blockchain *405*
178 - Ilumina: aprendizagem baseada em projetos na educação profissional e tecnológica *411*
S5C – DIGITAL ELECTRONICS 417
11 - Experiencias colaborativas y de gamificación en Diseño Microelectrónico *419*
136 - Evaluación mediante ejercicios cortos en el laboratorio de Arquitectura de Ordenadores *425*
179 - Enseñanza de Electrónica Digital y FPGAs mediante el aprendizaje basado en proyectos y la robótica: un estudio de caso *431*
PÓSTERES 2 – SESIÓN DE PÓSTERES 441
87 - Analog electronics projects to encourage active learning *443*
99 - Elaboración de informes audiovisuales en un laboratorio de electrónica digital *449*
106 - Recursos didácticos para los laboratorios de electrónica analógica *455*
165 - Experiencias docentes para llevar el emprendimiento al aula. Formación entre iguales. *463*
166 - Diseño de espacios para el aprendizaje. Formación en ingeniería con proyectos reales. *469*

DEMOSTRADORES 4 – SESIÓN DE DEMOSTRADORES 477
110 - Aprendizaje de diseño digital basado en proyectos: Uso de leds RGB *479*
116 - Empleo de arquitecturas abiertas (RISC-V) como plataforma demostradora en la docencia de electrónica digital *485*
155 - Madrina: Una herramienta de ayuda a la realimentación tras la corrección de exámenes *493*
120 - Proyecto Escape Digital Room: implementación en asignaturas de electrónica digital *499*
DEMOSTRADORES 5 – SESIÓN DE DEMOSTRADORES 505
72 - Recreación basada en Arduino de sistemas de Telecomunicaciones *507*
157 - Kits de introducción a la robótica a través de competiciones de robots *513*
144 - Modulo educativo para la implementación de un control PI basado en un microcontrolador usando la técnica de control por fase *519*
187 - A low-cost educational kit for ludic and creative electronic workshops in schools *525*
DEMOSTRADORES 6 – SESIÓN DE DEMOSTRADORES 531
180 - Laboratorio remoto de bajo costo basado en Raspberry Pi para la educación en IoT, LoRa y programación en Python *533*
86 - Experimental teaching of digital PID controllers *541*
145 - Aprendizaje basado en proyectos de electrónica aplicada *547*

VIERNES 28 553

S6A – FUNDAMENTALS OF ELECTRONICS 553
14 - Módulos para Prácticas de Instrumentación Electrónica *555*
97 - Frente a la moda de la enseñanza en subgrupos pequeños, el potencial del aprendizaje individual *563*
142 - Osciloscopio Wi-Fi de bajo coste para el aprendizaje autónomo del uso de instrumentación de laboratorio *567*
111 - Diseño e Implementación de un Modelo de Páncreas Artificial para Jóvenes Estudiantes *571*
S6B – DOCTORAL/TFG/TFM 1 581
68 - Implementación y Pruebas del Algoritmo CORDIC Binario en Modo Rotación *583*
69 - Inteligencia artificial sobre procesadores edge computing *589*
55 - Sistema para el aprendizaje de la biología, enfermedades y tratamiento quirúrgico ocular usando realidad virtual. *595*
53 - Exploración de la aplicación práctica de la Inteligencia Artificial Generativa en IoT *605*
22 - Diseño prototipo generador de hidrógeno como fuente energética para la descarbonización *613*
74 - Localización espacial mediante intensimetría acústica para aplicaciones de audio binaural *621*
S7A – DOCTORAL/TFG/TFM 2 629
75 - Design, characterization, prototyping and Digital Twin of a Stewart platform. *631*
98 - Diseño y caracterización de amplificador de bajo ruido para banda X en tecnología CMOS 65 nm *641*
129 - Aplicación software para la monitorización de un laboratorio de tecnología fotovoltaica bifacial *647*
174 - Sistema embarcado para automatização do manejo da irrigação em agricultura familiar *657*
S7B – APPLICATIONS: ROBOTIC, IOT, IA, DOMOTIC, DRONS, ELECTRIC VEHICLE, RENEWABLE ENERGIES, BIOMEDICAL ENGINEERING, ETC. 665
66 - Diseño, implementación, y evaluación de un modelo de clase invertida y aprendizaje basado en proyectos para electrónica industrial *667*
119 - Introducción a la Electrónica para Estudiantes de Diseño Industrial *677*
131 - Sistema de ensayo y caracterización de cargadores de baterías en vehículos eléctricos *683*
158 - Trabajo en equipo dentro de un programa de robótica de competición universitario: retos y dificultades *689*
82 - El impacto del engagement del profesor, una herramienta para una docencia autoadaptativa *695*
S8A – DIGITAL SYSTEMS: EMBEDDED SYSTEMS 705
47 - Enseñanza de sistemas hw/sw embarcados en el grado de "física e instrumentación espacial" *707*
101 - El autoaprendizaje como competencia central en la enseñanza de fundamentos de computadores *715*
130 - Aproximación al aprendizaje-servicio en asignaturas de grado de ingeniería *721*
S8A – OTHER FIELDS IN ELECTRONICS 727

57 - Incorporación de una Línea de Ensamblaje de PCBs en la Educación de Ingeniería Electrónica 729
123 - VISIR Remote Laboratory: The Switching Matrix Limitations 737
137 - Asistencia a clase y enfoque del estudio: su influencia en el rendimiento de los alumnos 743

BIENVENIDA - BOAS-VINDAS - WELCOME

BIENVENIDA DE LOS ORGANIZADORES DEL CONGRESO TAEE 2024

Este 2024 la Universidad de Málaga (UMA) se honra en acoger la *XVI edición del Congreso de Tecnología Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica* (TAEE 2024). Del 26 al 28 de junio la ETSI de Telecomunicación y la ETSI en Informática abren sus puertas para auspiciar un encuentro que se celebra de forma bienal y continuada desde 1994; y reúne a profesionales de la electrónica de los campos de las Tecnologías Industriales y las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de España, Portugal y América Latina.

En la organización de este evento, los departamentos de Electrónica y Tecnología Electrónica de la UMA han aunado esfuerzos para llevar a buen puerto una de las principales actividades de la asociación TAEE (*Tecnología Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica)*, a la que queremos agradecer desde aquí su confianza y apoyo. Los congresos TAEE cuentan también con la co-esponsorización técnica de la Sociedad de Educación del IEEE y de su Capítulo Español, a los que agradecemos su presencia y colaboración.

Desde su origen, TAEE persigue crear un espacio para la reflexión y la difusión de experiencias y recursos didácticos (principalmente con base tecnológica), para el fomento y la generación cooperativa de conocimiento, con el objetivo de mejorar la docencia de la electrónica en sus diversos aspectos, y en los diferentes niveles educativos y profesionales. En este sentido, en esta XVI edición de TAEE, siguiendo la senda iniciada en TAEE22 Teruel, junto al formato tradicional del congreso en el que se presentan trabajos en forma de *comunicación oral*, *póster* o *demostrador*, se ha fomentado la presentación de trabajos del tipo *panel doctoral y trabajo fin de estudio*, que dan oportunidad a estudiantes que terminan sus estudios o inician su carrera profesional, de sumergirse en este tipo de encuentros y ampliar sus horizontes. Se ha realizado también una llamada especial a la participación para profesionales de las Enseñanzas Medias y Formación Profesional, si bien en este ámbito queda mucho por hacer, sobre todo debido a la diferencia de consideración que la participación en este tipo de eventos tiene en el *curriculum* y carrera profesional de estos docentes. Siguiendo con la tradición de abordar temas de actualidad e interés para el debate, en esta XVI edición se proponen dos *Sesiones Plenarias* (mesa redonda), que permitirán a los asistentes: (1) debatir sobre el papel de la Inteligencia Artificial en la Sociedad del Presente y en la Enseñanza y Aprendizaje de la Electrónica; y (2) tomar conciencia de diferentes aspectos del papel de las Mujeres en STEM. Contaremos también con una tercera mesa redonda organizada por la Sociedad Española de IEEE sobre el tema de Microcredenciales.

Queremos expresar nuestro agradecimiento a todos los que han hecho posible TAEE2024: autores, revisores, presidentes de sesión, asistentes, colaboradores y patrocinadores institucionales y privados, y por supuesto a todos los miembros de Comité Local, sin cuyo trabajo y dedicación no lo habríamos logrado. Un agradecimiento también a los directores de las escuelas que nos acogen, por su soporte institucional, así como a los directores de los departamentos organizadores (Electrónica y Tecnología Electrónica).

Para finalizar, os animamos a participar en todas las sesiones y actividades programadas, a compartir experiencias, a debatir y aprender y, no menos importante, a disfrutar de Málaga: "*La primera en el peligro de la Libertad, la muy Noble, muy Leal, muy Hospitalaria, muy Benéfica y siempre Denodada Ciudad de Málaga*". Sed bienvenidos.

En Málaga a 26 de junio de 2024.

Rafael de Jesús Navas González, Francisco Velasco Álvarez y Francisco Javier González Cañete – Organizadores del congreso TAEE 2024

BOAS-VINDAS DOS ORGANIZADORES DO CONGRESSO TAEE 2024

Neste ano de 2024, a Universidade de Málaga (UMA) tem a honra de sediar a 16ª edição do Congresso de Tecnologia, Aprendizagem e Ensino da Eletrônica (TAEE 2024). De 26 a 28 de junho, a Escola Técnica Superior de Engenharia de Telecomunicações e a Escola Técnica Superior de Engenharia Informática abrirão suas portas para acolher um evento que tem sido realizado bienalmente e de forma contínua desde 1994. Este congresso reúne profissionais de eletrônica dos campos das Tecnologias Industriais e das Tecnologias da Informação e Comunicação da Espanha, Portugal e América Latina.

Na organização deste evento, os departamentos de Eletrônica e Tecnologia Eletrônica da UMA uniram forças para realizar com sucesso uma das principais atividades da associação TAEE (Tecnologia, Aprendizagem e Ensino da Eletrônica), a quem queremos expressar nossa gratidão pela confiança e apoio. Os congressos TAEE também contam com o co-patrocínio técnico da Sociedade de Educação do IEEE e do seu Capítulo Espanhol, a quem agradecemos pela presença e colaboração.

Desde a sua criação, o TAEE visa criar um espaço para a reflexão e a divulgação de experiências e recursos didáticos (principalmente baseados em tecnologia), para fomentar e gerar conhecimento cooperativo com o objetivo de melhorar o ensino da eletrônica em seus diversos aspectos e em diferentes níveis educacionais e profissionais. Nesse sentido, nesta 16ª edição do TAEE, seguindo o caminho iniciado no TAEE22 Teruel, juntamente com o formato tradicional do congresso em que são apresentados trabalhos na forma de comunicação oral, pôster ou demonstrador, incentivamos a apresentação de trabalhos do tipo painel doutoral e trabalho de conclusão de curso, oferecendo oportunidades para estudantes que estão concluindo seus estudos ou iniciando suas carreiras profissionais de se envolverem nesse tipo de evento e ampliarem seus horizontes. Foi também feito um convite especial à participação de profissionais do Ensino Médio e da Formação Profissional, embora ainda haja muito a ser feito nesta área, principalmente devido à diferença na consideração que a participação neste tipo de evento tem no currículo e na carreira profissional desses docentes. Seguindo a tradição de abordar temas atuais e de interesse para o debate, nesta 16ª edição serão propostas duas Sessões Plenárias (mesa redonda), que permitirão aos participantes: (1) debater sobre o papel da Inteligência Artificial na Sociedade atual e no Ensino e Aprendizagem da Eletrônica; e (2) tomar consciência de diferentes aspectos do papel das Mulheres em STEM. Teremos também uma terceira mesa redonda organizada pela Sociedade Espanhola do IEEE sobre o tema das Microcredenciais.

Gostaríamos de expressar nossa gratidão a todos que tornaram o TAEE2024 possível: autores, revisores, presidentes de sessão, participantes, colaboradores e patrocinadores institucionais e privados, e, claro, a todos os membros do Comitê Local, sem cujo trabalho e dedicação não teríamos conseguido. Agradecimentos também aos diretores das escolas que nos recebem, pelo suporte institucional, assim como aos diretores dos departamentos organizadores (Eletrônica e Tecnologia Eletrônica).

Finalmente, encorajamos a todos a participarem de todas as sessões e atividades programadas, a compartilharem experiências, a debaterem e aprenderem e, não menos importante, a aproveitarem Málaga: "A primeira no perigo da Liberdade, a muito Nobre, muito Leal, muito Hospitaleira, muito Benéfica e sempre Corajosa Cidade de Málaga". Sejam bem-vindos.

Em Málaga, 26 de junho de 2024.
Rafael de Jesús Navas González, Francisco Velasco Álvarez e Francisco Javier González Cañete – Organizadores do congresso TAEE 2024

WELCOME FROM THE ORGANIZERS OF THE TAEE 2024 CONGRESS

This 2024, the University of Málaga (UMA) is honored to host the 16th edition of the Congress on Technology, Learning, and Teaching of Electronics (TAEE 2024). From June 26 to 28, the School of Telecommunication Engineering and the School of Computer Engineering will open their doors to host an event that has been held biennially and continuously since 1994. This congress brings together professionals in electronics from the fields of Industrial Technologies and Information and Communication Technologies from Spain, Portugal, and Latin America.

In organizing this event, the Departments of Electronics and Electronic Technology at UMA have joined forces to successfully carry out one of the main activities of the TAEE association (Technology, Learning, and Teaching of Electronics), for which we want to express our gratitude for their trust and support. The TAEE congresses also have the technical co-sponsorship of the IEEE Education Society and its Spanish Chapter, to whom we extend our thanks for their presence and collaboration.

Since its inception, TAEE has aimed to create a space for reflection and the dissemination of experiences and educational resources (mainly technology-based) to foster and generate cooperative knowledge with the goal of improving the teaching of electronics in its various aspects and at different educational and professional levels. In this sense, in this 16th edition of TAEE, following the path initiated at TAEE22 Teruel, alongside the traditional conference format where papers are presented as oral communications, posters, or demonstrators, we have encouraged the presentation of doctoral panels and final project work, providing opportunities for students who are completing their studies or starting their professional careers to immerse themselves in such events and broaden their horizons. A special call for participation has also been made for professionals in Secondary Education and Vocational Training, although there is still much to be done in this area, especially due to the difference in the consideration that participation in such events has in the curriculum and professional career of these educators. Following the tradition of addressing current and interesting topics for debate, this 16th edition will feature two Plenary Sessions (round tables), allowing attendees to: (1) discuss the role of Artificial Intelligence in today's Society and in the Teaching and Learning of Electronics; and (2) raise awareness of various aspects of the role of Women in STEM. We will also have a third round table organized by the Spanish IEEE Society on the topic of Microcredentials.

We would like to express our gratitude to everyone who made TAEE2024 possible: authors, reviewers, session chairs, attendees, collaborators, institutional and private sponsors, and, of course, all the members of the Local Committee, without whose work and dedication we would not have succeeded. Thanks also to the directors of the hosting schools for their institutional support, as well as to the directors of the organizing departments (Electronics and Electronic Technology).

Finally, we encourage you to participate in all the sessions and activities planned, to share experiences, to debate and learn, and, no less important, to enjoy Málaga: "The first in the peril of Liberty, the most Noble, most Loyal, most Hospitable, most Beneficent, and always Valiant City of Málaga". Be Welcome.

In Málaga, June 26, 2024.
Rafael de Jesús Navas González, Francisco Velasco Álvarez and Francisco Javier González Cañete – Organizers of the TAEE 2024 Congress

C ORGANIZADORES Y PATROCINADORES - ORGANIZADORES E PATROCINADORES - ORGANISERS AND SPONSORS

ORGANIZADORES – ORGANISERS

PATROCINADORES – SPONSORS

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

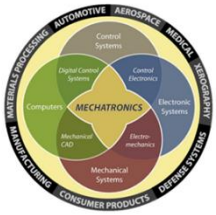
E.T.S. DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

E.T.S. INGENIERÍA INFORMÁTICA UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

IMECH.UMA

INSTITUTO UNIVERSITARIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA MECATRÓNICA Y SISTEMAS CIBERFÍSICOS



Telma

Telecommunications Research Institute
Universidad de Málaga

COPITI

Colegio Oficial de Peritos e Ingenieros Técnicos industriales de Málaga

Co-funded by the Erasmus+ Programme of the European Union

COMITÉS – COMITÊS – COMMITTEES

COORDINADORES – COORDENADORES – COORDINATORS

Rafael de Jesús Navas González, Universidad de Málaga, España

Francisco Velasco Álvarez, Universidad de Málaga, España

Francisco Javier González Cañete, Universidad de Málaga, España

COMITÉ LOCAL – COMITÊ LOCAL – LOCAL COMMITTEE

Andrés Trujillo León, Universidad de Málaga, España

Daniel Rosas Cervantes, Universidad de Málaga, España

Davinia Trujillo Aguilera, Universidad de Málaga, España

Elidia Beatriz Blázquez Parra, Universidad de Málaga, España

Eva González Parada, Universidad de Málaga, España

Fernando Vidal Verdú, Universidad de Málaga, España

Francisco J. González Cañete, Universidad de Málaga, España

Francisco Javier Hormigo Aguilar, Universidad de Málaga, España

Francisco José Sánchez Pacheco, Universidad de Málaga, España

Francisco Velasco Álvarez, Universidad de Málaga, España

José Antonio Sánchez Durán, Universidad de Málaga, España

José Borja Castillo Sánchez, Universidad de Málaga, España

José Manuel Cano García, Universidad de Málaga, España

José Miguel Galeas Merchán, Universidad de Málaga, España

José Sánchez Rodríguez, Universidad de Málaga, España

Julián Castellanos Ramos, Universidad de Málaga, España

Margarita Ruiz García, Universidad de Málaga, España

Martín González García, Universidad de Málaga, España

Óscar Oballe Peinado, Universidad de Málaga, España

Rafael de Jesús Navas González, Universidad de Málaga, España

COMITÉ PERMANENTE – COMITÊ PERMANENTE – STANDING COMMITTEE

André Vaz Fidalgo, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal

Mª Asunción Morales Santana, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, emérita TAEE, España

Camilo Quintáns Graña, Universidade de Vigo, España

Catalina Rus Casas, Universidad de Jaén, España

César Collazos, Universidad de Cauca Popayán, Colombia

César Sanz Álvaro, Universidad Politécnica de Madrid, España

David Benito Pertusa, Universidad Pública de Navarra, España

Davinia Trujillo Aguilera, Universidad de Málaga, España

Edmundo Tovar Caro, Universidad Politécnica de Madrid, España

Emilio Olías Ruiz, Universidad Carlos III, España

Enrique Mandado Pérez, Universidade de Vigo, España

Federico José Barrero García, Universidad de Sevilla, España

Fernando Pescador del Oso, Universidad Politécnica de Madrid, España

Francisco Javier Azcondo Sánchez, Universidad de Cantabria, España

Gonzalo Casaravilla, Universidad de la República, Uruguay

Gustavo Ribeiro Alves, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal

Inmaculada Plaza García, Universidad de Zaragoza, España

Javier García Zubía, Universidad de Deusto, España

Jesús Arriaga García de Andoaín, Universidad Politécnica de Madrid, emérito TAEE, España

Jorge Juan Chico, Universidad de Sevilla, España

José Miguel Páez Jiménez, Universidad de Costa Rica, Costa Rica

José Miguel Ruiz González, Universidad de Valladolid, España

Juan Domingo Aguilar Peña, Universidad de Jaén, España

Juarez Silva, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Julio Pérez Acle, Universidad de la República, Uruguay

Manuel Blázquez, IES Ramiro de Maeztu, España

Manuel Castro Gil, Universidad Nacional de Educación a Distancia, España

Manuel Martins Barata, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal

Manuel Rodríguez Valido, Universidad de La Laguna, España

Manuel Carlos Felgueiras, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal

Martín Llamas Nistal, Universidade de Vigo, España

Rafael de Jesús Navas González, Universidad de Málaga, España

Ramón Bragos Bardía, Universitat Politècnica de Catalunya, España

Raymundo Barrales Guadarrama, Universidad Autónoma Metroplitana-Azcapotzalco, México

Ricardo Jorge Costa, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal

Roberto Capilla Lladró, Universitat Politècnica de València, España

Sergio López Gregorio, Universidad Politécnica de Madrid, España

COMITÉ CIENTÍFICO – COMITÊ CIENTÍFICO – SCIENTIFIC COMMITTEE

André Vaz Fidalgo, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal

Andrés Trujillo León, Universidad de Málaga, España

Mª Asunción Morales Santana, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, emérita TAEE, España

Camilo Quintáns Graña, Universidade de Vigo, España

Catalina Rus Casas, Universidad de Jaén, España

César Collazos, Universidad de Cauca Popayán, Colombia

César Sanz Álvaro, Universidad Politécnica de Madrid, España

Davinia Trujillo Aguilera, Universidad de Málaga, España

Edmundo Tovar Caro, Universidad Politécnica de Madrid, España

Emilio Olías Ruiz, Universidad Carlos III, España

Enrique Mandado Pérez, Universidade de Vigo, España

Eva González Parada, Universidad de Málaga, España

Federico José Barrero García, Universidade de Sevilla, España

Fernando Pescador del Oso, Universidad Politécnica de Madrid, España

Fernando Vidal Verdú, Universidad de Málaga, España

Francisco Javier Azcondo Sánchez, Universidad de Cantabria, España

Francisco Javier González Cañete, Universidad de Málaga, España

Francisco Javier Hormigo Aguilar, Universidad de Málaga, España

Francisco Velasco Álvarez, Universidad de Málaga, España

Gonzalo Casaravilla, Universidad de la República, Uruguay

Gustavo Ribeiro Alves, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal

Inmaculada Plaza García, Universidad de Zaragoza, España

Javier García Zubía, Universidad de Deusto, España

Jorge Juan Chico, Universidad de Sevilla, España

José Ángel Sánchez Ortiz, emérito TAEE, España

José Antonio Sánchez Durán, Universidad de Málaga, España

José Borja Castillo Sánchez, Universidad de Málaga, España

José Manuel Cano García, Universidad de Málaga, España

José Miguel Galeas Merchán, Universidad de Málaga, España

José Miguel Páez Jiménez, Universidad de Costa Rica, Costa Rica

Juan Domingo Aguilar Peña, Universidad de Jaén, España

Juarez Silva, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Julián Castellanos Ramos, Universidad de Málaga, España

Julio Pérez Acle, Universidad de la República, Uruguay

Manuel Blázquez, IES Ramiro de Maeztu, España

Manuel Martins Barata, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal

Manuel Castro Gil, Universidad Nacional de Educación a Distancia, España

Manuel Rodríguez Valido, Universidad de La Laguna, España

Manuel Carlos Felgueiras, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal

Margarita Ruiz García, Universidad de Málaga, España

Martín González García, Universidad de Málaga, España

Martín Llamas Nistal, Universidade de Vigo, España

Óscar Oballe Peinado, Universidad de Málaga, España

Rafael de Jesús Navas González, Universidad de Málaga, España

Ramón Bragos Bardía, Universitat Politècnica de Catalunya, España

Ricardo Jorge Costa, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal

Roberto Capilla Lladró, Universitat Politècnica de València, España

Sergio López Gregorio, Universidad Politécnica de Madrid, España

E REVISORES – REVISORES – REVIEWERS

Alberto Daza-Márquez	Universidad de Málaga
Alberto Yufera García	Universidad de Sevilla
Alfonso Lago	Universidade de Vigo
Ana Jiménez Martín	Universidad de Alcalá
Ana López	Universidad de Zaragoza
Ana Mª. Barbancho	Universidad de Málaga.
André Fidalgo	ISEP
Andrés Trujillo-León	Universidad de Málaga
Ángel Javier Álvarez Miguel	Universidad de Alcalá
Antonio Diaz-Estrella	Universidad de Málaga
Belén Calvo	Universidad de Zaragoza
Camilo Quintáns Graña	Universidade de Vigo
Carlos Cruz	Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Carlos J. García-Orellana	Universidad de Extremadura
Carlos J. Jiménez-Fernández	Instituto de Microelectrónica de Sevilla/Universidad de Sevilla
Carlos Medrano	CVLab, University of Zaragoza
Catalina Rus-Casas	Universidad de Jaén
Cesar A. Collazos	Universidad de Cauca
David Guerrero Martos	Universidad de Sevilla
Davinia Trujillo-Aguilera	Universidad de Málaga
Diego Antolín Cañada	Universidad de Zaragoza
Eduardo Magdaleno	Universidad de La Laguna
Emilio Olías Ruiz	Universidad Carlos III de Madrid
Eva González Parada	Universidad de Málaga
Federico Barrero	University of Seville
Fernando Vidal-Verdú	Universidad de Málaga
Francisco Javier Arcega Solsona	Universidad de Zaragoza
Francisco Javier Azcondo	Universidad de Cantabria
Francisco Javier González Cañete	Universidad de Málaga
Francisco Javier Hormigo Aguilar	Universidad de Málaga
Francisco Javier Ríos Gómez	Universidad de Málaga
Francisco Javier Vizcaíno Martín	Universidad de Málaga
Francisco José Sánchez Pacheco	Universidad de Málaga
Francisco Velasco-Álvarez	Universidad de Málaga
Gonzalo Casaravilla	Universidad de la República - Uruguay
Gonzalo Joya Caparrós	Universidad de Málaga
Gustavo Alves	Polytechnic of Porto - School of Engineering
Horacio M González Velasco	Universidad de Extremadura
Inmaculada Plaza García	Universidad de Zaragoza
Jaime Jiménez	University of the Basque Country
Javier García-Zubia	Universidad de Deusto
Javier López García	Universidad de Málaga

Javier Vázquez del Real	Universidad de Castilla La Mancha
Jorge Juan Chico	University of Seville
Jorge Romero Sánchez	Universidad de Málaga
José Ángel Sánchez Ortiz	UNED Talavera
José Antonio Hidalgo-López	Universidad de Málaga
José Antonio Sánchez Durán	Universidad de Málaga
José Borja Castillo Sánchez	Universidad de Málaga
José Fernández Ramos	Universidad de Málaga
José Francisco Martin Canales	Universidad de Málaga
José I. Artigas	Universidad de Zaragoza
José Manuel Cano García	Universidad de Málaga
José Miguel Galeas Merchán	Universidad de Málaga
José Vicente Muñoz Díez	Universidad de Jaén
Juan A. Rodríguez-Fernández	Universidad de Málaga
Juan Carlos Tejero Calado	Universidad de Málaga
Juan Domingo Aguilar Peña	Universidad de Jaén
Juan Oliver	Universidad de la Republica
Juan Pedro Peña Martín	University of Málaga
Juárez Bento Silva	Universidade Federal de Santa Catarina
Julián Castellanos-Ramos	Universidad de Málaga
Julián Viejo Cortés	Universidad de Sevilla
Julio Pastor Mendoza	Universidad de Alcalá
Julio Pérez Acle	Universidad de la Republica
Luis Gil	Universitat Politècnica de València
Mª Asunción Morales	Miembro Referente de la Asociación TAEE
Manuel Blázquez	IES Ramiro de Maeztu - UNED
Manuel Cáceres	GER. Universidad Nacional del Nordeste
Manuel Castro	UNED
Manuel Felgueiras	ISEP
Manuel Fernández-Carmona	Universidad de Málaga
Manuel Jesús Martín Vázquez	Universidad de Málaga
Manuel Martins Barata	ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
Manuel Perales	University of Seville
Manuel Rodríguez	Universidad de La Laguna
Margarita Ruiz-García	Universidad de Málaga
Martín González García	Universidad de Málaga
Martín Llamas-Nistal	Universidad de Vigo
Miguel Macías	Universidad de Extremadura
Nicolas Medrano	Group of Electronic Design, I3A, University of Zaragoza
Nuria López Ruiz	University of Granada
Óscar Oballe-Peinado	Universidad de Málaga
Paula Lamo	Universidad Internacional de La Rioja
Pedro Gil Jiménez	Universidad de Alcalá
Pedro J. Muñoz-Merino	Universidad Carlos III de Madrid
Pedro Roncero-Sánchez	Universidad de Castilla-La Mancha
Rafael de Jesús Navas-González	Universidad de Málaga
Ramón Bragos	Universitat Politècnica de Catalunya
Ramón Gallardo-Caballero	Universidad de Extremadura
Raquel Fernández Ramos	Universidad de Málaga
Ricardo Costa	ISEP
Ricardo Ron-Angevin	Universidad de Málaga

Roberto Capilla Lladró	Universitat Politècnica Valencia
Rosalino Rodríguez Calderón	Tecnológico de Monterrey
Sergio López Gregorio	Universidad Politécnica de Madrid
Sergio Martin	UNED - University for Distance Education of Spain
Unai Hernández-Jayo	University of Deusto

MODERADORES – MODERADORES – CHAIRS

Nombre	Apellidos	Afiliación	Sesión
Juan Domingo	Aguilar Peña	Universidad de Jaén	S2C
Gustavo	Alves	Polytechnic of Porto - School of Engineering	S5B
Diego	Antolín Cañada	Universidad de Zaragoza	S6A
David	Asiain Ansorena	Universidad de Zaragoza	S3A
Julián	Castellanos-Ramos	Universidad de Málaga	D4
Luis	Gil	Universitat Politècnica de València	S7A
Aurora	Gil de Casttro	Universidad de Córdoba	D1
Unai	Hernández-Jayo	University of Deusto	S8B
José Antonio	Hidalgo-Lopez	Universidad de Málaga	S1A
Francisco Javier	Hormigo Aguilar	Universidad de Málaga	D2
Jaime	Jiménez	University of the Basque Country	P2
Gonzalo	Joya Caparrós	Universidad de Málaga	PL1
Jorge	Juan	University of Seville	S5C
Martin	Llamas-Nistal	Universidad de Vigo	S2B
Sergio	López Gregorio	Universidad Politécnica de Madrid	S5A
Carlos	Medrano	CVLab, Aragon Institute for Engineering Research, University of Zaragoza	D6
Mª Asunción	Morales	Miembro Referente de la Asociación TAEE	S2A
Pedro J.	Muñoz-Merino	Universidad Carlos III de Madrid	S1C PLIEEE
Óscar	Oballe-Peinado	Universidad de Málaga	D3
Manuel	Perales	University of Seville	S7B
Juan Pedro	Peña Martín	University of Málaga	S3B
Inmaculada	Plaza García	Universidad de Zaragoza	S1B
Margarita	Ruiz-Garcia	Universidad de Málaga	P1
Catalina	Rus-Casas	Universidad de Jaén	S8A
Elio	San Cristóbal Ruiz	Universidad Nacional de Educación a Distancia	S4A
Cristina	Urdiales García	Universidad de Málaga	PL2
Francisco	Velasco-Alvarez	Universidad de Málaga	D5
Fernando	Vidal-Verdú	Universidad de Málaga	S4B
Julián	Viejo Cortés	Universidad de Sevilla	S6B

G ÁMBITOS – ÁREAS – AREAS

ÁMBITOS TEMÁTICOS

La asociación TAEE y el comité local invitaron a enviar trabajos para su valoración en alguno de los diferentes ámbitos de la Electrónica, en el marco de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones:

- Fundamentos de electrónica
- Electrónica analógica, digital y de potencia
- Sistemas digitales
- Microcontroladores y microprocesadores
- Instrumentación electrónica
- Tecnología de dispositivos
- Sistemas de control
- Procesado de señal
- Sistemas de comunicación
- Electrónica de telecomunicaciones
- Aplicaciones (p. ej.: ingeniería biomédica, robótica, domótica, drones, vehículo eléctrico)
- Experiencias docentes
- Prácticas en empresa
- Colaboración Universidad-Empresa
- Otros campos en el ámbito de la electrónica

ÁREAS TEMÁTICAS

A associação TAEE e o comité local convidaram à apresentação de candidaturas para avaliação num dos diferentes domínios da eletrónica, no âmbito das tecnologias da informação e da comunicação:

- Fundamentos da eletrónica
- Eletrónica analógica, digital e de potência
- Sistemas digitais
- Microcontroladores e microprocessadores
- Instrumentação eletrónica
- Tecnologia de dispositivos
- Sistemas de controlo
- Processamento de sinais
- Sistemas de comunicação
- Eletrónica de telecomunicações
- Aplicações (por exemplo, engenharia biomédica, robótica, automação doméstica, drones, veículos eléctricos)
- Experiências de ensino
- Estágios em empresas
- Colaboração universidade-indústria
- Outros domínios no campo da eletrónica

THEMATIC AREAS

The TAEE association and the local committee invited submissions for assessment in one of the different fields of Electronics, within the framework of Information and Communication Technologies:

- Fundamentals of Electronics
- Analogue, digital and power electronics
- Digital systems
- Microcontrollers and microprocessors
- Electronic instrumentation
- Device technology
- Control systems
- Signal processing
- Communication systems
- Telecommunications electronics
- Applications (e.g. biomedical engineering, robotics, home automation, drones, electric vehicles)
- Teaching experiences
- Internships in companies
- University-industry collaboration
- Other fields in the field of electronics

H PONENCIAS – APRESENTAÇÕES – PRESENTATIONS

SESIÓN PLENARIA 1 – SESSÃO PLENÁRIA 1 – PLENARY SESSION 1

Título: INTELIGENCIA ARTIFICIAL: TECNOLOGÍA, ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE PARA UNA SOCIEDAD DEL PRESENTE

Patrocinador: Patrocinador: iMath Project - An Intelligent System to Learn Mathematics

Ponentes:

- Catalin Stoean (Universidad de Craiova, Rumanía)
- Ezequiel López Rubio (Universidad de Málaga, España)
- Unai Hernández Jayo (Universidad de Deusto, España)
- Eligius M.T. Hendrix (Universidad de Málaga, España)

Modera: Gonzalo Joya Caparrós (Universidad de Málaga, España)

Resumen:

Vivimos un tiempo en que la Inteligencia Artificial (IA) está casi en todas partes y casi todo el mundo habla de ella. Los medios abundan en noticias y artículos de opinión, a menudo escritos por personas con peso en el ámbito de la comunicación, pero sin un conocimiento técnico en la materia, en los que suele repetirse un relato de potenciales peligros, sesgos y deficiencias achacables a la IA que, igualmente, podrían achacarse a los seres humanos. Es decir, que parecen más propios del carácter “inteligente” que del “artificial”.

En este debate, con el que comenzamos la andadura en esta, nuestra XVI edición del Congresos TAEE (TAEE2024), pretendemos analizar, de una manera reflexiva basada en el conocimiento y la experiencia, algunos aspectos clave de la IA, como su incidencia en nuestro modelo de sociedad y en los actuales procesos de enseñanza, o su forma de aprender y los posibles recursos para reducir sus errores y sesgos.
Esta actividad ha sido cofinanciada por iMath Project – An Intelligent System to Learn Mathematics (https://imath.pixel-online.org/).

MESA REDONDA IEEE – MESA REDONDA IEEE – IEEE ROUND TABLE

Título: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES OF MICRO-CREDENTIALS

Ponentes:

- Carlos Delgado Kloos
- Alexandre Sousa
- Antonio José Ribeiro Neves
- Victoriano Francisco Giralt García
- Timothy Read

Modera: Pedro Fonseca, Pedro J. Muñoz-Merino

Resumen:

Micro-credentials are certifications of small pieces of knowledge, competences or aptitudes, on the opposite to certifications of complete degrees. It allows a fined-grained recognition of students' skills which is personalized to each one. Students can adapt their learning path selecting the topics to learn for which they get recognition and can discard other topics for which they are not interested in. In electronics, micro-credentials can have an important role in the teaching and learning process.

Micro-credential promotes small courses for traditional topics but also emerging topics that can engage lifelong learning. In the current context, it is essential to update knowledge and get certificates and recognition about it. Micro-credentials can be taught in a formal manner but also in an informal one.

There are different challenges about micro-credentials such as how to define these small pieces of knowledge, how to make certifications compatible and interoperable, how to evaluate them in a fair manner that is compatible and comparable from different countries and contexts, which institutions can issue these certificates, the security of certificates, possibility of combination of different micro-credentials from different institutions, or the democratization of teaching since access to these courses may not have so high requirements.

SESIÓN PLENARIA 2 – SESSÃO PLENÁRIA 2 – PLENARY SESSION 2

Título: MUJERES EN STEM - VISIBILIZACIÓN, EDUCACIÓN Y PROFESIÓN

Ponentes:

- Soledad Díaz Campos
- Aurora Gil de Castro
- Sonia González Navarro
- Ana Grande Pérez

Modera: Cristina Urdiales García

Coordina: Eva González Parada

Resumen:

Esta mesa redonda busca abordar integralmente el tema de la presencia y participación de las mujeres en STEM, desde la sensibilización en edades tempranas hasta el análisis crítico de las dinámicas profesionales en el ámbito laboral. Por ello, la mesa se organizará sobre tres aspectos fundamentales que tienen como objetivo fortalecer el papel de las mujeres en los campos de la ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas.

Visibilización: En este aspecto se abordarán iniciativas y estrategias que tratan de visibilizar el trabajo y la contribución de las mujeres en STEM y cómo estas acciones pueden impactar en la normalización de la presencia de las mujeres en STEM. Se discutirá cómo la falta de representación y reconocimiento puede desalentar a las mujeres a ingresar y permanecer en estas áreas, así como la necesidad de destacar modelos a seguir femeninos para inspirar a futuras generaciones.

Educación: Bajo este aspecto se analizará el papel crucial de la educación en la promoción de la participación de las mujeres en STEM. Se discutirá sobre los desafíos y barreras que enfrentan las niñas y mujeres en el acceso a la educación STEM, incluyendo el impacto de nuevas herramientas tecnológicas como la inteligencia artificial. Se expondrán experiencias y perspectivas sobre cómo atraer a estudiantes femeninas hacia carreras STEM, así como programas y enfoques educativos que han demostrado ser efectivos para inspirar y retener a jóvenes mujeres en el ámbito científico y tecnológico.

Profesión: En este aspecto se analizará el papel de las mujeres en empresas y centros de investigación STEM, tomando como referencia estudios y datos que examinen las diferencias de género en la investigación y desarrollo. Se expondrán los obstáculos a los que se enfrentan las mujeres en su carrera profesional en STEM. Se reflexionará sobre las diferencias de género, destacando no solo las barreras derivadas del sexismo, sino también explorando las que se derivan de características intrínsecas al género, como por ejemplo periodos de lactancia. La propuesta de soluciones para promover la igualdad, así como programas de mentoría que apoyan el desarrollo profesional de las mujeres en STEM también tendrán cabida.

PROGRAMA – PROGRAMA – PROGRAM

	Día 26	Día 27	Día 28
8:00		Registro y acreditación	Registro y acreditación
8:30	Registro y acreditación		
9:00		Sesiones S3A,S3B	Sesiones S6A,S6B
9:30			
10:00	Inauguración		
10:30	Sesión plenaria I	Café	Café
11:00		Sesión plenaria II	Sesiones S7A,S7B
11:30			
12:00	Café		
12:30	Sesiones S1A,S1B,S1C	Sesiones S4A,S4B	Sesiones S8A,S8B
13:00			
13:30			Clausura
14:00	Comida	Comida	Comida
14:30			
15:00			
15:30			
16:00	Sesiones S2A,S2B,S2C	Sesiones S5A,S5B,S5C	
16:30			
17:00	Merienda P1,D1,D2,D3	Merienda P2,D4,D5,D6	
17:30			
18:00	Mesa redonda IEEE	Asamblea TAEE	
18:30			
19:00	Reunión IEEE		
19:30	Acto social	Acto Social	
20:00			
20:30			
21:00			
21:30	Moraga de bienvenida	Cena de gala	

	26 de Junho	27 de Junho	28 de Junho
8:00		Inscrição	Inscrição
8:30	Inscrição		
9:00		Sessões S3A,S3B	Sessões S6A,S6B
9:30			
10:00	Abertura		
10:30	Sessão Plenária I	Pausa para café	Pausa para café
11:00		Sessão Plenária II	Sessões S7A,S7B
11:30			
12:00	Pausa para café		
12:30	Sessões S1A,S1B,S1C	Sessões S4A,S4B	Sessões S8A,S8B
13:00			
13:30			Fechamento
14:00	Almoço	Almoço	Almoço
14:30			
15:00			
15:30			
16:00	Sessões S2A,S2B,S2C	Sessões S5A,S5B,S5C	
16:30			
17:00	Pausa para café P1,D1,D2,D3	Pausa para café P2,D4,D5,D6	
17:30			
18:00	Mesa redonda IEEE	Assembleia TAEE	
18:30			
19:00	IEEE Reunião		
19:30	Evento social	Evento Social	
20:00			
20:30			
21:00			
21:30	Coquetel de boas-vindas	Jantar de gala	

<table>
<tr><th></th><th>June 26</th><th>June 27</th><th>June 28</th></tr>
<tr><td>8:00</td><td></td><td rowspan="2">Registration</td><td rowspan="2">Registration</td></tr>
<tr><td>8:30</td><td rowspan="3">Registration</td></tr>
<tr><td>9:00</td><td rowspan="3">Sessions
S3A,S3B</td><td rowspan="3">Sessions
S6A,S6B</td></tr>
<tr><td>9:30</td></tr>
<tr><td>10:00</td><td>Opening</td></tr>
<tr><td>10:30</td><td rowspan="3">Plenary Session I</td><td>Coffee break</td><td>Coffee break</td></tr>
<tr><td>11:00</td><td rowspan="3">Plenary Session II</td><td rowspan="3">Sessions
S7A,S7B</td></tr>
<tr><td>11:30</td></tr>
<tr><td>12:00</td><td>Coffee break</td></tr>
<tr><td>12:30</td><td rowspan="3">Sessions
S1A,S1B,S1C</td><td rowspan="3">Sessions
S4A,S4B</td><td rowspan="2">Sessions
S8A,S8B</td></tr>
<tr><td>13:00</td></tr>
<tr><td>13:30</td><td>Closure</td></tr>
<tr><td>14:00</td><td rowspan="4">Lunch</td><td rowspan="4">Lunch</td><td rowspan="4">Lunch</td></tr>
<tr><td>14:30</td></tr>
<tr><td>15:00</td></tr>
<tr><td>15:30</td></tr>
<tr><td>16:00</td><td rowspan="2">Sessions
S2A,S2B,S2C</td><td rowspan="2">Sessions
S5A,S5B,S5C</td><td rowspan="10"></td></tr>
<tr><td>16:30</td></tr>
<tr><td>17:00</td><td rowspan="2">Coffee break
P1,D1,D2,D3</td><td rowspan="2">Coffee break
P2,D4,D5,D6</td></tr>
<tr><td>17:30</td></tr>
<tr><td>18:00</td><td rowspan="2">Round table
IEEE</td><td rowspan="2">TAEE Assembly</td></tr>
<tr><td>18:30</td></tr>
<tr><td>19:00</td><td rowspan="2">IEEE Meeting</td><td></td></tr>
<tr><td>19:30</td><td rowspan="3">Social event</td><td rowspan="3">Social event</td></tr>
<tr><td>20:00</td></tr>
<tr><td>20:30</td></tr>
<tr><td>21:00</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>21:30</td><td>Welcome Cocktail</td><td>Gala dinner</td></tr>
</table>

1 ARTÍCULOS – ARTIGOS – PAPERS

MIÉRCOLES 26

S1A - DEVICE TECHNOLOGY

Diseño de un Pulsioxímetro en una Asignatura de Electrónica Digital

José A. Hidalgo-López
Dept. de Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
jahidalgo@uma.es

Raquel Fernández-Ramos
Dept. de Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
ramos@uma.es

Jorge Romero-Sánchez
Dept. de Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
jromeros@uma.es

***Abstract*— Diversas asignaturas de Electrónica Digital son impartidas cuando el alumnado aún no tiene amplios conocimientos de Electrónica Analógica. En estos casos, es difícil encontrar prácticas que interesen al estudiante y tengan relación con el mundo real. En el presente trabajo se muestra el diseño de un pulsioxímetro de fácil implementación para este tipo de estudiantes. El pulsioxímetro tiene un hardware de adquisición de señal muy reducido, sin utilizar unos módulos analógicos complejos cuyo funcionamiento no es comprendido por el estudiante. Únicamente se requiere un procesador digital, resistencias, un diodo fotodetector y diodos emisores de luz, LED. La filosofía de diseño está basada en los denominados Circuitos de Interfaz Directa, DICs. La implementación realizada utiliza una FPGA, como procesador digital, permitiendo la obtención de la frecuencia cardíaca, HR, y la saturación de oxígeno en sangre, SpO_2. Con el objetivo de reducir el diseño digital incluido en la FPGA y para completar la práctica visualizando los resultados será necesario el uso de un computador auxiliar y del software Matlab. Como estos dispositivos tienen un gran éxito entre el público general, la realización de la práctica resulta una experiencia muy motivadora para los estudiantes.**

Keywords*— *Pulsioxímetro, Enseñanza de Electrónica Digital, Fotopletismografía, Circuito de Interfaz Directa.

I. INTRODUCIÓN

El uso de pulsioxímetros se ha popularizado durante la última década, llegando a ser dispositivos de uso cotidiano que cautivan nuestra atención. Ya sean utilizados de forma única, o integrados en "pulseras de actividad física", estos dispositivos proporcionan datos de gran interés fisiológico, tanto desde el punto de vista médico, como del análisis del rendimiento de la actividad física. Así, su diseño puede ser muy atrayente para todo tipo de estudiantes de Electrónica Digital, que se encuentran trabajando en la implementación de un dispositivo avanzado de uso común.

Usualmente, el diseño de un pulsioxímetro es una tarea compleja y requiere de conocimientos de electrónica analógica y digital. Por una parte, se necesitan circuitos analógicos para la adquisición digital de la señal, tales como: amplificadores o integradores conmutados, filtros y conversores analógico-digitales. Por otro lado, los datos, ya en formato digital, necesitan ser procesados para conseguir la frecuencia cardíaca, HR, y la saturación de oxígeno en sangre SpO_2.

Esto significa que, a pesar del interés que estos dispositivos puedan presentan para el alumnado, es difícil introducir el diseño de pulsioxímetros en asignaturas de Electrónica Digital que son impartidas cuando el estudiante prácticamente no tiene conocimientos de electrónica analógica (como pueden ser los grados relacionados con Ingeniería de Computadores o Ingeniería de la Salud).

Este trabajo fue realizado gracias a los fondos aportados por el Gobierno de España a través del proyecto del plan nacional de investigación PID2021-125091OB-I00.

Un pulsioxímetro requiere dos diodos emisores de luz, LEDs, de longitudes de onda roja, RLED, e infrarroja, IRLED, y un fotodetector, PD. La luz emitida por los LEDs atraviesa el tejido cutáneo y el agua, siendo absorbida-reflejada con diferente intensidad por la hemoglobina no oxigenada, Hb, y por la hemoglobina oxigenada HbO_2. La HbO_2 absorbe mayor cantidad de luz infrarroja que la Hb. La cantidad de Hb y HbO_2 que encuentra la luz emitida en su camino hacia el fotodetector varía a lo largo de cada ciclo de latido del corazón y determina la intensidad luminosa que es recibida por el PD.

Normalmente, las longitudes de onda emitidas por los LED son de 660 nm para el IRLED y de 940 nm para el RLED. El PD tiene que poder detectar estas dos longitudes de onda. La información necesaria es extraída a partir de la cantidad de luz emitida por cada LED y recibida por PD, tras ser reflejada o trasmitida por una parte del cuerpo. Esta información debe proporcionar, al menos, la frecuencia cardíaca y la saturación de oxígeno en sangre a través de los denominados fotopletismogramas, que muestran la evolución temporal de la concentración de Hb y HbO_2.

Una colocación muy común de un pulsioxímetro consiste en hacer incidir la luz del RLED y del IRLED sobre la punta de un dedo y recibir la luz reflejada con el PD, siendo la disposición adoptada en este artículo, debido también a la facilidad de uso que representa para los estudiantes (aunque deben ser advertidos de la colocación correcta del dedo en el dispositivo).

Los pulsioxímetros convencionales proporcionan sus resultados a partir del valor de la corriente que circula por el PD polarizado en zona inversa, I_{PD}, en la Fig. 1. Esta corriente es, principalmente, proporcional a la intensidad lumínica que llega al PD desde los LEDs, y, por lo tanto, depende de las cantidades de Hb y HbO_2 que la luz de los LEDs encuentra en su camino.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el sistema presenta pequeños errores en los resultados debido a la corriente inversa de saturación del PD, I_S, y a la corriente derivada de la luz ambiental. Si se aísla lumínicamente el sistema del entorno y como I_S es pequeña, estos errores son minimizados. También hay que tener en cuenta los efectos debidos al condensador asociado al PD, C_{PD} en la Fig. 1. Este condensador solo afectará al comportamiento dinámico del sistema, restando resolución temporal a los fotopletismogramas.

La Fig. 1 muestra que, en prácticamente todos los pulsioxímetros convencionales, la información contenida en I_{PD} es transformada en voltaje usando un Amplificador de Transimpedancia, TIA. A partir de este voltaje, existen dos implementaciones posibles para obtener finalmente la información con la que construir los fotopletismogramas en formato digital. El camino marcado en verde es utilizado, entre otros, en los diseños presentados en [1]–[3] y, consiste

en la utilización de un amplificador de voltaje y un conversor analógico-digital, ADC, para realizar una transformación voltaje-digital. Por su parte, el camino marcado en azul utiliza un integrador conmutado, SI, y un comparador analógico (cuyo esquema se muestra en la Fig. 1) para realizar una transformación voltaje-tiempo-digital [4]–[7]. Esta última transformación genera una señal de salida cuya duración a un determinado valor depende de la amplitud del voltaje a la salida del TIA. La duración del intervalo de tiempo a considerar es medida por el Procesador Digital, DP, simplemente a través de sus pines de entrada.

El problema de ambas arquitecturas es que son necesarios diversos bloques analógicos que incluyen amplificadores operaciones y que requieren, para su compresión, conocimientos de electrónica analógica. Como se ha comentado esto es un serio problema para determinados estudiantes ya que, los módulos analógicos deberían ser "bloques negros" que han de ser proporcionados a los estudiantes y conectados de determinada manera al resto del circuito. El tratar con estos "bloques negros" siempre genera entre el alumnado la sensación de realizar un trabajo incompleto, restando motivación.

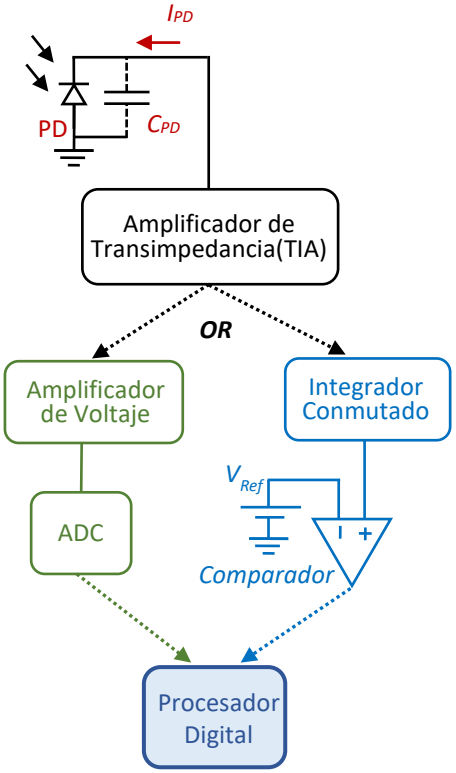


Fig. 1. Circuitos clásicos para la conversión luz-digital en un pulsioxímetro convencional.

Recientemente, uno de los autores de este artículo ha propuesto una nueva arquitectura de pulsioxímetro [8] que evita la necesidad de utilizar bloques analógicos en la implementación. El diseño está basado en los conocidos como Circuitos de Interfaz Directa, DICs. Los DICs se caracterizan por su simplicidad y son utilizados para la lectura de distintos tipos de sensores [9]–[11]. En los DICs, las magnitudes a medir se transforman en un tiempo de descarga de uno o más condensadores que han sido previamente cargados por un DP a través de sus pines de salida. La duración del tiempo de descarga, medida por el propio DP, proporcionan la información necesaria. Así un DIC lleva a cabo una transformación magnitud-tiempo-digital (similar a la transformación realizada por el camino azul de la Fig. 2).

Basándonos en la filosofía de diseño de los DICs, en este artículo se muestra cómo proceder para realizar un diseño completo de un pulsioxímetro utilizando únicamente, junto con el DP, los dos LEDs, el PD, dos resistencias y un condensador, sin módulos analógicos complejos. En la práctica que implementará el estudiante, se utiliza una FPGA como DP, procurando que el diseño digital programado en este dispositivo sea lo más simple posible. Para conseguir esto se recurre a la realización externa, en un ordenador auxiliar, del cálculo de las operaciones aritméticas complejas necesarias (cuya implementación puede también estar fuera de la compresión del estudiante) utilizando el software Matlab, con el que también se visualizan los resultados. El estudiante implementa en la práctica la gestión de las comunicaciones de datos entre FPGA y ordenador, a través de un puerto serie.

II. Descripción de la Arquitectura

El diseño propuesto, que sustituye a los mostrados en la Fig. 1, se ilustra en la Fig. 2.

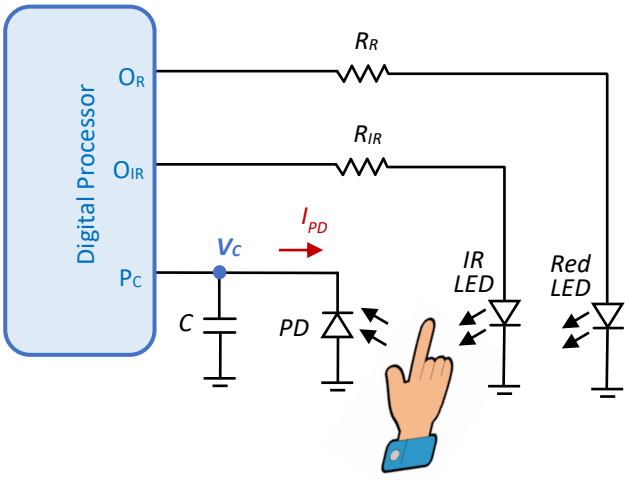


Fig. 2. Hardware del pulsioxímetro.

El funcionamiento del nuevo circuito requiere que los pines O_R y O_{IR} sean pines de salida, mientras que el pin P_C debe ser un pin bidireccional que presente un estado de alta impedancia, HZ, cuando es configurado como entrada. A continuación se explican los distintos pasos que se necesitan para construir los fotopletismogramas de luz roja e infrarroja utilizados en la obtención de HR y SpO_2.

En un primer paso se configura el pin P_C como salida proporcionando un '1' lógico. Esto carga al condensador, *C*, a la máxima tensión posible, llamémosla V_{DD}. Así, durante todo el proceso de carga PD está polarizado en inversa. Simultáneamente, los pines O_R y O_{IR} generan un '0' lógico a su salida, de forma que los LEDs no emiten luz evitando que PD reste corriente en el proceso de carga de *C*. A este primer paso lo denominaremos CARGA.

A continuación, se lleva a cabo un segundo paso para generar el pletismograma rojo, DESCARGA_RED, que consiste en proporcionar un '1' a través de O_R (manteniendo el '0' en O_{IR}) y, simultáneamente, configurar P_C como entrada (lo que evita que el pin pueda descargar a *C* al estar en estado HZ). En esta situación, la luz roja reflejada a través del dedo es recibida por PD, generando la intensidad I_{PD} que descarga

al condensador. Así, desde el comienzo de este segundo paso la FPGA recibe un '1' a través de P_C. Sin embargo, debido a la descarga que se está realizando, llegará un momento en el que el pin P_C detectará un cambio a '0' en la entrada. Esto sucederá cuando V_C en la Fig. 2 alcance una determinada tensión umbral, V_{TL}, es el denominado *instante de disparo*. La duración del intervalo que va desde que comienza DESCARGA_RED hasta la detección del '0', T_{Red}, será medida por la FPGA en número de ciclos de su reloj interno. Como T_{Red} depende de I_{PD}, su valor depende de la intensidad luminosa recibida. El fotopletismograma rojo estará formado por las medidas T_{Red}.

Para generar el fotopletismograma infrarrojo se llevan a cabo también dos pasos, repitiendo el proceso de CARGA, y realizando un segundo paso, denominado DESCARGA_IR, similar a DESCARGA_RED pero con O_R = '0' y con O_{IR} = '1'. El intervalo de tiempo de descarga medido en este paso será T_{IR}. En la Fig. 3 se muestra la sucesión de pasos para generar ambos fotopletismogramas, así como el estado de los pines y cuándo se obtienen las medidas.

Los fotopletismogramas son obtenidos de una forma entrelazada, de manera que a cada valor obtenido de T_{Red}, sigue uno de T_{IR} (realmente el orden de DESCARGA_RED y DESCARGA_IR es indiferente).

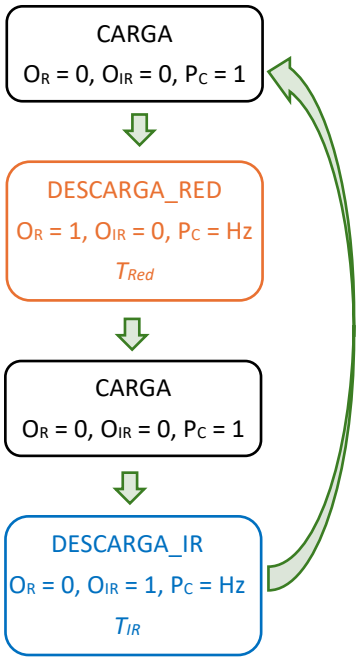


Fig. 3. Pasos para la obtención del fotopletismograma.

A. *Cálculo de HR y SpO₂*

En los oxímetros de pulso convencionales, los cálculos de HR y SpO2 se obtienen a partir de los picos y valles de I_{PD}, calculados para tanto para los fotopletismogramas rojo como infrarrojo. Por otro lado, en [8] se demuestra como los tiempos T_{IR} y T_{Red} son inversamente proporcionales a I_{PD}. Si llamamos a ambos tiempos de forma genérica T_M

$$T_M \approx C\frac{V_{DD}-V_{TL}}{I_{PD}} \tag{1}$$

Esto también significa que los picos y valles de I_{PD} ocurren en los mismos instantes que los valles y picos de T_M. Así, se pueden calcular en el nuevo diseño HR y SpO_2 de una forma análoga a como se hace en los pulsioxímetros convencionales pero, utilizando los fotopletismogramas formados con las medidas temporales.

Para calcular HR se utilizará el fotopletismograma infrarrojo tomando los picos i y $i + n$, siendo n un número entero seleccionado por el diseñador para reducir la variabilidad en HR. Si llamamos a estos picos $T_{IR}(peak_i)$ y $T_{IR}(peak_{i+n})$, entonces

$$HR = \frac{60 \cdot n}{T_{IR}(peak_i) - T_{IR}(peak_{i+n})} \tag{2}$$

Para calcular SpO_2 se emplean los ratios de perfusión de cada fotopletismograma, P_{Red} y P_{IR}, que también son calculados utilizando los picos y valles de los fotopletismogramas. Así, por ejemplo, P_{Red} se calcula como

$$P_{Red} = \frac{T_{Red}(peak) - T_{Red}(trough)}{T_{Red}(peak)} \tag{3}$$

siendo $T_{Red}(trough)$ el valle que sigue a un pico en el fotopletismograma rojo. De forma similar se halla P_{IR}.

$$P_{IR} = \frac{T_{IR}(peak) - T_{IR}(trough)}{T_{IR}(peak)} \tag{4}$$

P_{Red} y P_{IR} se utilizan para generar el ratio de absorción normalizado, R

$$R = \frac{P_{Red}}{P_{IR}} \tag{5}$$

que se emplea en la conocida ecuación para determinar SpO_2 [12]

$$SpO_2 = 110 - 25 \cdot R \tag{6}$$

Los valores T_{Red} y T_{IR} son transferidos al ordenador de forma continua, inmediatamente después de ser adquiridos por la FPGA, de manera que, las operaciones aritméticas (2)-(6) serán realizadas en el ordenador auxiliar utilizando el software Matlab. A diferencia de esta filosofía, que permite un diseño más simple en la FPGA, en [8] todas las operaciones aritméticas son realizadas dentro de la propia FPGA.

III. Hardware Utilizado y Resultados Experimentales

Para la implementación de la práctica se ha seleccionado una placa comercial, Digilent CMOD A7 (Pullman, Washington), que incorpora una FPGA de AMD: Artix 7 XC7A35T. Esta selección se ha llevado a cabo con criterios de disponibilidad y precio, como para el resto de componentes del diseño. Además, la CMOD A7 es una placa de circuito impreso del tipo protoboard, lo que facilita su uso por los estudiantes en el laboratorio.

Los LEDs y el fotodetector están en un único dispositivo, SFH7072 de OSRAM (Berkshire, UK), que se conecta de forma cableada a la protoboard.

Los pines de la FPGA utilizados en el diseño se han configurado de manera que V_{DD} = 3.3 V, siendo accesibles directamente desde de la protoboard. Las características de salida de estos pines, junto con las resistencias R_R y R_{IR} de la Fig. 2 ($R_R = R_{IR}$ = 330 Ω), hacen posible las funciones de O_R y O_{IR}, proporcionando la corriente necesaria para el

"encendido" de los LEDs (suministrando aproximadamente 4 mA).

Para poder adquirir con la suficiente resolución las características dinámicas de los fotopletismogramas se ha seleccionado C = 1 nF. Esta elección proporciona valores de T_{Red} y T_{IR} de unas pocas décimas de milisegundo.

Como la frecuencia del reloj interno de la FPGA se ha elegido a 100 MHz, los valores de T_{Red} y T_{IR} se incrementan cada 10 ns. Teniendo en cuenta la duración de estos tiempos, los errores debido a su cuantificación en ciclos de reloj son muy pequeños.

En la CMOD A7, la FPGA está conectada a un chip que controla las comunicaciones entre la protoboard y los puertos serie del ordenador, el FT2232HQ, que en nuestro caso únicamente hace las veces de buffer de comunicaciones. La FPGA trasmite, mediante el protocolo estándar serie UART, los valores de T_{Red} y T_{IR} a este circuito integrado, utilizando para ello una única línea cableada.

La arquitectura programada en la FPGA se muestra en la Fig. 4, constado únicamente de 3 módulos: *16-bit Ring Counter, Control Unit* y el *UART Port Unit*. A continuación describimos las funciones que realiza cada uno de estos módulos.

a) 16-bit Ring Counter: Es un contador circular de 16 bits que está permanentemente funcionando, e incluye dos señales de salida: **EOC** que indica que el contandor ha alcanzado el valor máximo con un '1' (el resto del tiempo está a '0') y **Count** que indica el valor de la cuenta. Como el valor máximo de cuenta es 65535, puede medir intervalos de tiempo de hasta 0.65 ms, límite suficiente para los valores de T_{Red} *y* T_{IR} (el máximo valor obtenido para estos tiempos es del orden de los 540 µs).

b) Control Unit: Es una máquina de estados que lleva a cabo la transición entre los distintos pasos de la Fig. 3. Cada vez que **EOC** = '1' *Control Unit* avanza de paso, en el sentido indicado en la Fig. 3 y colocando los pines en la configuración adecuada para cada paso. Si *Control Unit* se encuentra en los estados DESCARGA_RED o DESCARGA_IR, cuando se detecta P_C = '0' se procede a cargar el contenido del contador **Count** (valores de T_{IR} o T_{Red}) en la *UART Port Unit* y ordena su transmisión. La carga del valor de la cuenta se realiza poniendo a '1' la señal **Load** de la Fig. 4. Para simplificar el diseño, los estados de descarga y carga de C tienen igual duración: la máxima que permite el contador. Por lo tanto, la frecuencia de muestreo de datos es de 765 Hz. Sin embargo, T_{Red} *y* T_{IR} se obtienen de forma entrelazada y, por lo tanto, se obtienen con una frecuencia que es la mitad, 382.5 Hz. Como se ilustrará más adelante esta frecuencia es más que suficiente para mostrar con un elevado nivel de detalle los fotopletismogramas.

c) UART Port Unit: Este módulo se encarga de la transmisión de T_{IR} y T_{Red} al buffer FT2232HQ usando un protocolo estándar UART. El FT2232HQ siempre que recibe un dato lo transmite inmediatamente al ordenador. Por lo tanto el puerto serie del ordenador tienen que estar configurado para una frecuencia de comunicación mayor a 16-bits x 765 Hz = 12.24 KHz.

Como se observa en la Fig. 4, la arquitectura de la FPGA es muy simple y puede ser fácilmente programada por alumnos de cursos básicos de asignaturas de Electrónica Digital, tanto usando herramientas de diseño de máquinas de estado, como lenguaje VHDL. La TABLA I muestra los porcentajes de recursos usados de la FPGA, confirmando la simplicidad del diseño. Solo se utiliza un bloque de generación de reloj, MMCM, y del resto de recursos, los más utilizado son los buffers globales, BUFG, con el 6.25% del total. La lógica combinacional y los biestables, LUTs y FFs, apenas son usados en algo más del 0.5%.

En la Fig. 5 se muestra un ejemplo de pletismograma generado por Matlab con los datos proporcionados por la FPGA. A pesar de la simplicidad del diseño, los fotopletismogramas infrarrojos, Fig. 5 (a), y rojos, Fig. 5 (b), muestran un evado nivel de detalle tanto en el eje de amplitud como en el de tiempo. También se observa claramente la evolución de los niveles basales de las señales.

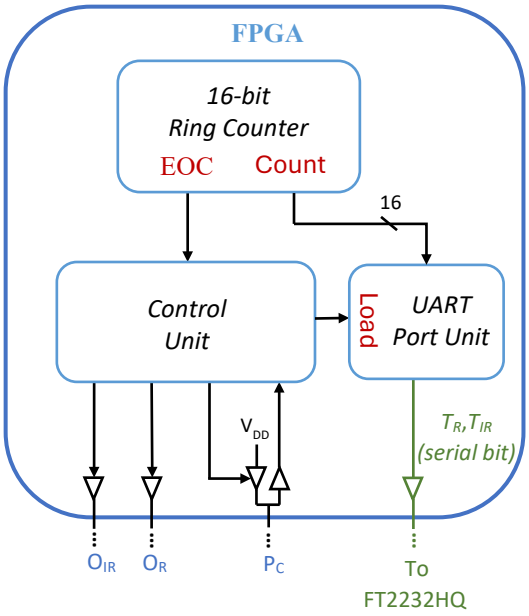
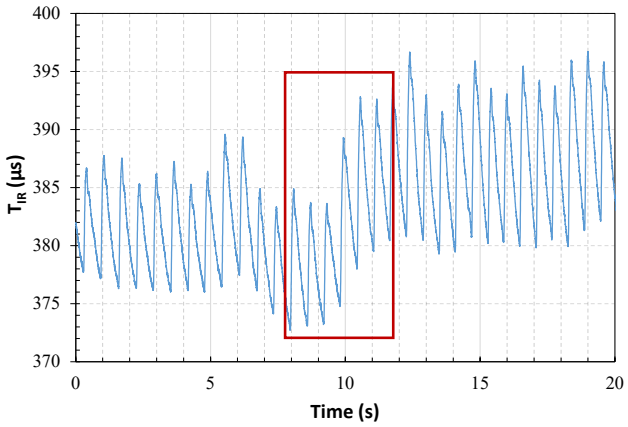


Fig. 4. Estructura programada en la FPGA.

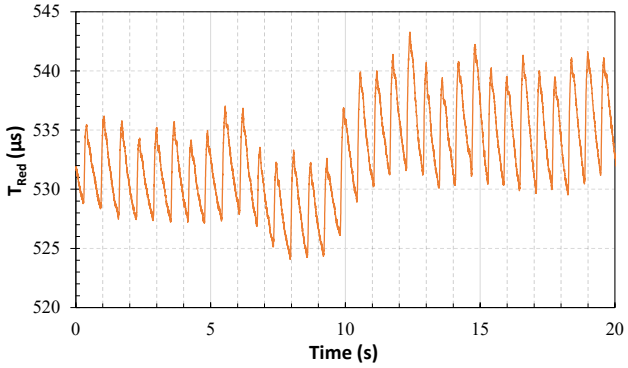
TABLA I. UTILIZACIÓN DE RECURSOS EN LA FPGA

Recursos FPGA	Utilización N.º Elementos	Disponibles	Utilización %
LUT	118	20800	0.57
FF	220	41600	0.53
IO	5	106	4.72
BUFG	2	32	6.25
MMCM	1	5	20

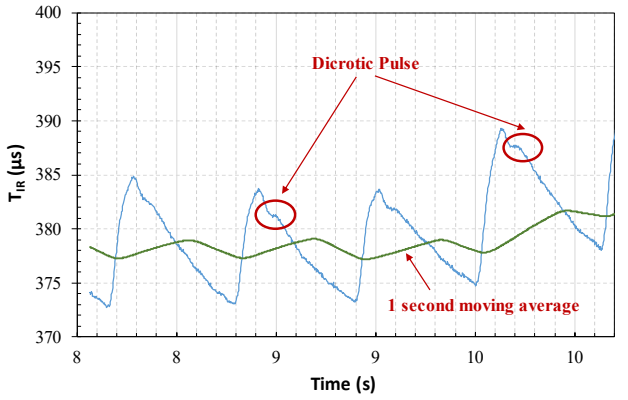
Para evaluar el nivel de detalle, la parte de la señal incluida en el cuadro rojo de la Fig. 5 (a) se ha amplificado en la Fig. 5 (c). En esta última figura se aprecian claramente los picos y valles dicróticos (no confundir con los picos y valles de la señal, usados para el cálculo de HR y SpO_2). Estos picos y valles dicróticos proporcionan importante información de uso clínico (por ejemplo, el cálculo del *Índice de Rigidez Arterial*). Es de destacar que la información dicrótica raramente está disponible en pulsioxímetros comerciales. La Fig. 5 (c) también muestra en verde la media de 1 s utilizada en los cálculos de HR y SpO_2.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Fotopletismogramas obtenidos. (a) Fotopletismograma infrarrojo. (b) Fotopletismograma rojo. (c) Detalle del fotopletismograma IR mostrando las características dicróticas de la señal. También se muestra la media de 1 s utilizada para detección de picos y valles (verde).

Determinar los picos y valles requiere la detección de los cruces hacia arriba y hacia abajo de T_M con la media de 1 s. Los picos serán los máximos de T_M entre un cruce hacia arriba y el siguiente hacia abajo. Los valles serán los mínimos entre un cruce hacia abajo y el siguiente hacia arriba.

Para la determinación de HR se utiliza (2) con n = 10, lo que produce un buen balance entre estabilidad y velocidad de seguimiento de los cambios en el parámetro.

IV. Conclusiones

Se ha presentado el diseño de un pulsioxímetro en cuyo diseño no se han utilizado elementos complejos de electrónica analógica. Eso permite diseñar y utilizar el pulsioxímetro en una práctica de una asignatura de Electrónica Digital Básica en la que normalmente el alumnado no tiene conocimientos de Electrónica Analógica. La práctica se complementa con el uso de un ordenador auxiliar y el software Matlab que realiza los cálculos aritméticos más complicados necesarios para el cálculo de la frecuencia cardíaca, HR, y de la saturación de oxígeno en sangre, SpO_2. El diseño se implementa en una FPGA usada como procesador digital. La simplicidad del diseño se observa en unos porcentajes mínimos de uso de los recursos totales de la FPGA.

Referencias

[1] M. Alhawari, N. A. Albelooshi, and M. H. Perrott, “A 0.5 v CMOS light-to-digital converter based on a nonuniform quantizer for a photoplethysmographic heart-rate sensor,” IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 49, no. 1, pp. 271–288, 2014.

[2] E. M. G. Rodrigues, R. Godina, C. M. P. Cabrita, and J. P. S. Catalão, “Experimental low cost reflective type oximeter for wearable health systems,” Biomed. Signal Process. Control, vol. 31, pp. 419–433, 2017.

[3] B. Lin, Z. Ma, M. Atef, L. Ying, and G. Wang, “Low-Power High-Sensitivity Photoplethysmography Sensor for Wearable Health Monitoring System,” IEEE Sens. J., vol. 21, no. 14, pp. 16141–16151, 2021.

[4] K. N. Glaros and E. M. Drakakis, “A Sub-mW fully-integrated pulse oximeter front-end,” IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst., vol. 7, no. 3, pp. 363–375, 2013.

[5] S. V. Gubbi and B. Amrutur, “Adaptive pulse width control and sampling for low power pulse oximetry,” IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst., vol. 9, no. 2, pp. 272–283, 2015.

[6] F. Tang et al., “A Noise-Reduced Light-to-Frequency Converter for Sub-0.1% Perfusion Index Blood SpO2Sensing,” IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst., vol. 14, no. 5, pp. 931–941, 2020.

[7] G. Di Patrizio Stanchieri, A. De Marcelli, M. Faccio, E. Palange, and U. Guler, “A New Light-to-Frequency Analog Front-End Circuit for Optical Sensing in Biomedical Applications,” BioCAS 2021 - IEEE Biomed. Circuits Syst. Conf. Proc., pp. 21–25, 2021.

[8] J. A. Hidalgo-López, “A Simple Front-End for Pulse Oximeters With a Direct Light-to-Time-to-Digital Interface Circuit,” IEEE Sens. J., 2023.

[9] J. A. Hidalgo-López, “A simple interface circuit for digital readout of lossy capacitive sensors,” Measurement, vol. 221, p. 113512, 2023.

[10] J. A. Hidalgo-López, “Direct interface circuits for resistive sensors affected by lead wire resistances,” Measurement, vol. 218, p. 113250, 2023.

[11] J. A. Hidalgo-López, “A Simple Method for a Digital Readout of Randles Impedances,” IEEE Trans. Instrum. Meas., 2024.

[12] Webster J., Design of Pulse Oximeters. Boca Raton, FL, USA, 1997.

Aprendizaje basado en la simulación de dispositivos eléctricos y magnéticos: Una experiencia de aprendizaje basada en proyectos

I. Lope
Dept. de Física Aplicada
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, 50009, España
nlope@unizar.es

C. Carretero
Dept. de Física Aplicada
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, 50009, España
ccar@unizar.es

J. Acero
Dept de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, 50018, España
jacero@unizar.es

J.P. Martinez
Dept. de Física Aplicada
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, 50009, España
jpmartin@unizar.es

***Resumen*— Las simulaciones se han convertido en una técnica educativa cada vez más popular en los cursos universitarios. Proporcionan una representación gráfica de conceptos abstractos, lo que facilita su comprensión por parte de los estudiantes. Además, ofrecen un alto grado de interactividad, permitiendo a los estudiantes modificar parámetros y analizar sus efectos. Esta metodología cobra especial relevancia en la aplicación de la simulación por elementos finitos a dispositivos eléctricos y magnéticos, como condensadores e inductancias. Esto se debe a su capacidad de cálculo preciso, que se traduce en unos costes de cálculo razonables. Este artículo presenta los resultados de un caso práctico de aprendizaje basado en proyectos (ABP). Los estudiantes tuvieron libertad para seleccionar su tema y emplear la simulación por elementos finitos con COMSOL® para analizarlo. Los principales resultados de este proceso de enseñanza-aprendizaje indicaron una mejora de los resultados del aprendizaje y de las habilidades analíticas basadas en el modelado computacional.**

Palabras clave- Aprendizaje basado en proyectos, análisis de elementos finitos, condensadores, dispositivos magnéticos.

I. INTRODUCCIÓN

Los estudiantes de disciplinas científicas, como física, matemáticas, química y, sustancialmente, todas las ingenierías, están acostumbrados a relacionar experimentos con conceptos teóricos durante su proceso de aprendizaje. Con este fin, la mayoría de las asignaturas de nivel universitario incluyen, en cierta medida, actividades experimentales combinadas con las clases teóricas para reforzar y validar algunos de los principales conceptos teóricos. Estas demostraciones suelen estar restringidas, tanto desde el punto de vista teórico a casos sencillos que permitan soluciones analíticas, como desde el punto de vista experimental a montajes factibles.

Sin embargo, el enorme avance de las tecnologías informáticas implica que la simulación numérica aparezca como una interesante herramienta en el proceso de aprendizaje de las denominadas titulaciones científicas [1]. En consecuencia, las actividades de simulación pueden considerarse la tercera piedra angular junto con las clases teóricas y las prácticas de laboratorio. Las herramientas de simulación permiten ampliar la aplicación y visualización de los conceptos teóricos a configuraciones más complejas que las que permiten soluciones analíticas. La imposibilidad de poner en práctica determinados experimentos también puede superarse mediante el uso de herramientas numéricas. Además, estas herramientas pueden permitir un análisis más profundo de las actividades experimentales.

Aparte de los beneficios de la simulación en el proceso de aprendizaje, una de las funciones más demandadas en el área científica es el uso de métodos numéricos para predecir el comportamiento de diferentes tipos de sistemas. Esta demanda aparece tanto en las actividades de investigación y desarrollo, como en los ámbitos académico e industrial. En consecuencia, el uso de herramientas de simulación numérica aparece claramente como beneficioso y esencial para ser adquirido por los estudiantes de carreras científicas. [2].

Existen varias formas de introducir la metodología de simulación a un estudiante de posgrado. Estas herramientas de simulación pueden clasificarse en dos tipos generales en función del nivel de programación exigido a los estudiantes. Así, la primera opción corresponde a las herramientas de simulación que requieren la implementación de líneas de codificación por parte del alumno [3]. Por otra parte, las interfaces de alto nivel pueden utilizarse para simular computacionalmente configuraciones interesantes para los alumnos [4].

En cuanto a los métodos que exigen líneas de código, una herramienta popular en el ámbito científico es Visual Phyton, que permite describir múltiples experimentos con unas pocas líneas de código [5]-[6]. Un ejemplo de entorno de simulación basado en Phyton es Ubermag, dedicado a la simulación de materiales micromagnéticos [7]. Se pueden encontrar aplicaciones similares utilizando otros lenguajes de programación, p.ej. MATLAB [8]-[9] o Mathematica [10].

Por otro lado, el uso de software de simulación de propósito general con interfaces de alto nivel también es realmente útil para analizar múltiples experimentos y conceptos teóricos en el ámbito científico [11]-[13]. Estos programas se basan en métodos de elementos finitos para resolver las ecuaciones pertinentes, incluidas las condiciones de contorno y las restricciones del sistema. Por lo tanto, estas herramientas tienen un gran potencial para fines educativos. Entre otras muchas, una herramienta comercial muy popular es COMSOL Multiphysics, que se ha aplicado recientemente con fines educativos [14]-[15]. Sin pretender ser exhaustivos, otras plataformas similares son Ansys, Abacus y QuickField. Además, también existen herramientas de elementos finitos de software libre, por ejemplo ONELAB [16].

La integración de la modelización computacional no está plenamente integrada como parte de la mayoría de las titulaciones científicas, por lo que la integración en las asignaturas se aborda muchas veces mediante ejercicios computacionales específicos, que resultan adecuados en

Este trabajo ha sido financiado en parte por los proyectos PID2022-136621OB-I00 y CPP2021-008938 cofinanciados por el MICIU/AEI/10.13039/501100011033, por «ERDF A way of making Europe», por la «European Union NextGenerationEU/PRTR», por la Universidad de Zaragoza PIIDUZ 23 4869 y por la DGA-FSE.

cursos introductorios centrados en las habilidades de programación. [17]. También es común el desarrollo de prácticas informáticas que incluyan contenidos computacionales, como parte de las actividades de laboratorio combinadas con mediciones experimentales [14]. Además, se puede proponer al estudiante un proyecto práctico optativo como actividad no obligatoria.

Los autores presentaron en la anterior edición de la conferencia TAEE una experiencia previa de aplicación de la simulación por elementos finitos combinada con actividades prácticas [14]. Proponemos la realización de un proyecto de simulación electromagnética, a elección del alumno. Nuestra propuesta se basa en la experiencia previa, y proporcionaremos instrucción sobre la aplicación del método de los elementos finitos mediante el uso de la herramienta de simulación COMSOL Multiphysics®.

II. Descripción del Tema

La actividad propuesta se ha encuadrado en la asignatura de Electromagnetismo, asignatura obligatoria dentro del programa del Grado en Física que se imparte en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza [18]. El Grado se desarrolla en cuatro años con un total de 240 ECTS, distribuidos en 4 cursos anuales. Este grado se centra en capacitar al estudiante para aplicar los principios físicos fundamentales desde una perspectiva teórica y práctica. Uno de los objetivos principales es, por tanto, introducir al alumno en el uso de las herramientas informáticas avanzadas necesarias para realizar cálculos, modelizaciones y procesado de datos. Por ello, la inclusión de la metodología de simulación en los resultados del grado de Física resulta plenamente beneficiosa para que el alumno adquiera las competencias pertinentes.

Una vez esbozado el Grado en Física de la Universidad de Zaragoza, nos centramos en la asignatura en la que se enmarca este trabajo: Electromagnetismo correspondiente al módulo de Física Clásica. Los contenidos de la asignatura se despliegan de forma similar al desarrollo histórico del Electromagnetismo en los siguientes cuatro contenidos principales: Electrostática, Magnetostática, Inducción Electromagnética y una introducción a las ondas electromagnéticas.

En particular, el curso de Electromagnetismo tiene asignados 8 ECTs (Transferencia de Créditos Europeos). Este número de ECTs define la carga de trabajo total del estudiante como igual a 200 horas. Estas ECTs se distribuyen según la guía docente en 80 horas presenciales (clases y laboratorios) y 120 horas de trabajo individual para la preparación de los trabajos, incluyendo exámenes, informes de laboratorio y proyectos prácticos opcionales [19]. El proyecto propuesto, centrado en la metodología de simulación, debe tener una duración total de 20 horas, incluidos los seminarios.

A continuación, se exponen algunos de los principales resultados de aprendizaje derivados. Cálculo del campo electrostático generado por un sistema de conductores, evaluación de la capacitancia dieléctrica, obtención del campo magnético debido a corrientes estacionarias, cálculo de la corriente inducida en presencia de un campo magnético variable y evaluación del campo electromagnético creado por sistemas sencillos.

III. Organización de la Actividad y Resultados de Aprendizaje

Como se ha comentado, la actividad propuesta corresponde a un proyecto práctico optativo ofertado a los alumnos de la asignatura de Electromagnetismo. Esta asignatura está orientada a la comprensión de los fenómenos relacionados con los campos eléctricos y magnéticos según tres enfoques físicos principales: electrostático, magnetostático y electromagnético con campos variables en el tiempo. El propósito de la actividad es reforzar los resultados básicos del aprendizaje integrando el modelado computacional en el proceso de aprendizaje. Esta actividad es apropiada para utilizar metodologías de enseñanza basadas en clases cortas, seminarios, talleres prácticos y aprendizaje basado en proyectos (ABP).

Teniendo en cuenta el contexto de la titulación, el marco temático y en relación con la enseñanza de las simulaciones numéricas, se consideraron los siguientes aspectos esenciales para la concepción de la actividad docente:

- Establecer los fundamentos de la metodología de simulación, independientemente de la herramienta empleada.
- Relacionar la actividad de simulación con los resultados básicos de aprendizaje abordados en las clases teóricas y de ejercicios, así como en las sesiones de laboratorio.
- Un enfoque centrado en ampliar la aplicación de los supuestos teóricos a sistemas más complejos gracias a herramientas numéricas.
- Introducir al alumno en las características de los datos numéricos, experimentales y analíticos.

Por consiguiente, se definen los siguientes resultados de aprendizaje previstos:

RA_1: Demostrar soltura con la metodología de simulación basada en herramientas numéricas de elementos finitos.

RA_2: Demostrar la comprensión de la metodología de simulación mediante el desarrollo del modelado numérico de un sistema electromagnético arbitrario.

RA_3: Capacidad para analizar e interpretar los datos de la simulación aplicando las herramientas de visualización y cálculo que ofrece el programa de simulación.

RA_4: Capacidad de aplicar la técnica de simulación para ampliar el análisis electromagnético a un sistema más complejo.

RA_5: Demostrar buenas dotes de comunicación diseñando una breve presentación del proyecto y realizando una exposición oral.

TABLA I. DISTRIBUCIÓN DE LA ASISTENCIA A LAS ACTIVIDADES

Descripción Actividad	Resultados Aprendizaje	Horas	Clase
Introducción simulación	RA_1	1.0	Magistral
Seminarios simulación electromagnética	RA_1, RA_2	5.0	Seminario
Definición del proyecto de simulación	RA_2	1.0	Tutoría
Taller de modelización electromagnética	RA_2, RA_3, RA_4, RA_5	5.0	Taller
Documentación y presentación oral	RA_4, RA_5	1.0	Evaluación

Las actividades propuestas comienzan con una única clase en la que se exponen los fundamentos de la metodología de simulación y la propuesta de proyecto opcional. los alumnos participan en seminarios informáticos con un profesor guía para desarrollar un modelo electromagnético completo. A esto le sigue una sesión de tutoría para discutir el proyecto electromagnético a realizar. A continuación, se proponen talleres informáticos prácticos con asistencia del profesor para realizar proyectos de simulación electromagnética, incluyendo una breve presentación oral enmarcada dentro de un enfoque PBL. La distribución de la asistencia propuesta para la actividad de aprendizaje se muestra en TABLA I. Donde se detallan los resultados de aprendizaje relacionados, las horas dedicadas a cada actividad y la clasificación de la actividad. La descripción y el contenido de cada actividad se presentan con más detalle en la próxima sección..

IV. DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD

A. Clase Magistral

La presente actividad formativa presenta dos características importantes a tener en cuenta. En primer lugar, esta actividad es una actividad optativa que se ofrece a los alumnos, y aunque, su realización puede afectar positivamente a la calificación final, no resulta ni obligatoria para aprobar la asignatura ni necesaria para obtener la máxima calificación. En segundo lugar, como el propósito de esta actividad es complementar los resultados de aprendizaje mediante la incorporación de la metodología de simulación, por lo tanto, esta actividad se centra en los conceptos prácticos informáticos de modelado electromagnético numérico.

Dado que esta actividad es optativa y eminentemente práctica, así como restringida a 20 horas, se ha realizado una única sesión lectiva introductoria. Esta charla se imparte a todos los alumnos matriculados de la asignatura de Electromagnetismo y está dedicada a presentar los fundamentos de la herramienta de simulación electromagnética y a describir las principales características del trabajo práctico propuesto como actividad complementaria.

Además, se detallan los tres pasos de la experiencia educativa y se muestra a los alumnos la carga de trabajo estimada. En primer lugar, se ofrecen seminarios informáticos basados en ejemplos funcionales con una duración total de 5 horas para conseguir cierta soltura en el manejo de un programa de simulación basado en elementos finitos. En el siguiente paso, también se ofrece la posibilidad de la realización de su proyecto de simulación electromagnética incluyendo la asistencia del profesor en los seminarios informáticos. Por último, se aclara a los alumnos el método de informe final basado en una presentación oral. También se transmite a los alumnos que la actividad total de trabajo se limita a 20 horas. Tras la presentación del calendario de seminarios prácticos, se invita a los alumnos de las aulas de mañana y tarde a inscribirse en los seminarios de cálculo compatibles con sus clases regulares. Finalmente, se inscribieron 26 alumnos de los 90 alumnos de primera matrícula.

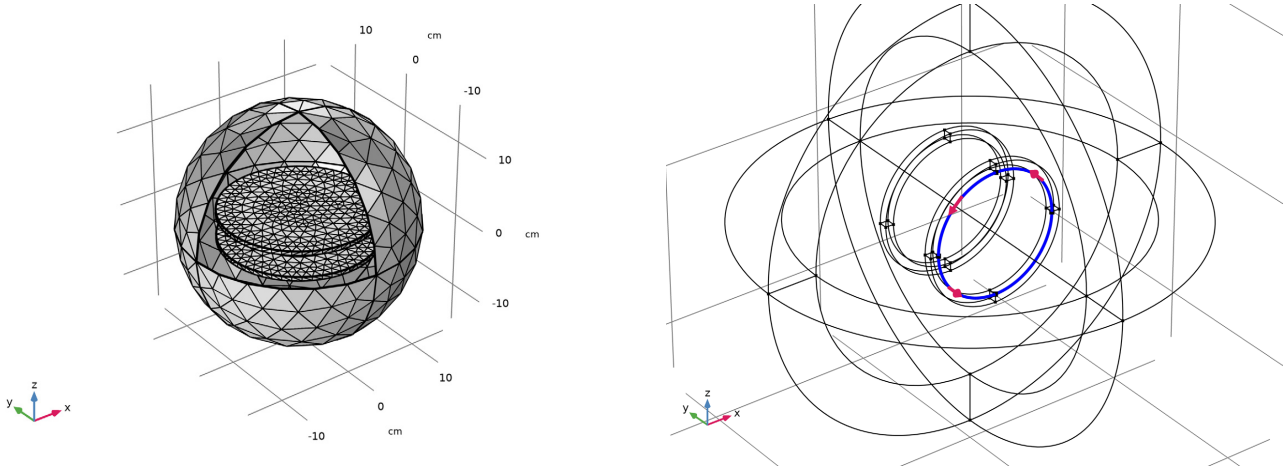
B. Seminarios de Simulación

Las herramientas del método basado en elementos finitos (MEF, denominado FEM por sus siglas en inglés) se aplican ampliamente en distintos campos de la física, como la termodinámica, la mecánica y, entre otros, el electromagnetismo. Los investigadores y profesionales con conocimientos de estas herramientas de simulación están muy solicitados. Existen múltiples herramientas comerciales de simulación que ofrecen buenas prestaciones en la resolución de las ecuaciones involucradas en el electromagnetismo. En este curso se utiliza un software de interfaz de alto nivel, concretamente COMSOL Multiphysics [20].

El manejo de estas herramientas exige un proceso de aprendizaje para ganar soltura tanto con la interfaz como con el procedimiento de simulación. Para ello se dispone de múltiples tutoriales, demos y documentación sobre el uso de esta herramienta comercial. Precisamente, el programa de simulación presenta una librería de aplicaciones para iniciarse en el trabajo de simulación. En los múltiples ejemplos proporcionados, se puede descargar el modelo tutorial y las instrucciones pertinentes que lo acompañan, en las que se describe detalladamente la construcción del modelo. Estos ejemplos también ofrecen interesantes perspectivas físicas para iniciarse en la simulación por elementos finitos.

Como parte del plan de estudios del curso, hemos introducido 5 horas de clases prácticas de seminario en una sala informática distribuidas a lo largo de una sola semana sin interferir con las clases regulares de los estudiantes. Durante estas horas de seminario, los estudiantes se inician en la herramienta de simulación construyendo su modelo electromagnético en el ordenador partiendo de cero. [14].

Durante estas horas de seminario, el profesor guía a los estudiantes en la implementación del modelo de simulación. Como el modelo MEF desarrollado se basa en las instrucciones documentadas por el fabricante, se fomenta el proceso de aprendizaje autónomo por parte de los alumnos. Para no limitarse al contenido del ejemplo de la biblioteca, el modelo del profesor se proyecta en una pantalla para mostrar otras posibilidades de la herramienta de simulación, así como para hacer hincapié en conceptos de simulación interesantes que no se mencionan en el ejemplo. Por ejemplo, el impacto de la malla en el proceso computacional y la comparación entre valores analíticos y simulados son abordados por los alumnos siguiendo el modelo del profesor. Nótese que la proyección en pantalla permite a los alumnos seguir fácilmente el desarrollo del modelo. Como consecuencia, los estudiantes realizan paso a paso el flujo de trabajo de modelado completo, ya esbozado en la clase introductoria, de una herramienta de simulación basada en métodos numéricos.



(a) (b)

Fig. 1. Modelos de aplicación de COMSOL Multiphysics 6.0 utilizados en seminarios. (a) Cálculo del efecto de los campos marginales en un condensador [21]. (b) Campo magnético de bobina de Helhholtz [22].

TABLA II. RESUMEN DE LAS LÍNEAS DE TRABAJO DE LOS PROYECTOS DE LOS ESTUDIANTES

Línea de Trabajo	Electrostática	Magnetostática	Inducción
Mejora modelos base	0	0	1
Modelos ejemplos de librería	0	1	1
Replicación laboratorio	1	0	0
Simplificación 2D	0	0	0
Problemas Electromagnetismo	4	0	0
Teoría Electromagnetismo	1	2	0
Otros sistemas propuestos	0	2	1

Teniendo en cuenta el refuerzo de los resultados de aprendizaje del curso de Electromagnetismo, así como para ilustrar fácilmente al alumno las ventajas de la simulación, sería beneficioso seleccionar configuraciones ya tratadas en las clases teóricas y en las sesiones de laboratorio.

Además, para estar alineados con la distribución temporal de los contenidos de la asignatura según el temario, las aproximaciones físicas preferentes a considerar son la electrostática y la magnetostática. Por ello, se han seleccionado los siguientes modelos de aplicación: Cálculo del efecto de los campos dispersivos de un condensador [21], Fig. 1(a), y el campo magnético de bobinas de Helmholtz [22], Fig. 1(b).

C. Definición del Proyecto de Simulción

Una vez finalizada la primera etapa de esta actividad de aprendizaje correspondiente a los seminarios de informática, en la que se introduce a los alumnos en la herramienta de simulación mediante la construcción de un modelo de simulación guiada, se procede a comenzar con la segunda etapa, relativa a la realización de un proyecto electromagnético completo. Teniendo en cuenta que esta actividad de aprendizaje es optativa, un paso esencial es la definición del contenido y alcance del proyecto a los alumnos que estén interesados en continuar.

Como la decisión del propio proyecto electromagnético puede resultar abrumadora para muchos alumnos, se realiza una breve reunión de presentación de posibles líneas de trabajo. En esta reunión se propusieron a los alumnos las siguientes líneas de trabajo:

- Mejoras y análisis de los modelos de base.
- Ejemplos de librería.
- Replicación de las prácticas de laboratorio.
- Simplificación 2D. Electromagnetismo.
- Ejercicios teoría y problemas de Electromagnetismo.
- Otros sistemas electromagnéticos

La primera línea de trabajo corresponde a un análisis más profundo de los modelos realizados durante los seminarios. También se comenta la realización de otros modelos de biblioteca de aplicaciones, de forma similar a los modelos base. También se sugiere una réplica de los montajes de laboratorio para comparar valores analíticos y experimentales. Además, como ocurre en muchos desarrollos, se propone la simplificación 2D de los modelos 3D del seminario para analizar la importancia de la simplificación en los métodos numéricos, así como por la similitud con el procedimiento de solución analítica. La opción de resolver ejercicios y analizar conceptos teóricos tratando el tema del Electromagnetismo mediante la simulación también aparece como una opción atractiva para aprovechar las herramientas numéricas, permitiendo validar las soluciones teóricas. Por último, se indica a los alumnos que también podrían simularse otros sistemas propuestos en electromagnetismo, poniendo como ejemplo una simulación de calefacción doméstica por inducción.

Las líneas de trabajo según el enfoque físico seleccionadas, en esta fase, por 14 alumnos de los 26 que realizan las 5 horas de seminarios de informática, se resumen en TABLA II. Cabe destacar que las líneas de trabajo más populares son la resolución de los ejercicios y conceptos teóricos tratados durante las clases de electrostática, y la simulación de otros sistemas sugeridos por los alumnos. Posteriormente, los alumnos acuerdan los objetivos del proyecto con el profesor durante una reunión de tutoría. En este punto, es imperativo definir objetivos factibles que

respeten la carga de trabajo permitida para evitar cualquier frustración entre los estudiantes.

D. Talleres de Simulación

La carga de trabajo para la realización del proyecto es de 12 horas, reservando 2 horas para la preparación de la documentación para la presentación oral, luego la carga de trabajo asignada para la simulación del proyecto se limita a 10 horas. Puesto que el contenido del proyecto electromagnético no es común, por lo demás, ha sido definido por cada estudiante según sus preferencias, y la realización del proyecto es planificada de manera autónoma por los estudiantes. Sin embargo, los resultados del apoyo del profesor son esenciales teniendo en cuenta la escasa fluidez adquirida en las 5 horas previas de seminario guiado. Por ello, se ha recomendado y ofrecido a los alumnos la asistencia de 5 horas de taller para avanzar con el proyecto bajo la guía del profesor. Téngase en cuenta que la cantidad total de horas de taller es el doble, es decir, 10 horas, debido a las aulas de mañana y tarde.

Los talleres se realizaron en el aula de informática, donde cada alumno trabajaba en un modelo electromagnético con el apoyo técnico del profesor. Teniendo en cuenta que muchos de los problemas surgirán durante el trabajo autónomo del alumno, se anima a los estudiantes a enviar por adelantado los posibles problemas antes de la asistencia al taller. Aunque en los talleres el profesor resuelve muchos problemas de forma individual, también pone en común la resolución de diferentes cuestiones proyectando la resolución en la pantalla. Por tanto, se favorece el debate y la colaboración entre iguales, lo que resulta beneficioso para los alumnos.

Durante estas sesiones, se anima continuamente a los alumnos a analizar los resultados de la simulación con un punto de vista crítico. Con este fin, el uso de las herramientas de visualización y cálculo del programa se muestran como imprescindibles para una mejor comprensión de los fenómenos físicos. La comprobación del correcto comportamiento de la simulación según el enfoque físico considerado gracias a la visualización de los campos electromagnéticos pertinentes ha permitido a los alumnos reforzar los resultados del aprendizaje. Además, consideraciones esenciales en una metodología de simulación, como el significado de las restricciones físicas a aplicar en el sistema y la importancia del proceso de mallado en el proceso computacional han resultado naturales para los alumnos. Cabe mencionar que la resolución de problemas de modelado electromagnético desconocidos ha supuesto un reto desde el punto de vista del profesor. Para evaluar el impacto de los talleres, se ha registrado la asistencia de los alumnos. La media de horas de asistencia a los talleres por alumno ha sido de 4,15 horas, siendo las horas previstas de 5 horas.

E. Documentación y Presentación Oral

La etapa final de esta actividad de aprendizaje corresponde a una breve presentación oral de unos 5-8 minutos de duración. Esta presentación tiene por objeto considerar una visión general del sistema electromagnético y mostrar los principales resultados obtenidos. En aras de la simplicidad, se propone que la documentación de la presentación consista en gráficos del programa de simulación. Esto permite que el alumno adquiera mayor soltura con las interesantes herramientas de visualización que proporciona el programa de simulación.

Se previó que la carga de trabajo de la preparación de la documentación fuera igual a 2 horas. Para proporcionar un apoyo final antes de la presentación oral, se ofrecieron 2 horas totales de taller a los estudiantes. El asistente al taller de documentación tuvo una asistencia media de 0,71 horas entre los 14 alumnos que iniciaron el proyecto de simulación.

Estos talleres de documentación cubren dos objetivos principales. En primer lugar, proporcionar apoyo técnico para extraer los gráficos adecuados, con especial atención a la representación de los campos electromagnéticos basada en gráficos de flechas y contornos, así como a la comparativa entre valores analíticos y simulados, y experimentales en su caso, En segundo lugar, transmitir las pautas básicas para obtener una presentación oral eficaz.

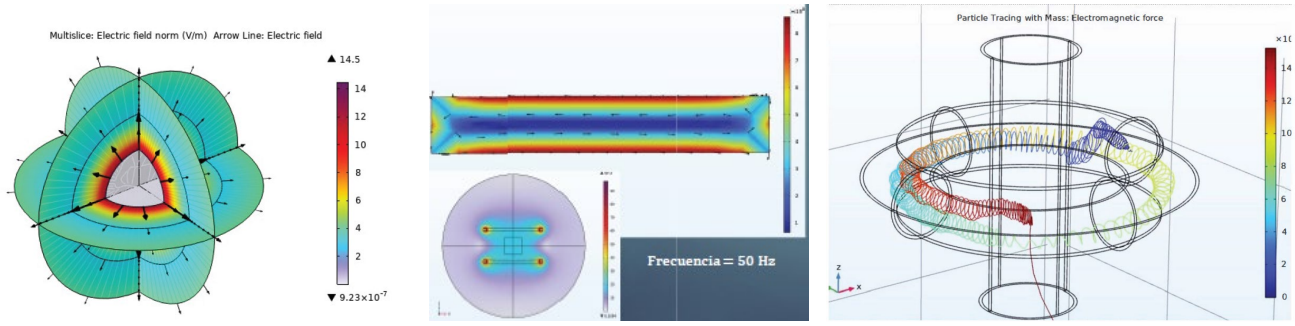
En cuanto a las presentaciones orales, se organizaron como sesiones de conferencias siguiendo un formato de conferencia técnica. Se definieron tres pistas técnicas en función del enfoque físico aplicado, a saber: electrostática, magnetostática y electromagnética de inducción. En esta conferencia de estudiantes, tanto el profesor encargado de la actividad de aprendizaje como el profesor responsable de la asignatura de Electromagnetismo actuaron como presidentes de sesión. El programa completo de la sesión técnica se envió con antelación a todos los alumnos El tiempo entre ponentes se fijó en 10 minutos, incluyendo exposición, preguntas y consideraciones de los asistentes.

Con el fin de dinamizar las ponencias de las sesiones técnicas, asistieron a la conferencia dos profesores con gran experiencia en la enseñanza de la simulación por elementos finitos. Así, además de la exposición oral, los alumnos se enfrentaron a las preguntas y consideraciones de los asistentes, lo que reforzó fuertemente sus habilidades comunicativas. Finalmente, las actas de la primera conferencia de Simulación Electromagnética de la Universidad de Zaragoza (SEMUZ 2023) con toda la documentación de la presentación fueron compartidas con todos los alumnos de la asignatura de electromagnetismo.

V. Resultados de la Actividad de Aprendizaje

Para evaluar la eficacia de la actividad de aprendizaje, se consideran métricas representativas tanto la tasa de participación en las distintas etapas como la evaluación de los cinco resultados de aprendizaje. En primer lugar, teniendo en cuenta que la actividad es opcional, la tasa de participación da una idea del interés despertado en los alumnos. Además, la tasa de abandono durante las fases de aprendizaje resulta relevante para detectar un enfoque de aprendizaje erróneo en el proceso de aprendizaje propuesto. En segundo lugar, el registro de los resultados de la evaluación de los resultados de aprendizaje es esencial para validar los objetivos definidos y seguir mejorando la metodología de aprendizaje aplicada.

Se obtiene una tasa de inscripción al seminario de alrededor del 25 % respecto al total de alumnos de la asignatura de electromagnetismo, en concreto, 27 alumnos de un total de 106 alumnos de la asignatura de Electromagnetismo. En nuestra opinión, esta tasa sugiere que la materia de la actividad despierta interés en los estudiantes. Un único abandono de 27 se ha producido respecto a los seminarios de simulación de 5 horas. Más de la mitad de los alumnos, 14 de 27, han continuado asistiendo a los seminarios para completar la actividad propuesta. Además, prácticamente todos los alumnos que han participado en los talleres han completado con éxito la actividad como ponentes en la conferencia conjunta celebrada.



(a) (b) (c)

Fig. 2. Modelos de estudiantes. (a) Esferas Conductoras. (b) Elemento metálico y bobinas de Helmholtz. (c) Confinamiento de partículas en campo magnético toroidal.

TABLA III. EVALUACIÓN RESULTADOS APRENDIZAJE, $N = 27$

Resultados Aprendizaje	Asistencia Seminarios $N = 14$	Modelo Realizado Básico $N = 2$	Incremental $N = 8$	Disruptivo $N = 3$
RA_1: Fluidez herramienta MEF	9.3	10	10.0	10.0
RA_2: Desarrollo Sistema MEF	7.5	8.0	10.0	10.0
RA_3: Interpretar Datos MEF	-	8.0	9.4	10.0
RA_4: Sistemas complejos MEF	-	-	8.0	10.0
RA_5: Habilidades Comunicación	-	8.5	9.3	9.7

En cuanto a la evaluación de los resultados de aprendizaje (RA), es evidente que el proceso de etapas alcanzado durante la actividad de aprendizaje afecta a los resultados de aprendizaje que deben evaluarse. Los resultados de la evaluación considerando la realización del grado de actividad se detallan en TABLA III. Por un lado, los estudiantes realizando básicamente los seminarios por ordenador sin atender la presentación oral solo se han enfrentado eficazmente con la herramienta de simulación (RA_1) y con la capacidad de desarrollar modelos (RA_2).

Por otra parte, los estudiantes que presentan en la sesión de conferencias abordan la mayoría de los resultados de aprendizaje previstos. Dado que los ámbitos de los proyectos han sido realmente diversos, desde los típicos sistemas de esferas conductoras hasta elementos conductores sometidos al campo magnético de la bobina de Helmholtz, así como el movimiento de partículas en campos magnéticos toroidales generados por múltiples bobinas, se muestran capturas ilustrativas realizadas por los estudiantes en Fig. 2. Los ámbitos se pueden desagregar según el grado de dificultad como básico, incremental y disruptivo.

El nivel básico de puntuación consiste simplemente en el desarrollo y análisis de un modelo de biblioteca proporcionado por el programa de simulación. Estos estudiantes han mostrado un rendimiento solvente en fluidez MEF (RA_1) y una buena capacidad en el desarrollo de sistemas MEF (RA_2). Estos dos resultados recién mencionados son plenamente alcanzados por los estudiantes que se enfrentan a modelos incrementales y disruptivos.

Los modelos incrementales corresponden a ejercicios de electromagnetismo, configuraciones analíticas y réplicas de laboratorio. Los alumnos que han optado por estos modelos han mostrado una alta capacidad para interpretar los datos de simulación (RA_3) de acuerdo con los resultados teóricamente esperados, incluyendo en su documentación una comparación entre los datos analíticos y los de simulación. Además, cuando ha sido aplicable también se ha aplicado la comparación con datos experimentales (RA_3). La extensión a sistemas complejos (RA_4) ha surgido de forma natural en muchos trabajos incrementales. Por ejemplo, a partir de un ejercicio de tres esferas concéntricas conductoras y dieléctricas, se han extendido los conceptos físicos a esferas no concéntricas, o se ha analizado las corrientes inducidas en un material metálico situado en el campo magnético generado por una bobina de Helmholtz en función de la frecuencia.

En cuanto a los modelos disruptivos concebidos por los estudiantes, se ha observado un alto rendimiento en los resultados de aprendizaje. Aunque los modelos electromagnéticos propuestos no se trataron en ninguna clase, se ha demostrado su validación de acuerdo con el enfoque físico y la bibliografía (RA_3). Se ha demostrado ampliamente la capacidad de extender el análisis electromagnético a sistemas más complejos mediante simulación (RA_4). Por ejemplo, un sistema de calentamiento por inducción de múltiples bobinas se analiza completamente incluyendo la condición de impedancia de frontera (conocida por IBC por sus siglas en inglés) para simplificar el coste computacional.

Antes de finalizar este apartado, es destacable que el alto interés de los alumnos en la preparación de la documentación de la presentación mediante el uso de las herramientas del programa de visualización se ha traducido en una valoración realmente satisfactoria de las competencias comunicativas (RA_5).

VI. FEEDBACK DE LA EXPERIENCIA DE APRENDIZAJE

Se envía un cuestionario en línea basado en Google Surveys a todos los alumnos de la asignatura de Electromagnetismo al final de la actividad de aprendizaje. Se pidió a todos los alumnos que valoraran sus percepciones en una escala lineal de 1 a 5, correspondiendo el 1 a totalmente en desacuerdo y el 5 a totalmente de acuerdo. Además de las siete preguntas numéricas, de las que sólo la primera resulta

TABLA IV. CUESTIONARIO GENERAL DE PERCEPCIÓN

Pregunta	Altamente en desacuerdo	En desacuerdo	Neutral	De acuerdo	Altamente de acuerdo
1.El trabajo práctico propuesto basado en la simulación electromagnética es adecuado.	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	2 (18 %)	9 (82 %)
2.El contenido de los seminarios de la COMSOL es adecuado	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	3 (27 %)	8 (73 %)
3.La duración de los seminarios de la COMSOL es adecuado	0 (0 %)	1 (9 %)	0 (0 %)	3 (27 %)	7 (64 %)
4.El procedimiento de selección del trabajo práctico es adecuado.	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	2 (20 %)	8 (80 %)
5. El tiempo dedicado al trabajo práctico es adecuado.	0 (0 %)	0 (0 %)	1 (10 %)	5 (50 %)	4 (40 %)
6. La evaluación del trabajo práctico mediante una presentación oral es adecuada.	0 (0 %)	2 (20 %)	1 (10 %)	2 (20 %)	5 (50 %)
7. La realización del trabajo práctico es recomendable	0 (0 %)	0 (0 %)	2 (18 %)	3 (27 %)	6 (55 %)

obligatoria, se incluye en la encuesta una pregunta abierta para dejar libremente sugerencias de mejora y comentarios.

Un total de 11 estudiantes realizaron la encuesta cuyas preguntas y respuestas se muestran en TABLA IV. La pregunta 1 (P1) se refiere a la idoneidad de la materia propuesta, P2 y P3 cubren la percepción práctica de los seminarios, mientras que P4 evalúa el procedimiento de selección del proyecto, P5 pregunta por la adecuación de la carga de trabajo y P6 interroga sobre el método de evaluación. Por último, la P7 indaga sobre la conveniencia del trabajo.

Las siguientes consideraciones pueden extraerse de los resultados del cuestionario de percepción. Primero, la propuesta de un trabajo práctico de simulación (P1) parece ser adecuada desde el punto de vista de los estudiantes. Segundo, con respecto a los seminarios guiados, parecen estar bien valorados, siendo el contenido mejor aceptado (P2) que la duración (P3). La puntuación en desacuerdo respecto a la duración (P3) coincide con respuestas en blanco respecto al proyecto (P4-P6), pero puntuación máxima en el resto de las preguntas. A partir de las respuestas de este estudiante específico, parece tratarse de un estudiante motivado que ha abandonado el proyecto de aprendizaje debido a la corta duración de los seminarios. Este caso puede surgir de un manejo frustrante de la herramienta MEF durante los seminarios. Este problema podría superarse introduciendo actividades de seguimiento para detectar situaciones similares y, entonces, poder actuar apropiadamente reforzando estas habilidades.

Tercero, respecto a la realización del proyecto, el procedimiento de selección del contenido del trabajo práctico (P4) ha sido bien considerado por los estudiantes. Se concluye que la selección del proyecto por cada estudiante según sus preferencias resulta beneficiosa. Además, el tiempo dedicado al trabajo práctico (P5) tiene una aceptación razonable. Por lo tanto, se puede concluir que no ha habido una sobrecarga de trabajo respetando la carga de trabajo permitida. La calificación más baja de la encuesta se obtiene en el método de evaluación mediante una presentación oral (P6). Este hecho destaca el rechazo tradicional de los estudiantes a los actos públicos. Aunque la presentación oral se considera indispensable para su proceso de aprendizaje, el hecho de que los estudiantes perciban la presentación oral como el único método de evaluación podría no ser adecuado. Por lo tanto, la evaluación podría incluir otros métodos de evaluación, como cuestionarios cortos, ejercicios en computadora o, incluso, informes.

Finalmente, respecto a la percepción general del proyecto, la última pregunta, que se refiere en cierta medida a la satisfacción con el curso (P7), presenta una evaluación aceptable. Además, se registraron tres respuestas libres de los estudiantes con sugerencias y comentarios, recibiendo comentarios motivadores sobre la actividad y sugerencias interesantes para aumentar la participación, como planificar los seminarios previamente y resaltar en la reunión de introducción los requisitos de tiempo.

VII. CONCLUSIONES

Este artículo describe una actividad optativa diseñada para enseñar a los estudiantes sobre la metodología de simulación basada en métodos de elementos finitos en el contexto del Electromagnetismo, una asignatura del Grado en Física en la Universidad de Zaragoza. El curso propuesto se estructura en tres etapas. Primero, se organiza un seminario inicial guiado para familiarizar a los estudiantes con la herramienta de simulación. Segundo, cada estudiante realiza su propio modelo electromagnético, con talleres prácticos programados para proporcionar apoyo ante cualquier problema que pueda surgir durante esta fase del proyecto. Tercero, los estudiantes preparan una breve presentación oral utilizando herramientas de visualización y cálculo, y finalmente, se lleva a cabo una conferencia de simulación electromagnética (SEMUZ 2023).

La inscripción para la asistencia a las sesiones programadas y la evaluación de los resultados de aprendizaje se han propuesto para medir la efectividad de la actividad. Los indicadores sugieren que los objetivos previstos se han logrado en gran medida. Además, se ha enviado una breve encuesta a todos los estudiantes para medir su percepción. Basándose en las métricas proporcionadas, se concluye que el trabajo práctico propuesto, basado en la simulación por MEF, ha sido bien recibido por los estudiantes.

REFERENCIAS

[1] M. Lonsky *et al.*, "Developing computational skills through simulation based problem-solving in science," Mar. 2023, [Online]. Disponible: http://arxiv.org/abs/2303.01784

[2] J. Weber and T. Wilhelm, "The benefit of computational modelling in physics teaching: A historical overview," *Eur J Phys*, vol. 41, no. 3, May 2020.

[3] T. J. Atherton, “Resource Letter CP-3: Computational physics,” *Am J Phys*, vol. 91, no. 1, pp. 7–27, Jan. 2023.
[4] D. A. Lowther and E. M. Freeman, “A New Approach to Using Simulation Software in the Electromagnetics Curriculum,” *IEEE Trans Education*, vol. 36, no. 2, p. 219, 1993.
[5] G. Kortemeyer, “Incorporating computational exercises into introductory physics courses,” in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Jun. 2020.
[6] M. D. Caballero, M. A. Kohlmyer, and M. F. Schatz, “Implementing and assessing computational modeling in introductory mechanics,” *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, vol. 8, no. 2, Aug. 2012.
[7] M. Beg, M. Lang, and H. Fangohr, “Ubermag: Toward More Effective Micromagnetic Workflows,” *IEEE Trans Magn*, vol. 58, no. 2, Feb. 2022.
[8] H. G. Espinosa and D. V. Thiel, “MATLAB-Based interactive tool for teaching electromagnetics [education corner],” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 59, no. 5. IEEE Computer Society, pp. 140–146, Oct. 01, 2017.
[9] H. A. Ghali, N. Y. Ammar, and I. Adly, “An Interactive Mobile Hub for Teaching Electromagnetics Courses [Education Corner],” *IEEE Antennas Propag Mag*, vol. 62, no. 4, pp. 117–127, Aug. 2020.
[10] N. F. O. Serteller and G. Kari, “Understanding the Foundations of Electromagnetic Field Theory with Computer Software,” in *2019 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, Apr. 2019, pp. 755–760.
[11] S. C. Mukhopadhyay, “Teaching electromagnetics at the undergraduate level: A comprehensive approach,” *Eur J Phys*, vol. 27, no. 4, pp. 727–742, Jul. 2006.
[12] A. F. L. Nogueira, V. H. P. da Costa, and R. L. Weinert, “Simulated Experiments for Teaching Mutually-Coupled Circuits CAD Techniques Using Analytic and Finite Element Solutions,” *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, vol. 09, no. 11, pp. 183–202, 2017.
[13] J. Acero and C. Carretero, “A Graduate Magnetic Design Course in a Power Electronics-Oriented Curriculum,” *IEEE Transactions on Education*, vol. 64, no. 3, pp. 223–232, Aug. 2021.
[14] J. Acero and C. Carretero, “Finite-element simulation and hands-on learning activities for teaching wireless power transfer systems,” in *15th International Conference of Technology, Learning and Teaching of Electronics, TAEE 2022*, 2022.
[15] E. Andreenkov and S. Shunaev, “Application of Simulation Modeling as a Replacement for Laboratory Practice in Engineering Education,” in *2022 6th International Conference on Information Technologies in Engineering Education, Inforino 2022,* 2022.
[16] J. M. Diaz-Chacon, C. A. Hernandez, V. M. Brauer, A. N. Valle, R. B. B. Ovando-Martinez, and A. A. Adeniyi, “Development of a didactic set of 3D-FEM magnetostatic simulations by using a free software,” in *2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Nov. 2017, pp. 1–6...
[17] T. O. B. Odden, E. Lockwood, and M. D. Caballero, “Physics computational literacy: An exploratory case study using computational essays,” *Phys Rev Phys Educ Res*, vol. 15, no. 2, Dec. 2019, doi: 10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.020152.
[18] “Grado en Física (2023)”, Consultado: Mar. 08, 2024. [Online]. Disponible: https://estudios.unizar.es/estudio/ver?id=124&anyo_academico=2023
[19] “Guía Docente Electromagnetismo. Grado en Física.”, Consultado: Mar. 08, 2024. [Online]. Disponible: https://sia.unizar.es/doa/consultaPublica/look[conpub]MostrarPubGuiaDocAs?entradaPublica=true&idiomaPais=es.ES&_anoAcademico=2023&_codAsignatura=26915
[20] “COMSOL - Software for Multiphysics Simulation”, Consultado: Mar. 14, 2024. [Online]. Available: https://www.comsol.com/
[21] COMSOL Multiphysics 6.0, “Computing the effect of fringing fields on a capacitance”, Consultado: Mar. 14, 2024. [Online]. Disponible: https://www.comsol.com/model/computing-the-effect-of-fringing-fields-on-capacitance-12605
[22] COMSOL Multiphysics 6.0, “Magnetic field of a Helmholtz coil”, Consultado: Mar. 14, 2024. [Online]. Disponible: https://doc.comsol.com/6.0/doc/com.comsol.help.models.acdc.helmholtz_coil/helmholtz_coil.html

Metodología y Recursos para la Enseñanza Práctica de los Circuitos Mixtos Analógico-Digitales

Camilo Quintáns Graña
Dept. de Tecnología Electrónica
Universidad de Vigo
Vigo, España
quintans@uvigo.gal

Marta Gómez Fernández
Dept. de Tecnología Electrónica
Universidad de Vigo
Vigo, España
marta.gomez@uvigo.gal

María Dolores Valdés Peña
Dept. de Tecnología Electrónica
Universidad de Vigo
Vigo, España
mvaldes@uvigo.gal

Jorge Marcos Acevedo
Dept. de Tecnología Electrónica
Universidad de Vigo
Vigo, España
acevedo@uvigo.gal

***Abstract*—La mayoría de los sistemas electrónicos combinan circuitos analógicos y digitales. Por ello, además de estudiarlos por separado, es necesario considerarlos en su conjunto y conocer sus características particulares. Esta problemática se aborda en la materia de Circuitos Mixtos Analógicos y Digitales del Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad de Vigo. Los contenidos que se imparten combinan la teoría de los sistemas continuos y discretos, y de los circuitos analógicos y digitales, en el marco de aplicaciones afines al currículo de la electrónica de telecomunicaciones (modulación, filtrado, síntesis de señal, etc.). En este trabajo se introducen los circuitos mixtos desde distintas perspectivas, y se presentan tanto la metodología de enseñanza como los recursos hardware y software utilizados en el laboratorio.**

Keywords—circuitos mixtos analógico-digitales, enseñanza de la electrónica, procesado de señal.

I. INTRODUCCIÓN

Los circuitos mixtos A/D, o los circuitos de señal mixta (*Mixed-Signal Circuits*), se refieren a que manejan señales analógicas y digitales. Históricamente se han definido como circuitos compuestos por cualquier combinación de partes digitales y analógicas que incluyan, al menos, un convertidor A/D o D/A. Esta definición se puede mejorar añadiendo al dominio de datos analógicos y digitales, representados por amplitudes y combinaciones binarias, el dominio de datos temporales, como la frecuencia, la fase, o el ancho de pulso. Por tanto, se podría generalizar la definición diciendo que son aquellos que incluyen señales de más de un dominio de datos. Debido a la necesidad de combinar los conocimientos de electrónica digital y analógica y de sistemas discretos y continuos, se ha diseñado la asignatura CMAD (Circuitos Mixtos Analógicos y Digitales), la cual aproxima al alumnado al estudio multidisciplinar de los distintos tipos de circuitos que conforman los sistemas electrónicos.

A. Los circuitos mixtos analógico-digitales

*1) Desde un punto de vista físico: s*e puede entender que un circuito mixto es aquel que utiliza una tecnología basada en transistor, *e.g.* CMOS, para implementar un circuito que tiene tanto partes digitales como analógicas [1]. Es decir, se diseña a nivel de transistor, tanto para su funcionalidad digital como analógica. Cabe destacar que existen dos opciones extremas. La primera consiste en implementar los circuitos digitales y analógicos por separado e interconectarlos con las interfaces A/D o D/A. La segunda consiste en implementar únicamente matrices de transistores con recursos de interconexión entre ellos, de forma que se puedan configurar los circuitos deseados a nivel de transistor, ya sean como circuitos digitales o analógicos [2].

2) Desde un punto de vista de la descripción del hardware: tanto para las partes digitales como analógicas se suelen utilizar esquemáticos o HDLs (Lenguajes de Descripción del Hardware) como PSpice A/D [3], VHDL-AMS o Verilog-AMS [4], [5]. Ambas opciones permiten realizar diseños a nivel de transistor, de bloques funcionales (subcircuitos), o de sistema. Otro aspecto importante es la facilidad para modelar los estímulos (analógicos y digitales) y las interfaces entre las partes analógicas y digitales. En este sentido, los programas basados en PSpice A/D ofrecen la ventaja de que las interfaces puedan ser transparentes para el diseñador o se puedan modelar ([3], Apartado 5.7). Quizás lo más eficaz a la hora de diseñar para simular es utilizar una plataforma que facilite la integración de distintos tipos de descripción (esquemáticos, VHDL-AMS y SPICE), como es el caso de PartQuest Explore [6]. Destacar que VHDL-AMS además de circuitos mixtos, también permite construir sistemas que integren elementos mecánicos, térmicos y fluídicos. Por ello, se debe distinguir entre circuito mixto, circuito mixto A/D, y sistema mixto.

3) Desde un punto de vista de la forma en que se utilizan: lo más elemental puede ser el fabricar un ASIC. Pero también hay la opción de incluir componentes analógicos en circuitos digitales. Por ejemplo, en los microcontroladores [7] se incluyen circuitos mixtos como convertidores A/D y D/A, referencias programables, comparadores, detectores de fase, etc. En las FPGA, se incluyen circuitos convertidores A/D [8], o se integran circuitos configurables tanto analógicos como digitales, como en las FPAAs *(Field Programmable Analog Array)* [9]. Y en los dpASP (*dynamically programmable Analog Signal Processor*), que incluyen, además de bloques configurables analógicos, generadores de reloj y tablas de búsqueda [10].

4) Desde el punto de vista de su complejidad se pueden clasificar en:

- Baja: comparadores de amplitud y de fase, multiplexor, muestreador, retenedor, etc.
- Media-alta: amplificador programable, convertidores A/D y D/A de Nyquist [11], VCO, convertidor F/V, sintetizadores de señal [12], moduladores ΣΔ, PLLs, amplificadores de bloqueo [13] o convertidores capacidad-digital [14].
- Muy alta: como los microcontroladores o las FPMA (*Field Programmable Mixed Analog-Digital Array*) [15], que combinan una FPAA y una FPGA. Estas dos partes pueden ser bloques independientes interconectados por convertidores A/D y D/A o mezclados en la propia matriz [9].

B. *La asignatura CMAD en el currículum del MET*

La asignatura CMAD, que se integra en el Máster en Ingeniería de Telecomunicación (*Máster en Enxeñaría de Telecomunicación* - MET), es de 4.5 ECTS y tiene una carga presencial de 30 horas divididas por igual entre teoría y práctica. El perfil de ingreso del alumnado del MET son graduados y graduadas en ingeniería en tecnologías de telecomunicación, y en automática y electrónica industrial, o similar. Por tanto, tienen una buena base de circuitos digitales y su implementación en FPGA, y de circuitos analógicos y de instrumentación. En CMAD el alumnado complementa estos conocimientos para progresar hacia un enfoque que integre los sistemas discretos y continuos. Los contenidos se orientan a circuitos básicos en electrónica de comunicaciones: moduladores sigma-delta, convertidores multietapa [16], síntesis digital directa, filtros *comb*, filtros FIR por muestreo en frecuencia, síntesis digital basada en filtros IIR, etc.

El principal objetivo de aprendizaje es que el alumnado sepa diseñar circuitos que combinen partes digitales y analógicas. Algunas de las principales problemáticas abordadas son: cómo combinar los conocimientos y recursos previos para realizar circuitos analógicos y digitales; y cómo incorporar el uso de VHDL-AMS [4].

II. Desarrollo del Laboratorio de CMAD

En el laboratorio se realizan seis prácticas semi-guiadas de montaje y simulación [17], y un trabajo final de simulación. En la Fig. 1 se muestra un diagrama con los distintos recursos utilizados y el flujo de trabajo. El enfoque de prácticas semi-guiadas reduce el tiempo que debe dedicar el alumnado al diseño y montaje, lo cual facilita que se centren en las fases de análisis y discusión de los resultados. En los montajes, una parte de los circuitos se implementan en la placa de prototipos y otra en la placa Nexys-4. La mayoría de los circuitos se simulan con OrCAD PSpice A/D, salvo los configurados en la FPGA, que se simulan con Vivado. En el trabajo final se modela con VHDL-AMS un sistema que combina contenidos de las prácticas, y se simula en la plataforma PartQuest™.

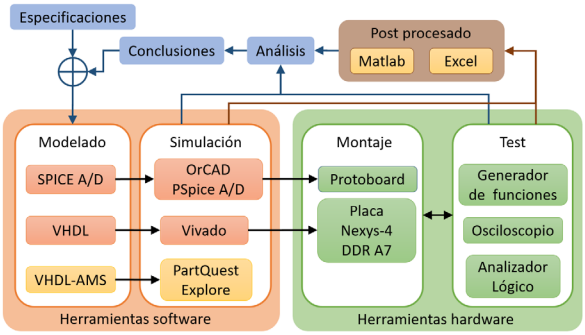


Fig. 1. Herramientas y flujo de trabajo en el laboratorio de CMAD.

A. *Práctica 1: Simulación de un modulador ΣΔ-ADC.*

En esta práctica se modela un sencillo modulador sigma-delta (MSD) ADC de tiempo continuo de primer orden con el fin de analizar su comportamiento mediante simulación. Los objetivos específicos de aprendizaje son:

- Reforzar los conocimientos sobre captura de esquemáticos utilizando componentes de bibliotecas predefinidas y componentes nuevos (se crea un componente multiplexor con el modelo MAX319).
- Comprender el funcionamiento de cada etapa del modulador analizando su respuesta temporal.
- Saber obtener los parámetros de calidad del modulador a partir de su respuesta en frecuencia.

La distribución general de las tareas es la siguiente:

1) *Modelado y simulación con OrCAD PSpice.*

Previamente, en las clases de aula se llega al equivalente discreto del modulador que se muestra en la Fig. 2, ya que discretizar las partes analógicas de un circuito mixto es uno de los métodos para analizarlos. En la práctica de laboratorio el modulador se describe con un esquema de OrCAD (Fig. 3) y se simula durante 4 periodos de la señal de entrada. En el análisis, el alumnado debe identificar la función H(s) en la Fig. 3 y discretizarla para obtener las funciones de transferencia para la señal y para el ruido.

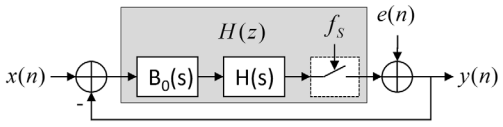


Fig. 2. Modelo discretizado del modulador ΣΔ-ADC.

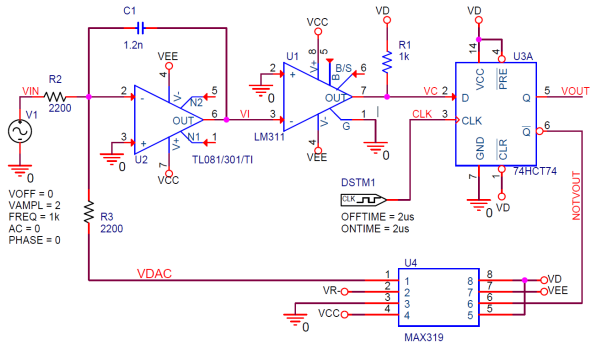


Fig. 3. Esquema del modulador ΣΔ-ADC para simulación y montaje.

2) *Análisis temporal.*

En la Fig. 4 se analizan en detalle la principales señales del modulador: la de entrada (VIN), la salida del integrador (VI), la de salida del comparador (VC), la salida digital (VOUT) y la salida del DAC (VDAC). El alumnado debe analizar cómo la salida digital VOUT se sincroniza con los flancos de subida del reloj CLK, marcando el instante en el que se memoriza el valor VC del comparador, y se mantiene hasta el próximo flanco de reloj.

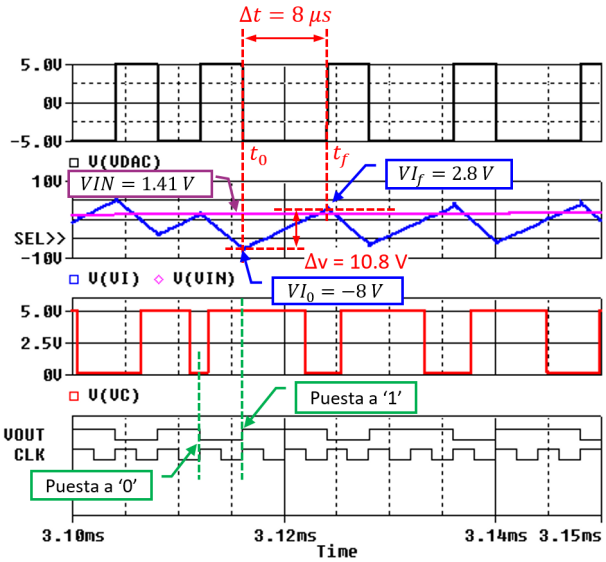


Fig. 4. Análisis temporal en PSPICE de las señales del modulador.

Además, también deben hacer un análisis cuantitativo. En (1) se indica cómo la señal VI es la integral de la suma de VIN y de VDAC (salida del DAC), que vale 5 o -5 V, según la salida digital valga '1' o '0'. Si se consideran los dos ciclos de reloj entre t_0 y t_f (8 µs), la señal de entrada se puede considerar constante (1.41 V) porque varía muy poco, así como la salida del DAC (-5 V), porque el biestable de salida mantiene el valor. Por tanto, la salida del integrador será una rampa que acaba en 2.8 V, tal como se deduce de (1).

$$VI_f = VI_0 - \frac{1}{R2 \cdot C1} \cdot \int_{t_0}^{t_f} (VDAC + \text{VIN}) \cdot dt = \\ = -8 - \frac{(-5 + 1.41)}{2.2 \cdot 10^3 \cdot 1.2 \cdot 10^{-9}} \cdot 8 \cdot 10^{-6} = 2.8\,V \quad (1)$$

3) Análisis en frecuencia mediante la FFT.

Ahora, mediante la opción FFT de PSPICE se observa el contenido en armónicos y el ruido de la salida analógica VDAC (Fig. 5). El alumnado debe exportar los datos de salida a la hoja de cálculo (Fig. 6) y obtener la SINAD, la SNR y la THD (se considera una banda de interés de 4.3 kHz y que las demás frecuencias se filtran idealmente). Finalmente se deduce el número equivalente de bits (ENOB) del modulador.

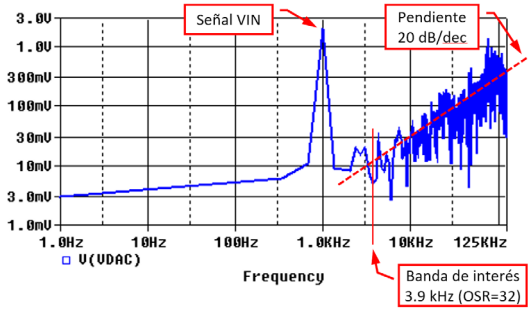


Fig. 5. FFT de la salida VDAC del MSD.

E17 =20*LOG10(C5/D17)

	A	B	C	D	E
1		Frecuencia	V(VDAC)	V^2	
2		0,00E+00	3,02E-03	9,11E-06	
3		3,33E+02	6,01E-03	3,61E-05	
4		6,67E+02	1,09E-02	1,20E-04	
5		**1,00E+03**	**2,00E+00**		
6		1,33E+03	9,12E-03	8,32E-05	
7		1,67E+03	8,49E-03	7,21E-05	
8		2,00E+03	8,40E-03	7,06E-05	
9		2,33E+03	2,01E-02	4,03E-04	
10		2,67E+03	1,52E-02	2,32E-04	
11		3,00E+03	1,97E-02	3,87E-04	
12		3,33E+03	7,29E-03	5,32E-05	
13		3,67E+03	5,11E-03	2,61E-05	
14		4,00E+03	5,70E-03	3,25E-05	
15		4,33E+03	2,60E-02	6,79E-04	
				suma	
16		4,67E+03	9,14E-03	cuadrados	SINAD (dB)
17		5,00E+03	7,98E-03	**4,69E-02**	**32,6**
18		5.33E+03	1.49E-02		

Fig. 6. Componentes de frecuencia exportadas desde PSpice.

B. *Práctica 2: Montaje del modulador ΣΔ-ADC.*

En la Fig. 7 se muestra el montaje del modulador simulado en la Práctica 1 (Fig. 3). El reparto de tareas es el siguiente:

1) Montaje del modulador en la placa de prototipos.

Es importante que el alumnado entienda que hay que pasar de un esquema para simulación (Fig. 3) a uno para montaje. Por ejemplo, ahora las referencias de 5 y -5 V se implementan con los reguladores 78 y 79L05, y se añaden condensadores de desacoplo para las alimentaciones referencias. Destacar que se deben utilizar las dos salidas del generador, una para inyectar la señal de entrada VIN y la otra para el reloj CLK.

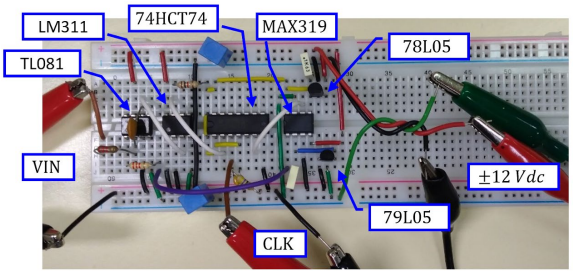


Fig. 7. Fotografía del montaje del modulador en la placa de prototipos.

2) Análisis temporal.

Se analizan con el osciloscopio las señales temporales VI, VC, VOUT y VDAC (Fig. 8). Se observa si hay saturación a la salida del integrador con la alimentación de 12 V y qué ocurre si se baja a 10 y 8 V. Con la ayuda de los cursores, el alumnado debe:

- medir la pendiente de la tensión de salida VI del integrador y comprobar su valor final a partir de su valor inicial, y de los valores de VIN y VDAC.
- medir el tiempo que transcurre desde que la señal VI pasa por cero y la salida del comparador se pone a nivel alto o bajo.
- medir el tiempo que transcurre desde el flanco activo de reloj hasta que la salida del biestable ha almacenado el valor lógico de su entrada.

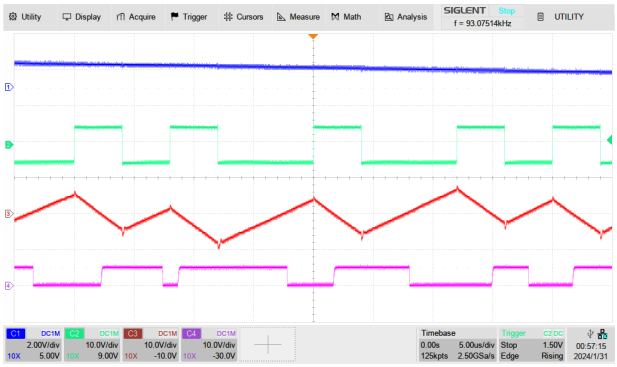


Fig. 8. Señal de entrada VIN (CH1-azul), salida del multiplexor VDAC (CH2-verde), salida del integrador VI (CH3-rojo), salida del comparador VC (CH4-violeta).

3) Análisis en frecuencia.

El análisis tiene por objetivo representar el espectro de la salida del modulador. Se puede llevar a cabo de dos formas:

- Realizando la FFT de la señal VDAC con el osciloscopio en modo analizador de espectros (Fig. 9). Es importante que el alumnado practique el concepto de *span*, frecuencia central y Hz/div, de forma que se vea el espectro desde 0 Hz hasta la mitad de la frecuencia del modulador. El alumnado debe medir el rango dinámico libre de espurios y cómo el ruido se desplaza hacia altas frecuencias.
- Realizando la FFT con un *script* de Matlab. Previamente se hace una captura de los datos digitales (salida del biestable y el reloj) con el analizador lógico (AL) (Fig. 10). Después se hace un análisis importando los datos en Matlab (Fig. 11). En esta opción es importante que el alumnado distinga entre la frecuencia de modulación, la frecuencia de muestreo del AL, y la frecuencia de la señal.

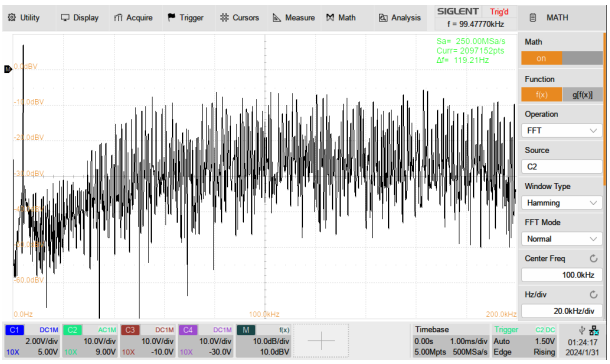


Fig. 9. FFT de la señal VDAC. Frecuencia del modulador 400 kHz. Señal de entrada 8 Vpp - 4 kHz.

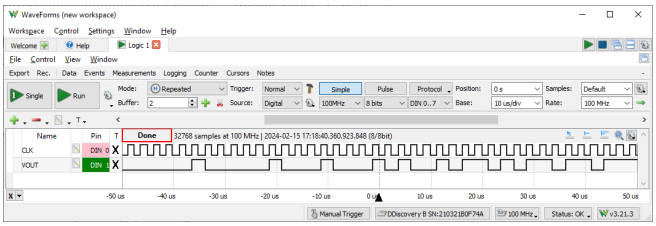


Fig. 10. Ejemplo de captura con el AL.

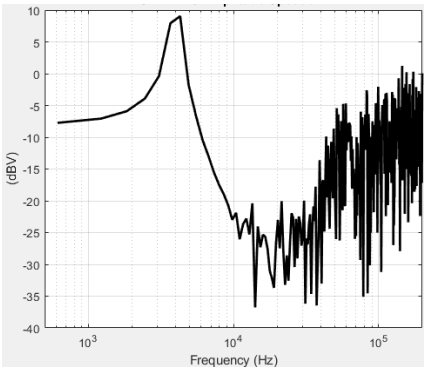


Fig. 11. Espectro de salida del modulador ΣΔ-ADC.

C. *Práctica 3: Modelado, simulación y síntesis de un modulador ΣΔ-DAC.*

En esta práctica se prueba el funcionamiento de un modulador ΣΔ-DAC de primer orden. Al ser totalmente digital se implementa en la FPGA. Como entrada se sintetiza un seno de 1 kHz con 32 muestras de 7 bits. De esta forma, el DAC convierte el dato de 7 bits a otro de 1 bit modulado. Primero se modela el sistema completo y se simula. Luego se configura en la FPGA y se conecta la salida al filtro paso-bajo disponible en la Nexys4. De esta forma, se obtiene la onda deseada ya filtrada (demodulada) en el conector de audio J8 de la placa.

Por tanto, la práctica se divide en dos partes, el modelado y simulación, y la síntesis y prueba en placa. Los principales objetivos de aprendizaje son:

- Saber crear una onda periódica por síntesis digital directa: concepto de acumulador de fase y tabla de búsqueda. Comprender las diferencias entre frecuencia de la señal y frecuencia de reconstrucción.
- Analizar y comprender el funcionamiento del modulador ΣΔ-DAC: concepto de truncado y acumulación del error anterior con la nueva entrada.
- Comprender el funcionamiento del sistema con tres frecuencias de trabajo: la frecuencia de la señal en la banda de interés, la de muestreo y la del modulador.

Esta práctica, es la primera en la que se utiliza la FPGA en la asignatura CMAD y se requiere que el alumnado realice las siguientes tareas previas, basadas en conocimientos y destrezas que ya debe poseer de materias anteriores:

- Hacer un esquema con los componentes del sistema a implementar, especialmente del modulador (Fig. 12).
- Realizar una descripción en VHDL de cada componente (Fig. 13): el modulador (sdm.vhd) (Fig. 14), el sintetizador (sinusoide_32kHz.vhd) y el divisor de frecuencia (divisor_frecuencia.vhd) para obtener las dos habilitaciones, la del reloj de modulación y la del de reconstrucción.
- Hacer una simulación de los componentes para verificar el funcionamiento de cada uno.

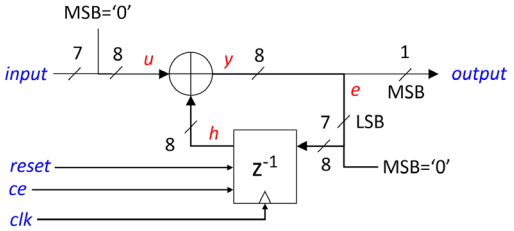


Fig. 12. Modelo del modulador DAC-ΣΔ de primer orden.

1) *Parte 1: Diseño y simulación.*

El reparto de tareas es el siguiente:

a) Síntesis de la señal de entrada de 1 kHz: se utiliza una LUT con 32 muestras de una onda sinusoidal y 7 bits de resolución. Con una instancia del divisor de frecuencia se obtiene la señal de habilitación para el reloj del contador que direcciona la tabla a 32 kHz.

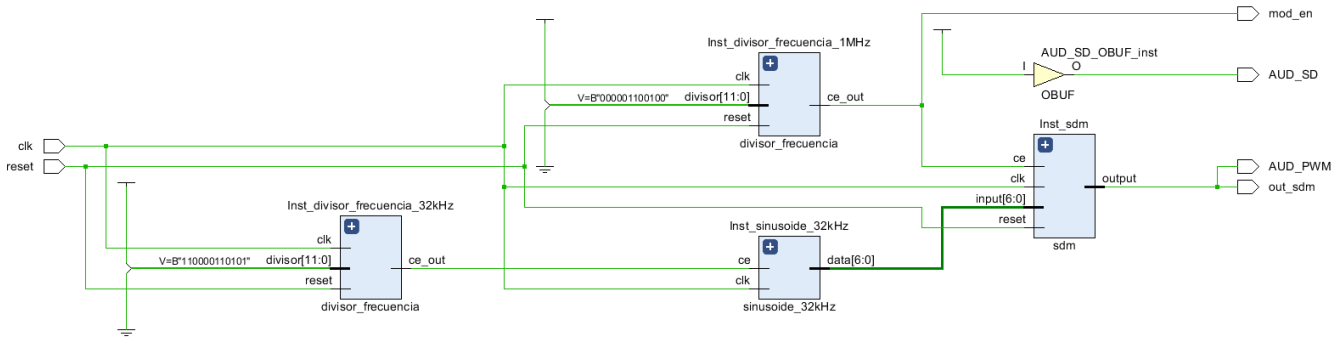


Fig. 13. Visor RTL del circuito de prueba del modulador DAC-ΣΔ.

```vhdl
LIBRARY IEEE;
USE IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
USE IEEE.NUMERIC_STD.ALL;

ENTITY sdm IS
    GENERIC(M : INTEGER:=7; --tamaño de datos de entrada
            N : INTEGER:=1);
    PORT(  clk,reset,ce: IN STD_LOGIC;
         input: IN STD_LOGIC_VECTOR(M-1 DOWNTO 0); -- M bits
        output: OUT STD_LOGIC_VECTOR(N-1 DOWNTO 0) -- N bit
    );
END sdm;

ARCHITECTURE circuito OF sdm IS
    SIGNAL u: STD_LOGIC_VECTOR(M DOWNTO 0); --entrada al sumador
    SIGNAL h: STD_LOGIC_VECTOR(M DOWNTO 0); --salida del registro
    SIGNAL y: STD_LOGIC_VECTOR(M DOWNTO 0); --salida del sumador
    SIGNAL e: STD_LOGIC_VECTOR(M-N DOWNTO 0); --entrada LSB del registro
BEGIN
        u <= '0' & input;
        y <= STD_LOGIC_VECTOR(UNSIGNED(u) + UNSIGNED(h));
        e <= y (M-N DOWNTO 0);
   output <= y(M DOWNTO M-N+1);

PROCESS(clk,reset,ce)
    BEGIN
        IF reset='1' THEN
           h <= STD_LOGIC_VECTOR(TO_UNSIGNED(0,M+1));
        ELSIF RISING_EDGE(clk) AND ce='1' THEN
           h <= STD_LOGIC_VECTOR(TO_UNSIGNED(0,N)) & e;
        END IF;
END PROCESS;
END circuito;
```

Fig. 14. Descripción VHDL del modulador DAC-ΣΔ.

b) Descripción VHDL del modulador 7-to-1-Bit SDM-DAC de la Fig. 12: con otra instancia del divisor se obtiene la señal de habilitación para el reloj de 1 MHz del modulador. Una vez realizada la síntesis, el alumnado puede analizar el resultado con visor RTL (Fig. 13).

c) Simulación del modulador: se conecta la salida de la LUT a la entrada del modulador y se genera un fichero de texto con la salida del modulador correspondiente a 5 ciclos de la señal generada (5 ms). El alumnado debe analizar el cronograma de las señales del diseño de alto nivel (Fig. 15) y de las señales internas del modulador, demostrando cómo funciona el acumulador de error (Fig. 16).

d) Análisis de la respuesta en frecuencia usando Matlab con los datos de salida de la simulación (Fig. 17).

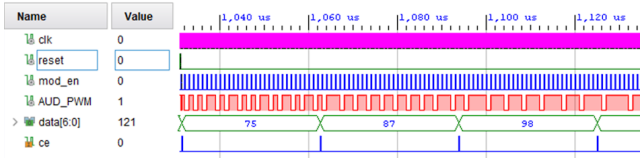


Fig. 15. Ejemplo de cronograma con las principales señales del DAC-ΣΔ.

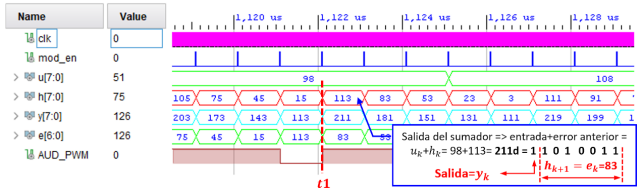


Fig. 16. Detalle donde se muestra el funcionamiento interno del DAC-ΣΔ.

2) Parte 2: Prueba real

Una vez simulado y estudiado el modulador, se sintetiza en la FPGA y se conecta su salida a la entrada del filtro paso bajo (LPF) Sallen-Key incluido en la placa (terminal AUD_PWM). Este filtro se habilita con la señal AUD_SD. Además, también se debe conectar la salida del modulador directamente al conector JA(1). Así, se dispone de las salidas modulada (sin filtrar) y demodulada (filtrada). El alumnado analiza el espectro de estas dos señales con el osciloscopio (Fig. 18). Además, también toman una captura de la salida sin filtrar con el AL y exportan los datos para obtener la gráfica de respuesta en frecuencia con Matlab.

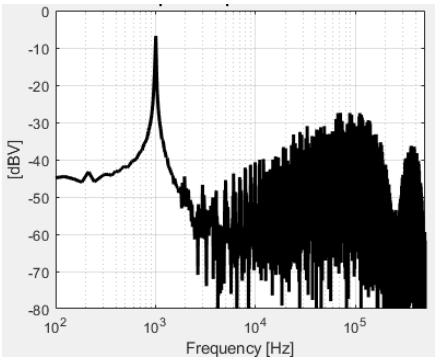


Fig. 17. Espectro de frecuencia del DAC-ΣΔ obtenido de la simulación.

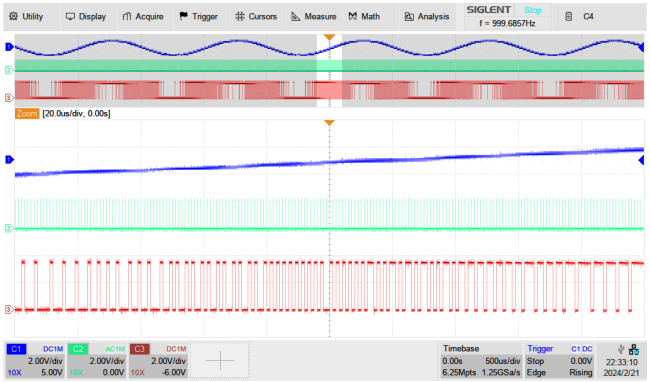


Fig. 18. Salida con filtro (CH1-azul) y sin filtro (CH3-rojo) del modulador DAC-ΣΔ, y habilitación de salida (CH2-verde). Vista completa (ventana superior) y zoom (ventana inferior, en rojo).

D. Práctica 4: Implementación de un filtro comb. Los objetivos específicos de aprendizaje son:

- Comprender el funcionamiento del filtro *comb*.
- Saber validar el funcionamiento del filtro mediante simulación y mediante la instrumentación, una vez se configura la FPGA.

El reparto de tareas es el siguiente:

1) Estudio de la estructura del filtro: se compara su estructura hardware (Fig. 19) con su descripción (Fig 20).

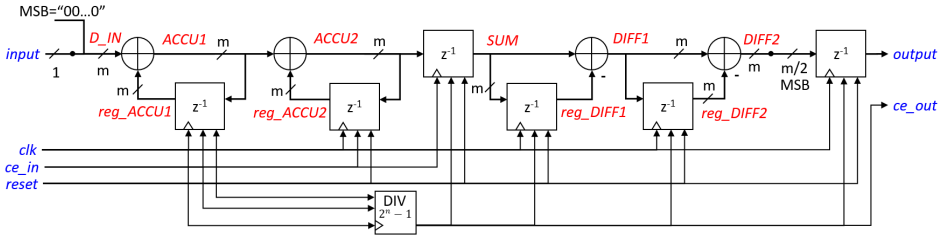


Fig. 19. Esquema del filtro *comb* diezmador para modelar en VHDL.

```
LIBRARY IEEE;
USE IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
USE IEEE.NUMERIC_STD.ALL;

ENTITY p4_comb_pass2 IS
    GENERIC(n:INTEGER:=5);
    PORT(clk,input,reset,ce_in: IN STD_LOGIC;
         ce_out: INOUT STD_LOGIC;
         output: OUT std_logic_vector(n-1 DOWNTO 0));
END p4_comb_pass2;

ARCHITECTURE circuito OF p4_comb_pass2 IS
 CONSTANT m:INTEGER:=2*n;
 SIGNAL D_IN,ACCU1,ACCU2,DIFF1,DIFF2: UNSIGNED(m-1 DOWNTO 0);
 SIGNAL reg_ACCU1,reg_DIFF1,reg_ACCU2,reg_DIFF2,SUM: UNSIGNED(m-1 DOWNTO 0);
 SIGNAL contador: UNSIGNED(n-1 DOWNTO 0);
BEGIN
    D_IN<=TO_UNSIGNED(0,m-1)& input;

    PROCESO_1: PROCESS(clk,reset,reg_ACCU1,D_IN,ACCU1,reg_ACCU2,ACCU2)
    BEGIN
        IF reset='1' THEN
            reg_ACCU1<=TO_UNSIGNED(0,m);
            reg_ACCU2<=TO_UNSIGNED(0,m);
        ELSE
        IF(clk='1' AND clk'event AND ce_in='1') THEN
                reg_ACCU1<=ACCU1;
                reg_ACCU2<=ACCU2;
            END IF;
        END IF;
        ACCU1<=reg_ACCU1+D_IN;
        ACCU2<=reg_ACCU2+ACCU1;
    END PROCESS PROCESO_1;

    PROCESO_2: PROCESS(clk,reset,contador)
    BEGIN
        IF reset='1' THEN
            contador<=TO_UNSIGNED(0,n);
        ELSE
            IF(clk='1' AND clk'event AND ce_in='1') THEN
                contador<=contador+TO_UNSIGNED(1,n);
                IF contador=TO_UNSIGNED((2**n)-2,n)
                    THEN
                        ce_out<='1';
                        contador<=TO_UNSIGNED(0,n);
                    ELSE ce_out<='0';
                END IF;
            END IF;
        END IF;
    END PROCESS PROCESO_2;

    PROCESO_3: PROCESS(clk,ce_out,reset,reg_DIFF1,ACCU2,reg_DIFF2,DIFF1)
    BEGIN
        IF reset='1' THEN
            reg_DIFF1<=TO_UNSIGNED(0,m);
            reg_DIFF2<=TO_UNSIGNED(0,m);
            SUM<=TO_UNSIGNED(0,m);
        ELSE
            IF(clk='1' AND clk'event) AND ce_out='1' THEN
                SUM<=ACCU2;
                reg_DIFF1<=SUM;
                reg_DIFF2<=DIFF1;
            END IF;
        END IF;
        DIFF1<=SUM-reg_DIFF1;
        DIFF2<=DIFF1-reg_DIFF2;
    END PROCESS PROCESO_3;

    PROCESO_4: PROCESS(clk,reset,ce_out,DIFF2)
    BEGIN
    IF reset='1' THEN
            output<=std_logic_vector(TO_UNSIGNED(0,n));
        ELSE
            IF(clk='1' AND clk'event) AND ce_out='1' THEN
                output<=std_logic_vector(DIFF2(m-1 DOWNTO n));
            END IF;
        END IF;
    END PROCESO_4;
END circuito;
```

Fig. 20. Descripción VHDL del filtro *comb* diezmador.

2) Estudio de la respuesta ante una señal PWM: se simula la respuesta de un filtro de 5 bits ante una señal de entrada de pulso variable. Se deben analizar la señales externas (Fig. 21) y las internas (Fig. 22). Es importante comprender cómo se obtiene la señal de habilitación de salida (diezmada) y cómo la combinación de salida es proporcional al ciclo de trabajo de la entrada. Para las señales internas, es importante comprobar el funcionamiento de los integradores y de los restadores.

3) Filtrado de la salida del modulador ΣΔ-ADC de la Práctica 2: una vez verificado el filtro, se configura la FPGA con una versión de 6 bits y se conecta como etapa de salida del modulador que se montó en la Práctica 2 (Fig. 23). Con el AL se captura la combinación binaria de salida y se representa en una gráfica para comprobar cómo se obtiene la señal de entrada del modulador digitalizada (Fig. 24).

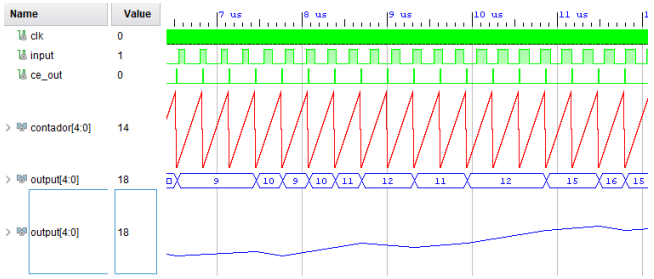


Fig. 21. Resultado de simulación del filtro diezmador con entrada PWM.

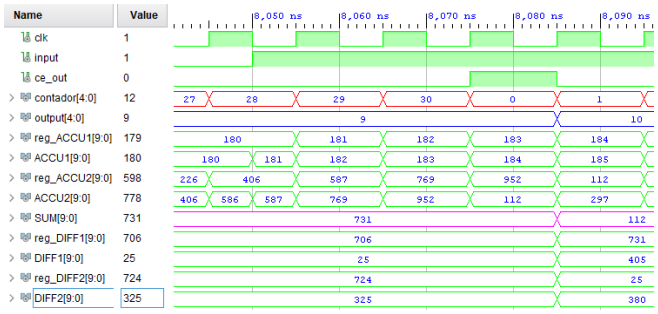


Fig. 22. Señales internas de simulación del filtro *comb* diezmador.

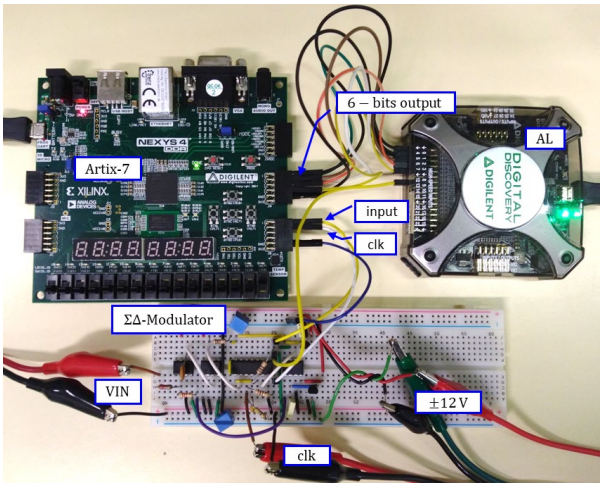


Fig. 23. Montaje completo del modulador (ΣΔ) y demodulador (filtro *comb* diezmador de 6 bits implementado en la FPGA), y analizador lógico (AL).

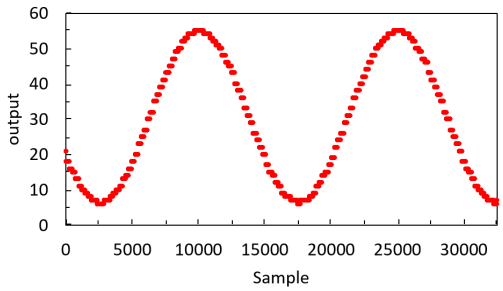


Fig. 24. Datos de la captura con el AL (2.941 MHz, 32768 muestras) de la salida del filtro (6 bits de salida y entrada de 100 Hz y 4 Vp).

E. Práctica 5: Síntesis digital directa.

En esta práctica se configura un sintetizador digital directo (DDS) en la FPGA para generar una onda de 4 bits de resolución de la frecuencia más alta posible. Los objetivos de aprendizaje son:

- Comprender el funcionamiento del DDS.
- Saber validar el funcionamiento del sintetizador.

El reparto de tareas es el siguiente:

1) Diseño y simulación de un DDS básico de 4 bits (Fig. 25 y 26): demostrar en la salida de simulación cómo se sintetiza la frecuencia de salida justificando cómo se obtiene su valor promedio.

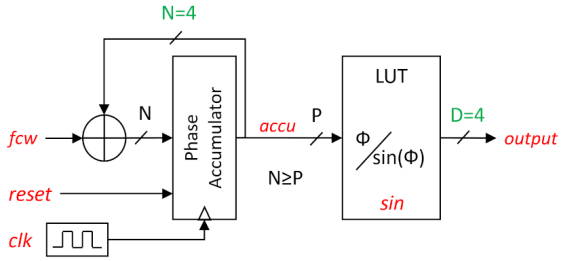


Fig. 25. Estructura de un circuito DDS.

```
1   LIBRARY IEEE;
2   USE IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3   USE IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
4
5   ENTITY dds IS
6       PORT(reset,clk: IN STD_LOGIC;
7            fcw: IN  STD_LOGIC_VECTOR(3 DOWNTO 0);
8            output: OUT STD_LOGIC_VECTOR(3 DOWNTO 0));
9   END dds;
10
11  ARCHITECTURE circuito OF dds IS
12      SIGNAL accu : UNSIGNED(3 DOWNTO 0)  := (OTHERS => '0');
13      SUBTYPE dato_tabla IS STD_LOGIC_VECTOR(3 DOWNTO 0);
14      TYPE lut IS ARRAY (0 to 15) OF dato_tabla;
15      CONSTANT sin: lut :=("0111","1010","1100","1101","1110",
16                           "1101","1100","1010","0111","0100",
17                     "0010","0001","0000","0001","0010","0100");
18  BEGIN
19      PROCESS(clk)
20              BEGIN
21                  IF RISING_EDGE(clk) THEN
22                     IF reset = '0' THEN accu <= (OTHERS => '0');
23                        ELSE accu <= UNSIGNED(fcw) + accu;
24                     END IF;
25                  END IF;
26              END PROCESS;
27  output<= sin(TO_INTEGER(accu));
28  END circuito;
```

Fig. 26. Descripción del circuito DDS de la Fig. 25 configurado con 4 bits.

El alumnado debe obtener la frecuencia de salida teórica esperada a partir del valor de la palabra de control de frecuencia *fcw (frequency control word)*. Por ejemplo, con *fcw*=3, según la expresión (2):

$$f_o = \frac{fcw \cdot f_{clk}}{2^N} = \frac{3 \cdot 100 \cdot 10^6}{2^4} = 18.75\ MHz. \qquad (2)$$

Una vez simulado, en el cronograma de salida (Fig. 27) deben comprobar cuántos ciclos se obtienen en 2^N periodos de reloj y qué periodo tienen.

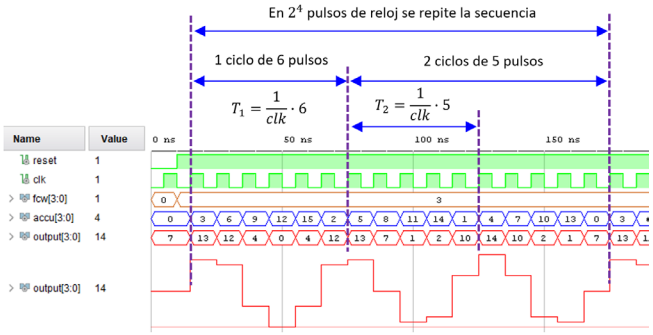


Fig. 27. Resultado de simulación en Vivado del DDS básico de 4 bits.

Es importante señalar que los ciclos de salida no son exactamente del mismo periodo, ya que depende de si *fcw* es par o impar, pero que el promedio es el periodo esperado, como se demuestra en (3). Al dividir por 3, se obtiene un ciclo de periodo T_1 y dos de periodo T_2.

$$\boldsymbol{T_{medio}} = \frac{1 \cdot T_1 + 2 \cdot T_2}{1+2} = \frac{1}{clk} \cdot \frac{16}{3}$$
$$\boldsymbol{f_{media}} = \frac{clk \cdot 3}{16} = 1.875\ MHz \qquad (3)$$

2) Configurar un DDS en la FPGA: después de estudiar el funcionamiento del DDS mediante simulación, el alumnado implementa un ejemplo en el hardware, con un acumulador de 8 bits (N), una LUT de 5 bits de dirección (P) y 4 bits de palabra de datos (D), que se deben conectar al canal rojo del conector VGA que tiene la placa Nexys 4. Para la frecuencia del reloj, se debe usar la más alta posible. La *fcw* se establece con los interruptores de la placa. En la Fig. 28 se muestra el resultado sintetizado con una *fcw* de 13. El alumnado comprueba que idealmente, se necesitaría una *fcw* de 12.8 para generar 5 MHz, pero al elegir el valor entero de 13, se generan 10.078 MHz. Para mejorar la resolución se les propone aumentar el número de bits del acumulador. Por último, se propone medir con el osciloscopio el valor medio y la desviación estándar de la frecuencia para comprobar el efecto al variar la *fcw*, por ejemplo, de par a impar.

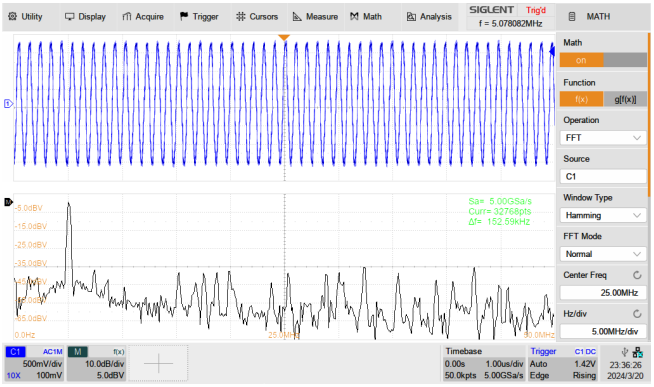


Fig. 28. Señal de 5.078 MHz generada con el DDS de 8 bits.

F. *Practica 6: Filtros IIR para síntesis digital de señal.*

En esta práctica el alumnado diseña un oscilador totalmente digital basado en una función de transferencia (FDT) de segundo orden, cuya implementación se puede asimilar a la de un filtro IIR de orden dos [18]. En la Fig. 29 se representa el lugar de las raíces del sistema de segundo orden con función de transferencia en bucle abierto (BA) (4) y en bucle cerrado (BC) (5).

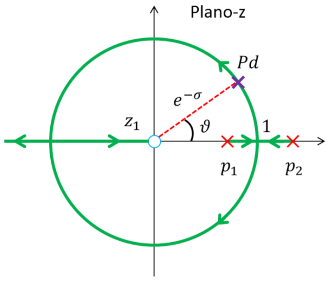


Fig. 29. Lugar de las raíces del oscilador IIR.

$$G(z) = \frac{k \cdot z}{z^2 - z \cdot (p_1 + p_2) + p_1 \cdot p_2} \quad (4)$$

$$\frac{G(z)}{1 + G(z)} = \frac{k \cdot z}{z^2 - z \cdot (p_1 + p_2 - k) + p_1 \cdot p_2} = \frac{b \cdot z^{-1}}{1 + a \cdot z^{-1} + 1 \cdot z^{-2}} \quad (5)$$

El principio de funcionamiento se fundamenta en el hecho de que el punto de bifurcación y el de confluencia de las ramas que parten de los polos se encuentren en z=1. De esta forma, los polos en bucle cerrado estarán en el círculo unidad y se podrá ajustar la ganancia para que el ángulo ϑ (la frecuencia digital) sea el deseado. La cuestión importante es resolver si se puede conseguir que el módulo de los polos en BC sea exactamente la unidad. De otra forma, el sistema tendería a aumentar la amplitud hasta saturarse, o a disminuirla hasta anularse.

Para resolver este problema, si se despeja la ganancia a partir del criterio del módulo y se iguala a cero su derivada, se obtiene la primera condición, que consiste en que el producto de los dos polos debe ser la unidad ($p_1 \cdot p_2 = 1$). Por otro lado, si se identifican los coeficientes del polinomio característico con los de un sistema de segundo orden

$$z^2 - 2 \cdot e^{-\sigma} \cdot \cos\vartheta \cdot z + e^{-2\sigma},$$

se obtiene la segunda condición que se debe cumplir:

$$k = p_1 + p_2 - 2 \cdot \cos\vartheta.$$

De esta forma, con estas dos condiciones se fijan los polos y la ganancia a partir de la frecuencia deseada. En la Fig. 30 se muestra un ejemplo de estructura para implementar el oscilador y en la Fig. 31 su descripción. Los coeficientes están escalados por 1024. La entrada *X(z)* del sistema, que se denomina *impulso* en la descripción, solo debe intervenir después de un *reset* por lo que se debe implementar un proceso que le asigne un impulso (valor máximo positivo) durante un ciclo de reloj. Con los valores de los coeficientes de este ejemplo se consigue un ángulo de 36°.

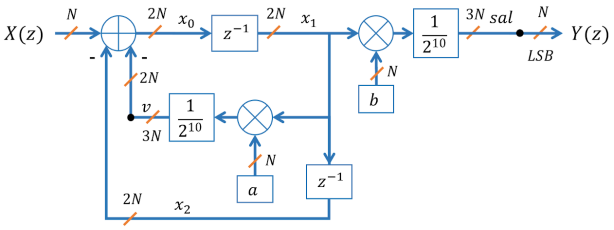


Fig. 30. Estructura que implementa la FDT del oscilador.

```
40    PROCESS (clk,reset)
41       VARIABLE v,sal:SIGNED(3*N-1 DOWNTO 0);
42       VARIABLE x0:SIGNED(2*N-1 DOWNTO 0);
43    BEGIN
44       IF reset='1' THEN
45          y<=TO_SIGNED(0,N);
46           x1<=TO_SIGNED(0,2*N);
47          x2<=TO_SIGNED(0,2*N);
48          a<=TO_SIGNED(1656,N);
49          b<=TO_SIGNED(602,N);
50       ELSE
51          IF clk='1' AND clk'event THEN
52             v:=(a*x1)/1024;
53             x0:=v(2*N-1 DOWNTO 0)-x2+impulso;
54             sal:=(b*x1)/1024;
55             y<=sal(N-1 DOWNTO 0);
56             x2<=x1;
57             x1<=x0;
58          END IF;
59       END IF;
60    END PROCESS;
```

Fig. 31. Descripción del proceso que implementa el oscilador IIR.

En la Fig. 32 se muestra el resultado de implementar el diseño en el hardware. La frecuencia resultante es de 10 MHz, ya que el reloj de la placa es de 100 MHz (frecuencia digital de 36°/360°=0.1). Señalar que como DAC, para conectar la salida del oscilador, se ha usado la red R-2R del canal rojo de la VGA de la placa Nexys4, que es de cuatro bits. Además, como la salida de la estructura es *signed*, se debe añadir en la descripción VHDL la conversión a *unsigned*.

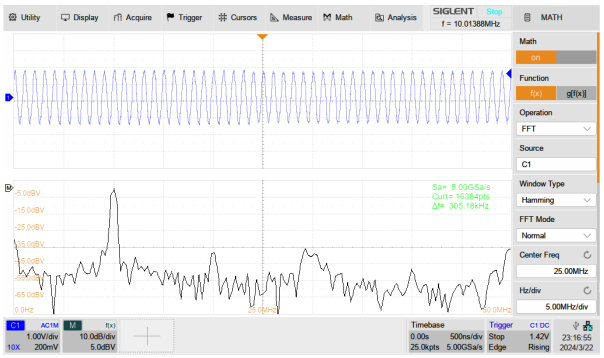


Fig. 32. Salida analógica del oscilador IIR y respuesta en frecuencia.

G. *Trabajo final de modelado y simulación con VHDL-AMS.*

En el trabajo final de laboratorio el alumnado modela un sistema que combine los distintos módulos de diseño que se realizaron en las prácticas (Fig. 33). El objetivo es que utilicen la potencialidad de VHDL-AMS de forma que puedan modelar juntas las partes analógicas y digitales.

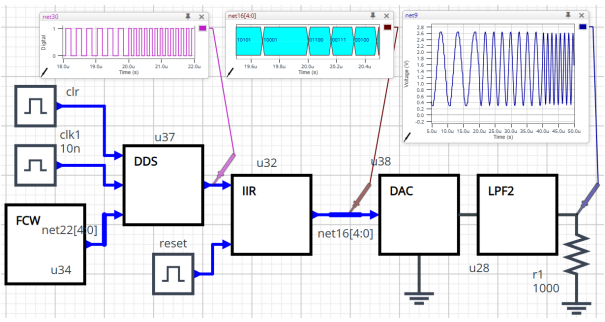


Fig. 33. Ejemplo de trabajo final de simulación modelado con VHDL-AMS en la plataforma PartQuest™ Explore. Se genera una onda modulada en frecuencia. El seno se sintetiza con el filtro IIR y la frecuencia con el DDS.

Previamente el alumnado debe estudiar los aspectos nuevos del lenguaje como, por ejemplo:

- Se utiliza la biblioteca ELECTRICAL_SYSTEMS y, además de las entradas y salidas digitales, se definen los terminales analógicos (TERMINAL).
- Las cantidades (QUANTITY) de rama se utilizan para identificar, y utilizar en las ecuaciones, las caídas de tensión (ACROSS) y las corrientes (THROUGH) entre dos pines. En la Fig. 34 se modela un DAC de 4 bits, similar a la red R-2R que se utilizó en la Práctica 6. En la Fig. 35 se realiza una prueba usando un contador como dato digital de entrada.
- Los sistemas lineales se pueden modelar directamente, por ejemplo, con la función derivada (‘DOT) o como una función de transferencia (LTF), que se describe con los polinomios (REAL_VECTOR) del numerador y del denominador. En la Fig. 36 se muestra como ejemplo un filtro paso-bajo de segundo orden descrito con estas dos opciones.

- Atributos como ‘RAMP, ‘ABOVE y ‘DELAYED se utilizan para modelar señales analógicas, generar eventos analógicos/digitales o introducir retardos, respectivamente. Por ejemplo, ‘RAMP permite establecer tiempos de subida y de bajada, y ‘ABOVE se utiliza para detectar umbrales de señales analógicas. En la Fig. 37 se muestra, como ejemplo de uso de estos atributos, el modelo de un convertidor D/A de 1 bit.

```
LIBRARY IEEE;
USE IEEE.ELECTRICAL_SYSTEMS.ALL;
USE IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
USE IEEE.MATH_REAL.ALL;

ENTITY dac_4b IS
  PORT (d : IN STD_LOGIC_VECTOR(3 DOWNTO 0);
            TERMINAL a, gnd: ELECTRICAL);
END ENTITY dac_4b;

ARCHITECTURE modelo OF dac_4b IS
   CONSTANT r: REAL:=4000.0;
   TERMINAL a1,a2,a3,a4: ELECTRICAL;
   QUANTITY x1 ACROSS i1 THROUGH a1 TO gnd;
   QUANTITY x2 ACROSS i2 THROUGH a2 TO gnd;
   QUANTITY x3 ACROSS i3 THROUGH a3 TO gnd;
   QUANTITY x4 ACROSS i4 THROUGH a4 TO gnd;
   QUANTITY v1 ACROSS ia1 THROUGH a1 TO a;
   QUANTITY v2 ACROSS ia2 THROUGH a2 TO a;
   QUANTITY v3 ACROSS ia3 THROUGH a3 TO a;
   QUANTITY v4 ACROSS ia4 THROUGH a4 TO a;
BEGIN
  IF d(0)='1' USE x1==3.3;   ELSE x1==0.0;   END USE;
   IF d(1)='1' USE x2==3.3;   ELSE x2==0.0;   END USE;
    IF d(2)='1' USE x3==3.3;   ELSE x3==0.0;   END USE;
     IF d(3)='1' USE x4==3.3;   ELSE x4==0.0;   END USE;
   v1==ia1*r;
   v2==ia2*r/2.0;
   v3==ia3*r/4.0;
   v4==ia4*r/8.0;
END ARCHITECTURE modelo;
```

Fig. 34. Descripción de un DAC de 4 bits mediante VHDL-AMS. Las cantidades x_n son los voltajes de entrada a la red de resistencias y sus valores valen 0 o 3.3 V, según el que bit de entrada correspondiente *d(n)* valga ‘0’ o ‘1’. Las cantidades v_n son las caídas de tensión de las resistencias de la red.

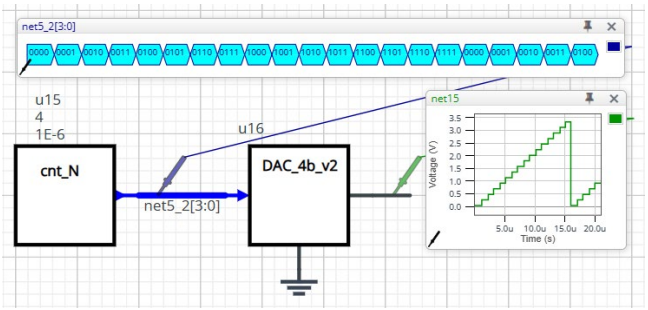


Fig. 35. Prueba del DAC de 4 bits en la plataforma PARTQUEST.

III. Resultados

La asignatura CMAD se ha impartido durante los últimos 9 años y la han cursado un total de 44 estudiantes. Para evaluar los resultados desde el punto de vista de la aceptación y el aprovechamiento, el Vicerrectorado de Calidad de la Universidad de Vigo realiza anualmente encuestas de evaluación docente. En la Tabla I se resumen los resultados de las preguntas más relevantes para el objetivo de este trabajo. Cabe destacar que se han recibido un total de 19 encuestas, lo que constituye una muestra aproximada del 43%. Se comprueba que en todas las respuestas la nota media está en torno a un 4 sobre 5, demostrando que el grado de satisfacción del alumnado es alto. Aunque también se constata que el alumnado percibe que tiene una elevada carga de trabajo.

```
LIBRARY IEEE;
USE IEEE.MATH_REAL.ALL;
USE IEEE.ELECTRICAL_SYSTEMS.ALL;

ENTITY lpfa IS
 GENERIC( k : REAL := 1.0;
          Fc : REAL := 10000.0;
          Q : REAL := 0.4);
 PORT( TERMINAL  input : electrical ;
       TERMINAL  output : electrical);
END lpfa;

ARCHITECTURE modelo OF lpfa IS
  QUANTITY vin ACROSS input TO ELECTRICAL_REF;
  QUANTITY vout ACROSS iout THROUGH output TO ELECTRICAL_REF;
 CONSTANT wc : REAL:= math_2_pi*Fc;
BEGIN
  vout == k* vin-(vout'DOT/(wc*Q))-(vout'DOT'DOT/(wc*wc));
END modelo;

ARCHITECTURE modelo OF lpfb IS
  QUANTITY vin ACROSS input TO ELECTRICAL_REF;
  QUANTITY vout ACROSS iout THROUGH output TO ELECTRICAL_REF;
  CONSTANT wc : REAL:= math_2_pi*Fc;
 CONSTANT num: REAL_VECTOR:= (wc*wc, 0.0, 0.0);
 CONSTANT den: REAL_VECTOR:= (wc*wc, wc/Q, 1.0);
BEGIN
  vout == k* vin'LTF(num, den);
END modelo;
```

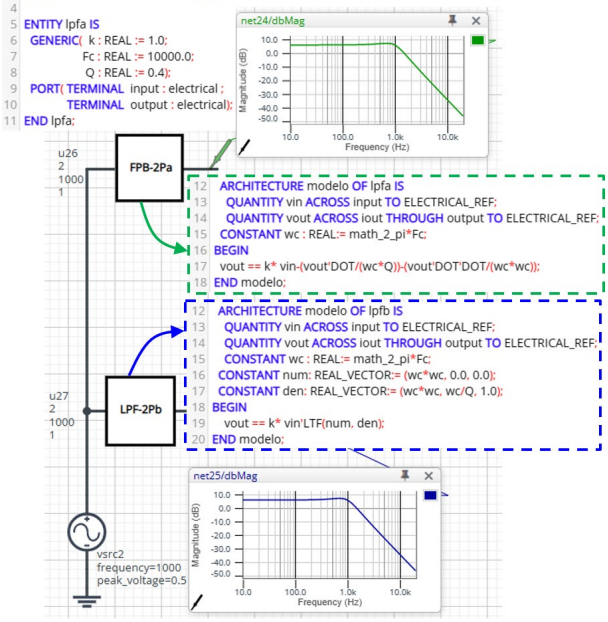


Fig. 36. Descripción funcional como sistema lineal de un filtro paso-bajo. En la arquitectura lpfa se modela como un sistema con realimentación negativa hacia atrás, y en la lpfb se modela como función de transferencia.

```
LIBRARY IEEE;
USE IEEE.ELECTRICAL_SYSTEMS.ALL;
USE IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;

ENTITY dac_1b IS
GENERIC(
   vref_min: VOLTAGE:= -2.5; --Minimum output analog voltage
   vref_max: VOLTAGE:= 2.5; --Maximun output analog voltage
   td:TIME:=60 ns;
   tr:REAL:= 10.0E-12;
   tf:REAL:= 20.0E-12);

PORT (din: IN STD_LOGIC;
       TERMINAL vout, gnd: ELECTRICAL);
END ENTITY dac_1b;

ARCHITECTURE modelo OF dac_1b IS
   QUANTITY v ACROSS i THROUGH vout TO gnd;
   SIGNAL aux:VOLTAGE:=0.0;
   SIGNAL din_delayed: STD_LOGIC:='0';
BEGIN
   din_delayed<=din'delayed(td);
   aux<= vref_max  WHEN din_delayed ='1' ELSE vref_min;
   v==aux'ramp(tr,tf);
END ARCHITECTURE modelo;
```

Fig. 37. Descripción de un DAC de 1bit. La señal digital de entrada din se retarda un tiempo td para obtener la señal din_delayed, la cual controla la cláusula when-else con la que se obtiene el voltaje aux, que finalmente se asigna a la cantidad v del terminal de salida vout (con tiempo de subida tr y de bajada tf).

TABLA I. Resultados de las Encuestas de Evaluación Docente.

Objetivo de la pregunta	Número de respuestas	Nota media sobre 5
1.- Importancia para mi formación	18	4.2
2.- Adecuación del volumen de trabajo con relación a los créditos de la materia	18	3.6
3.- Las actividades desarrolladas por el/la profesor/a contribuyen a conseguir los objetivos de la materia	17	3.7
4.- Adecuación de los recursos a los objetivos de la materia	19	4

Otros indicadores de calidad a tener en cuenta, obtenidos hasta el curso 2022/2023, son: la tasa de evaluación promedia, que fue del 96%; la tasa de éxito, que fue del 100%; y la tasa de rendimiento que fue del 96%.

Por último, en cuanto a los resultados académicos, en general todos los alumnos y alumnas han superado la asignatura por evaluación continua, lo cual es de esperar debido al tamaño medio de los grupos (5 estudiantes). Las calificaciones se han repartido entre un 5% de sobresalientes, un 62% de notables y un 33% de aprobados.

IV. Conclusiones

Se han introducido los circuitos mixtos A/D desde distintos puntos de vista, lo cual deja en evidencia la diversidad y complejidad de enfoques que pueden surgir de cara a la enseñanza de este tipo de circuitos.

Se ha presentado un plan de prácticas que permite al alumnado comprender la problemática de dichos circuitos y llegar a realizaciones prácticas reales. Este plan incluye una metodología de trabajo y define un conjunto de recursos software y hardware apropiados para este tipo de enseñanza. Como las prácticas son esencialmente sobre hardware, es necesario combinar, por ejemplo, OrCAD PSPICE y Vivado, para poder simular y obtener un resultado para síntesis o para montaje. Este enfoque facilita al alumnado analizar los resultados obtenidos tanto con los simuladores como con la instrumentación. Por otra parte, para un enfoque global que permita al alumnado diseñar circuitos mixtos de forma integral es adecuado el modelado con VHDL-AMS, aunque se limite a proporcionar resultados de simulación.

Por último, se ha realizado un análisis cuantitativo de la metodología propuesta basado en la opinión del alumnado y en los valores alcanzados en diferentes indicadores de calidad. Los resultados demuestran un elevado grado de satisfacción y de aprovechamiento por parte del estudiantado.

Referencias

[1] P.-I. M. Rui Paulo da Silva Martins. *Analog and Mixed-Signal Circuits in Nanoscale CMOS*. Springer, 2023.

[2] S. Tappertzhofen, “Programmable mixed signal circuits,” SN Applied Sciences, pp. 1-17, 2023.

[3] C. Quintáns Graña. *Simulación de circuitos electrónicos con OrCAD® PSpice®*. Barcelona: Marcombo, 2021.

[4] IEEE Standards Association, IEEE Standard VHDL Analog and Mixed-Signal Extensions (IEEE Std 1076.1™-2017), New York: IEEE, 2018, p. 672.

[5] F. Pecheux, C. Lallement y A. Vachoux, “VHDL-AMS and Verilog-AMS as alternative hardware description languages for efficient modeling of multidiscipline systems,” *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 24, nº 2, pp. 204-255, Feb. 2005.

[6] Siemens Industry Software Inc., “PartQuest™ Explore,” [En línea]. Disonible en: https://explore.partquest.com/.

[7] Microchip Technology Inc., “PIC16F18114/15/24/25/44/45 Full-Featured 8/14/20-Pin Microcontrollers Data Sheet,” 2023. [En línea]. Disonible en: https://www.microchip.com/.

[8] AMD Xilinx, “XADC User Guide UG480 (v1.11),” 13 June 2022. [En línea]. Disonible en :

https://www.amd.com/content/dam/xilinx/support/documents/user_guides/ug480_7Series_XADC.pdf. [Último acceso: febrero 2024].

[9] J. HASLER, “Large-Scale Field-Programmable Analog Arrays,” Proceedings of the IEEE, vol. 108, nº 8, pp. 1283-1302, 2020.

[10] Anadigm, “AN231E04 Datasheet Rev 1.5: Dynamically Reconfigurable dpASP,” 2019. [En línea]. Disonible en:

https://www.anadigm.com/sup_litlibrary.asp.

[11] A. H. v. Roermund, A. Baschirotto y M. Steyaert. *Nyquist AD Converters, Sensor Interfaces, and Robustness.* Springer, 2013.

[12] N. Jia, “ADI Capacitance-to-Digital Converter Technology in Healthcare Applications,” mayo 2012. [En línea]. Disonible en: www.analog.com/analogdialogue.

[13] Analog Devices Inc., “ADIsimDDS (Direct Digital Synthesis),” [En línea]. Disonible en : https://tools.analog.com/en/precisionstudio/.

[14] M. Gómez, C. Quintáns, A. Quintáns y M. D. Valdés, “Enseñanza del amplificador de bloqueo como circuito acondicionador de sensores de medida,” de *XV Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica*, Teruel, 2022.

[15] P. Chow y P. G. Gulak, “A Field-Programmable Mixed-Analog-Digital Array,” de Third International ACM Symposium on Field-Programmable Gate Arrays, Napa Valley, 1995.

[16] C. Quintans, A. Colmenar, M. Castro y M. J. Moure, “A Methodology to Teach Advanced A/D Converters, Combining Digital Signal Processing and Microelectronics Perspectives,” *IEEE Transactions on Education*, vol. 53, nº 3, pp. 471-483, Aug. 2010.

[17] C. Quintáns, J. Fariña y J. J. Rodríguez, “Hands-On Learning of Digital Systems Through Semi-Guided Projects,” *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologias del Aprendizaje*, vol. 12, nº 3, pp. 132-140, Aug. 2017.

[18] S. Orfanidis. *Signal Processing applications, de Introduction to signal Processing*. Prentice Hall International, Inc., 1997, pp. 321-334.

Sistema de medición de flujo de gases para procesos asociados a la economía del Hidrogeno

Rodrigo Spano
Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas (DIIT)
Universidad Nacional de la Matanza (UNLaM)
Buenos Aires, Argentina
rspano@unlam.edu.ar

Ignacio Zaradnik
Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas (DIIT)
Universidad Nacional de la Matanza (UNLaM)
Buenos Aires, Argentina
izaradnik@unlam.edu.ar

Leandro Jaimes Soria
Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas (DIIT)
Universidad Nacional de la Matanza (UNLaM)
Buenos Aires, Argentina
ljaimessoria@unlam.edu.ar

***Abstract*— Sobre la premisa de la integración de conceptos asociados a la economía del Hidrogeno dentro de la carrera de Ingeniería Electrónica, se desarrolló un sistema para la medición del flujo de gases, que incorpora tanto tecnología analógica como digital, permitiendo relacionar diferentes cátedras de la carrera de ingeniería en electrónica. La metodología implementada comprendió el desarrollo del sistema, su evaluación mediante ensayos de laboratorio y el análisis de los resultados obtenidos. A través de esta práctica, se examinan las enseñanzas clave de cada módulo, destacando la sinergia entre teoría y aplicación práctica. Finalmente, se enfatiza la importancia de la colaboración entre distintas áreas del conocimiento para fomentar un aprendizaje integral, concluyendo con los beneficios derivados de esta práctica educativa transversal en la formación de futuros ingenieros electrónicos.**

Keywords—Hidrogeno, medición de flujo, aprendizaje activo, competencias.

I. INTRODUCCIÓN

Ante la creciente urgencia del cambio climático global, el Hidrógeno y sus derivados se presentan como un pilar clave en la transición energética para sustituir los combustibles fósiles y ayudar a la descarbonización del planeta [1]. Esta situación está impulsando a distintos actores de la economía mundial a invertir cada vez más en proyectos vinculados con la cadena de valor del Hidrógeno. Según el estudio presentado por la consultora 'McKinsey & Company' en colaboración con 'The Hydrogen Counsil', se prevé una inversión de USD 320.000 millones para el año 2030 [2]. Argentina está dando sus primeros pasos en la producción de Hidrógeno y su perspectiva es realmente alentadora, con una estimación anunciada por la Secretaría de Asuntos Estratégicos de una producción potencial de 1.000 millones de toneladas de hidrógeno verde para 2030, y una proyección de inversión de USD 90 mil millones para dicho año [3].

Pero estas inversiones deben estar acompañadas con la formación de profesionales en dicha temática. A nivel mundial se encuentran proyectos como: "HySchools", un espacio cofundado por la Unión Europea para la educación en Hidrógeno, que presenta diversos recursos para que los docentes lo incorporen en sus clases [4]; "The Hydrogen International Institute", que buscan impulsar el ámbito laboral vinculado con el Hidrógeno [5] y "TeacHy" que proporciona material didáctico para la incorporación del Hidrógeno en las universidades [6]. Mientras que en la Argentina no se han encontrado proyectos educativos con este foco.

Este contexto, y el nuevo enfoque de enseñanza por competencias y aprendizaje activo propuesto por el CONFEDI (Consejo Federal de Decanos de Ingeniería) [7], impulsó la realización de un análisis sobre la implementación de la temática en la carrera de ingeniería de electrónica de la Universidad Nacional de la Matanza, cuyos resultados se presentaron en el trabajo "Integración de la carrera de Ingeniería Electrónica a partir de tecnologías asociadas al Hidrógeno" [8]. En el mismo, se concluyó que existe un gran interés de los jefes de catedra por la inclusión de la temática en sus materias y en la carrera. Sin embargo, será necesario la implementación de una capacitación niveladora, ya que aproximadamente el 50% de los docentes manifestaron conocer sobre el tema, lo cual se refleja en el bajo porcentaje de ejemplos implementados en la carrera asociados a la economía del hidrogeno y en general a energías renovables.

Como propuesta de abordaje del desafío planteado, y como continuación del trabajo anterior, se desarrolló un sistema de medición de flujo de gases cuyo principal objetivo es propiciar estrategias y experiencias educativas que favorezcan el aprendizaje por competencias. La elección de este sistema se fundamenta en que la medición de flujo es muy importante en el proceso de generación de Hidrogeno a través de electrolizadores, así como también en su posterior uso para generación de energía eléctrica por medio de celdas de combustible. Además, el desarrollo del sistema involucra el empleo de temas de múltiples materias de la carrera (sensores,

acondicionamiento de señal, programación embebida, entre otros), representando un excelente caso de estudio.

II. MÉTODO

La hipótesis adoptada como punto de partida, es que resulta beneficioso para los estudiantes tener un hilo transversal a las diferentes materias de la carrera, donde se vayan integrando los conocimientos adquiridos en cada una de ellas y estimulando la formación por competencias de forma continua. Como se estudia en [9], la formación basada en competencias muchas veces se limita solo a los conocimientos adquiridos en las clases, debilitando al proceso educativo en su conjunto, ya que no se realiza una continuidad en el recorrido de los estudiantes. Por lo tanto, resulta crucial diseñar experiencias de aprendizaje diversas que garanticen una continuidad en el proceso de aprendizaje considerando tanto los aspectos teóricos como empíricos e incorporando diferentes técnicas de enseñanza como pueden ser los ensayos de laboratorio, el abordaje de problemas multidisciplinarios, el diseño y la construcción de modelos y prototipos, entre otras tantas estrategias.

Este estudio propone un enfoque doble para promover la sostenibilidad en la educación universitaria: en primer lugar, fomentar el desarrollo de competencias en los estudiantes para idear tecnologías amigables con el medio ambiente; y, en segundo lugar, la incorporación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas en las estrategias y prácticas universitarias [10].

A partir de estos conceptos referidos a la formación profesional enfocado en un futuro sustentable, fue propuesto el sistema de medición de flujo para Hidrógeno. En la Fig. 1 se puede observar el diagrama en bloques utilizado.

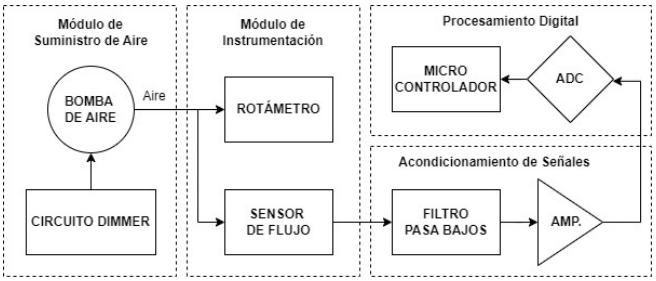


Fig. 1 Diagrama en bloques del sistema

El sistema se implementó adoptando criterios de diseño modular, favoreciendo un análisis detallado de cada uno de sus elementos. Esta metodología estimula el abordaje multidisciplinario, sentando las bases para formar profesionales con una mirada crítica e integral sobre las problemáticas que puedan enfrentarse en el mundo laboral, obteniéndose así un proyecto que materializa los conceptos teóricos y contribuye al aprendizaje activo y enriquecedor de la experiencia educativa.

A. Desarrollo del prototipo

El diseño contempla cuatro módulos: (i) Suministro de Aire, (ii) Instrumentación, (iii) Acondicionamiento de Señales y (iv) Procesamiento Digital, tal como se describen a continuación. Además, se detallan las materias vinculadas con cada uno de ellos, tomando como referencia el Plan de Estudio de Ingeniería Electrónica 2009 de la Universidad Nacional de La Matanza. Así como también se mencionan las competencias especificadas por el CONFEDI que se buscan incorporar en cada caso.

Módulo de Suministro de Aire: El mismo fue implementado con una bomba presurizadora controlada por un circuito tipo Dimmer. De esta forma, al modificar la forma de onda de la señal de alimentación, se logra obtener un flujo de aire variable acorde al rango de trabajo del sensor. El circuito utiliza un TRIAC como elemento de potencia, donde a través de capacitores y resistencias, se logra variar el punto de disparo del mismo. De esta forma la señal de salida se verá recortada, modificando la energía entregada a la carga. En esta primera etapa, se ven involucrados conceptos referidos a la materia Electrónica de Potencia, a través de la cual se plantean las siguientes actividades: Análisis de circuitos para el control de la bomba, cálculo de los componentes asociados, implementación y medición de formas de onda del circuito. Con dichas actividades se busca que el alumno adquiera las siguientes competencias: Planteo, interpretación, modelado, implementación, resolución, análisis y síntesis de circuitos y sistemas electrónicos; Diseño, proyecto y cálculo de circuitos y sistemas electrónicos aplicados a la generación, manejo, amplificación, procesamiento, instrumentación y acondicionamiento de energía eléctrica y señales de distinta naturaleza y; Aprendizaje continuo.

Módulo de Instrumentación: Está formado por un sensor de flujo y un rotámetro que sirve como instrumento patrón. La selección del sensor se basó en estudios previos sobre métodos de medición [11] y la factibilidad del desarrollo de un sensor de flujo masico [12], con lo cual se decidió utilizar el sensor FS1012-1100-NG [13]. El mismo utiliza el principio de dispersión térmica para medir flujo y entregar una señal de tensión que luego será adaptada por la electrónica del módulo de acondicionamiento. Para poder contrastar las mediciones se decidió utilizar como instrumento patrón un Rotámetro Flowtech Z200T-10. Esta segunda etapa se encuentra estrechamente vinculada con los contenidos de las materias Instrumentación de Control, Medidas Eléctricas y Electrónicas y Tecnología Electrónica, planteándose las siguientes actividades: Evaluación de diferentes métodos y técnicas de medición, selección de los más adecuados y de los circuitos y componentes para su implementación, y medición del circuito. A través de las cuales se esperan adquirir las siguientes competencias: Proyecto, dirección y control de la implementación y operación de circuitos y sistemas electrónicos aplicados a la generación, manejo, amplificación, procesamiento, instrumentación y acondicionamiento de energía eléctrica y señales de distinta naturaleza; Identificación, formulación y resolución de problemas de ingeniería electrónica y; Generación de desarrollos tecnológicos y/o innovaciones tecnológicas.

Módulo de Acondicionamiento de Señales: Es el encargado de filtrar y amplificar la señal proveniente del sensor para que luego pueda ser digitalizada por el ADC. Para ello, se implementó un filtro anti-alias de tipo pasa bajos de 50Hz de orden 4 en una topología Sallen-Key. Luego se implementó un amplificador de instrumentación AD620 con los circuitos necesarios para generar las tensiones negativas y el ajuste de la ganancia correspondiente. Aquí se ponen de manifiesto los contenidos vinculados a las materias de Teoría de Circuitos y Electrónica I y II, proponiéndose las siguientes actividades: Análisis y Síntesis de filtros y amplificadores analógicos, con su respectivo diseño teórico y fabricación real, caracterización y medición de los circuitos, evaluación de la

respuesta en frecuencia, pérdidas, ganancia, inmunidad al ruido, y otros parámetros de interés. Esperándose adquirir las siguientes competencias: Planteo, interpretación, modelado, implementación, resolución, análisis y síntesis de circuitos y sistemas electrónicos; Diseño, proyecto y cálculo de circuitos y sistemas electrónicos aplicados a la generación, manejo, amplificación, procesamiento, instrumentación y acondicionamiento de energía eléctrica y señales de distinta naturaleza y; Proyecto, dirección y control de la construcción, implementación y operación de circuitos y sistemas analógicos de acondicionamiento de señales.

Módulo de Procesamiento Digital: En este caso se utilizó un microcontrolador Arduino, el cual dispone de un ADC de 10 bits para convertir la señal acondicionada. Luego de la etapa de digitalización, se aplican diferentes técnicas de filtrado digital para obtener mediciones precisas y estables ante las fluctuaciones del sistema donde se evaluaron filtros de Media Móvil Exponencial y filtros FIR Butterworth y Chebyshev. Además, se diseñó un algoritmo de interpolación de los datos con las curvas teóricas del sensor, con el objetivo de calcular el valor final de flujo tal como fue detallado en [14]. En este módulo se vinculan las asignaturas de Técnicas Digitales y Procesamiento Digital de Señales, donde las actividades propuestas son: Estudio e implementación de circuitos de digitalización de señales, programación de microcontroladores, análisis e implementación de Filtros Digitales, evaluación y medición de la respuesta temporal y en frecuencia del módulo. Buscando que se adquieran las siguientes competencias: Diseño, proyecto y cálculo de circuitos y sistemas digitales, hardware y software de sistemas embebidos y dispositivos lógicos programables.

Asimismo, el sistema de medición de flujo se presenta de forma integral como un objeto de estudio a través del cual se ponen de manifiesto las diferentes etapas del abordaje de un problema de ingeniería: análisis, justificación, desarrollo de una solución y aplicación real. De esta forma, el proyecto favorece a que se adquieran las siguientes competencias: Evaluación y actuación en relación con el impacto social de la actividad profesional en el contexto global y local; Identificación, formulación y resolución de problemas de ingeniería electrónica; Utilización de técnicas y herramientas de aplicación en la ingeniería electrónica y; Generación de desarrollos tecnológicos y/o innovaciones tecnológicas.

B. Ensayos de laboratorio

Complementariamente al desarrollo e implementación del prototipo, se proponen una serie de ensayos de laboratorio asociados a cada uno de los módulos del sistema, los cuales tienen como finalidad ser un espacio de aprendizaje grupal y colaborativo para los estudiantes. Favoreciendo la adquisición de competencias referidas al desempeño en equipos de trabajo, la comunicación efectiva, el aprendizaje continuo y la actuación profesional ética y responsable. Además, estos ensayos permiten que los alumnos puedan verificar el funcionamiento técnico de sus propios circuitos validándolos a través del método científico.

Módulo de Suministro de Aire: Aquí se propone medir la forma de onda generada a la salida del circuito de control y calcular el valor eficaz de la tensión aplicada a la bomba. Para ello, deben ir modificándose los valores de la red de disparo (potenciómetro asociado), y así medir la señal resultante en la salida del circuito. Conociendo la curva de trabajo de la bomba se podrá trazar la curva de flujo de aire en función de la tensión eficaz suministrada para luego validar con las mediciones obtenidas por el rotámetro.

Módulo de Instrumentación: En este caso, el ensayo sugerido consiste en caracterizar el comportamiento de los sensores escogidos para la aplicación. En primera instancia, el sensor de flujo se evaluará sin el suministro de aire, esto permitirá analizar la estabilidad de las termopilas internas y estimar las compensaciones requeridas. Luego, se inyectará aire en la entrada del sensor y se irá recorriendo todo su rango de trabajo (0 a 10 LPM). En cada punto de la curva se medirá el valor obtenido por el sensor y se contrastará con el rotámetro, de esta forma será posible estimar la precisión y la exactitud de las mediciones.

Módulo de Acondicionamiento de Señales: Se propone evaluar el filtro y el amplificador de forma independiente. Para analizar el filtro, se realizará un barrido en frecuencia inyectando en la entrada del circuito una señal senoidal de frecuencia variable. Se medirá con el osciloscopio la salida del circuito obteniéndose así la curva de respuesta en frecuencia y se cuantificarán las pérdidas del filtro, el ancho de banda y la atenuación en la banda de rechazo.

Para la evaluación del amplificador, el ensayo propuesto se compone de dos partes. En primer lugar, se medirá el offset y el piso de ruido del circuito, para ello se colocarán a tierra los terminales de entrada y con un osciloscopio se medirá la salida. Luego se calibrará el circuito hasta obtener el offset apropiado. En segundo lugar, se medirá la ganancia del circuito, por lo que se inyectará en la entrada una señal de amplitud conocida y se ajustará la resistencia de retroalimentación del amplificador hasta obtener la amplitud deseada. Con estos ensayos se verificará que la señal de tensión provista por el sensor pueda ser acondicionada para que el ADC realice la digitalización.

Módulo de Procesamiento Digital: Se digitalizará la señal proveniente del sensor luego de haber sido acondicionada, para poder luego medir la respuesta del filtro digital implementado. Se compararán los datos provenientes de la señal sin filtrar y de la señal filtrada cuantificando el comportamiento. Además, se generarán excitaciones de flujo de tipo escalón para poder medir la respuesta del filtro y analizar el tiempo de retardo, tiempo de subida, sobre picos y oscilaciones. También deberá validarse el cálculo del flujo a partir del algoritmo de interpolación con la curva característica del sensor. Para ello se observará la señal de tensión digitalizada y se analizará el valor de flujo asociado, buscando encontrar similitudes y desviaciones.

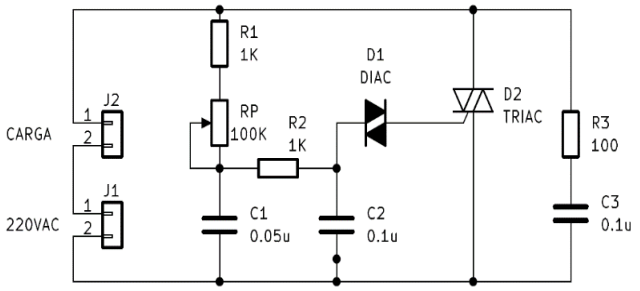


Fig. 2 Circuito Dimmer con TRIAC

C. Resultados

A continuación, se presentan los circuitos y resultados de las mediciones durante el ensayo vinculados a cada módulo del sistema.

Módulo de Suministro de Aire: Se desarrolló un circuito Dimmer tal como se observa en la Fig. 2. El mismo utiliza un Triac como elemento de potencia, cuya señal de disparo es controlada por la red compuesta por *R1, RP, C1* y el Diac. Esta señal permite que el Triac conduzca parcialmente en cada semiciclo de la tensión alterna, recortando la señal de salida. De esta forma la potencia efectiva entregada a la carga se ve reducida.

Variando el potenciómetro *RP* se obtienen distintos puntos de disparo que generan señales de salida con mayor o menor valor RMS, dando como resultado una variación en el flujo de aire suministrado por la bomba. Para medir dicho circuito se utilizó el osciloscopio 'RIGOL DS1302CA' donde se analizó la forma de onda entregada a la carga, como puede verse en la Fig. 3. Posteriormente, se realizaron variaciones del potenciómetro RP desde su valor mínimo hasta su máximo, midiéndose con un multímetro 'UNIT-T UT216' el valor de tensión RMS en cada caso.

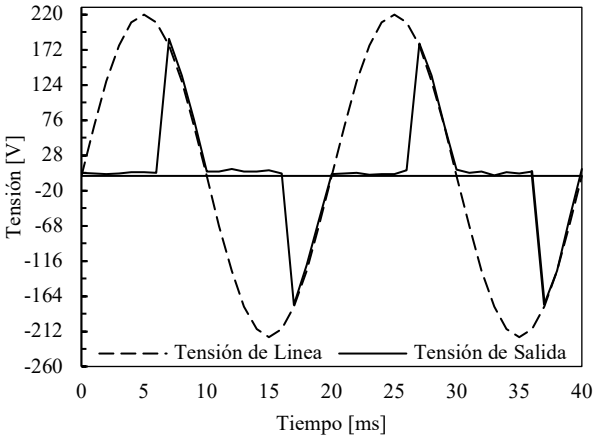


Fig. 3. Formas de onda del Dimmer

Módulo de Instrumentación: Se dispuso del sensor FS1012-1100-NG el cual presenta una salida de tipo diferencial como se observa en la Fig. 4. El sensor contiene un elemento calefactor energizado por una tensión continua (HTR1 y HTR2). El calor suministrado por dicho elemento genera variaciones en la tensión entregada por las termopilas TP1 y TP2, de esta forma la diferencia de tensión entre ambas permite conocer el flujo de aire existente dentro del sensor. Este valor de flujo puede ser comparado con la indicación mecánica que se muestra en el rotámetro Flowtech Z200T-10.

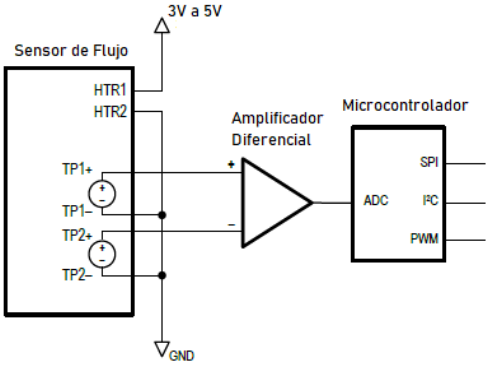


Fig. 4. Circuito del Sensor de Flujo FS1012-1100-NG

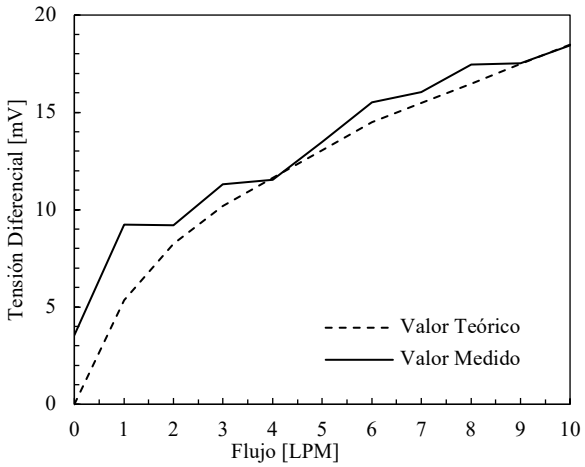


Fig. 5. Curva de tensión diferencial del sensor

En cuanto a los ensayos del sensor, los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 5. Aquí se inyectó un flujo de aire la entrada del sensor y se midió con un multímetro 'UNIT-T UT216' las tensiones proporcionadas por las termopilas. Con estos datos se calculó el diferencial de tensión entregado por el sensor (TP1-TP2) y se comparó con la curva que el fabricante presenta en la hoja de datos.

Módulo de Acondicionamiento de Señales: Aquí se desarrolló un filtro pasa bajos de 4to orden siguiendo una topología Sallen Key como se observa en la Fig. 6. La frecuencia de corte se estableció en 50 Hz y la atenuación en la banda de rechazo se sitúa en -40 dB.

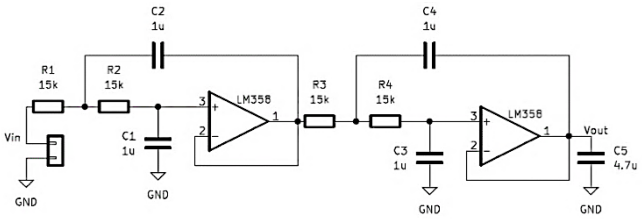


Fig. 6. Filtro pasa bajos diseñado

Para evaluar la respuesta del filtro se realizó un barrido en frecuencia con el Generador de Señales 'RIGOL DG1022', en el rango de 0 Hz a 1000 Hz. Se midió la salida del circuito utilizando la función FFT del Osciloscopio 'RIGOL DS1302CA' y la respuesta en frecuencia obtenida se presenta en la Fig. 7.

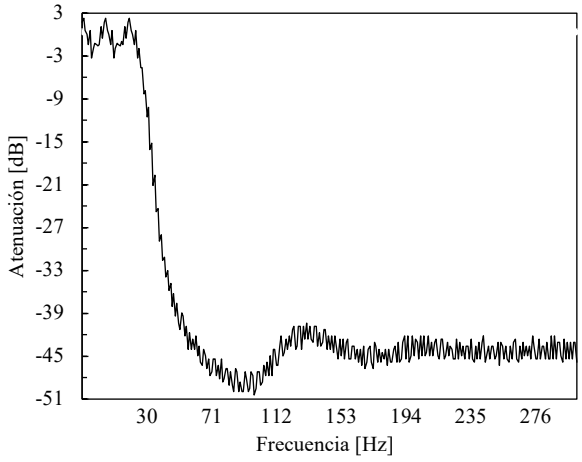


Fig. 7. Respuesta en frecuencia del filtro

A continuación del filtro se dispuso de un amplificador diferencial siguiendo la topología presentada en la Fig. 8. Para ello, se utilizó un amplificador de instrumentación AD620 el cual dispone de una tensión de offset ajustable a través de la red compuesta por el LM358 y el divisor resistivo de su entrada. De esta forma es posible calibrar el offset del circuito variando el potenciómetro *RP2*. Por otra parte, la ganancia del sistema está definida por la resistencia colocada entre los terminales *Rg*, por lo que variando el potenciómetro *RP1* fue posible establecer la ganancia total en un valor de $G = 200$.

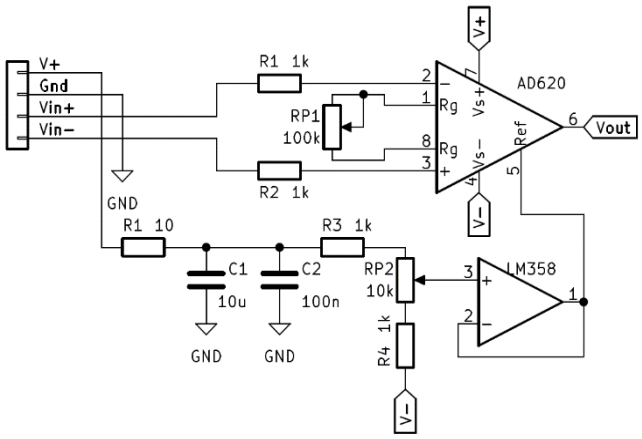


Fig.8. Amplificador Diferencial con AD620

Para poder verificar la respuesta del amplificador se inyectó una tensión diferencial en los terminales de entrada y utilizando el multímetro 'UNIT-T UT216' se midió la tensión de salida. La curva obtenida se presenta en la Fig. 9.

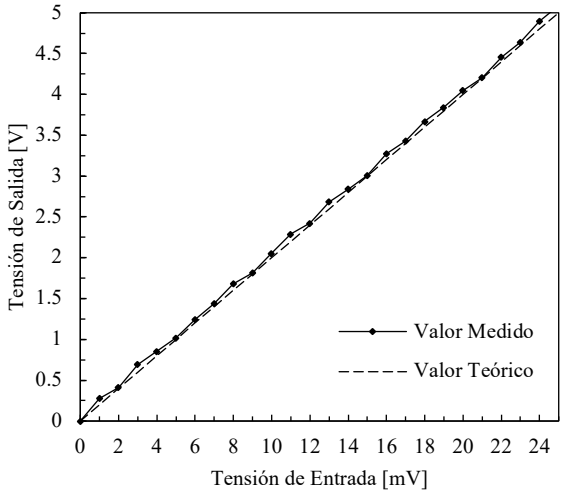


Fig. 9. Curva del amplificador diferencial

Módulo de Procesamiento Digital: En este ensayo se evaluaron diferentes filtros digitales y se simuló el algoritmo de interpolación de la curva del sensor. Para los filtros se evaluaron tres topologías: filtro de media exponencial, filtro IIR Chebyshev y filtro IIR Butterworth. Las ecuaciones de los filtros implementados son:

Filtro de media exponencial:

$$Y(n) = \big(\alpha \cdot X(n)\big) + \big((1-\alpha) \cdot Y(n-1)\big) \qquad (1)$$

Donde:

$Y(n) = valor\ filtrado$
$Y(n-i) = valor\ filtrado\ previo$
$X(n) = muestra\ actual$
$\alpha = coeficiente\ de\ ponderación$

El valor del coeficiente de ponderación $\boldsymbol{\alpha}$ tiene un valor de 0,05 y fue sintonizado para obtener una atenuación porcentual mayor al 80% de la señal de entrada.

Las ecuaciones en diferencia asociadas a los filtros Chebyshev y Butterworth fueron obtenidas para una Frecuencia de corte de 2 Hz, una Frecuencia de muestreo de 100 Hz, un Ripple en la banda de paso igual a 0,1 dB y el Orden del filtro igual a 2.

Filtro IIR Chebyshev:

$$Y(n) = 0.0112\,X(n) + 0.0223\,X(n-1) + 0.0112\,X(n-2) + 1.6980\,Y(n-1) - 0.7432\,z^{-2}\,Y(n-2) \qquad (2)$$

Filtro IIR Butherworth:

$$Y(n) = 0.0036\,X(n) + 0.0072\,X(n-1) + 0.0036\,X(n-2) + 1.8227\,Y(n-1) - 0.8372\,z^{-2}\,Y(n-2) \qquad (3)$$

La implementación de estos filtros fue realizada en una placa 'Arduino Uno' el cual integra un microcontrolador ATMega328P. En la Fig. 10 pueden observarse las respuestas obtenidas para cada uno de los filtros a partir de la señal de entrada.

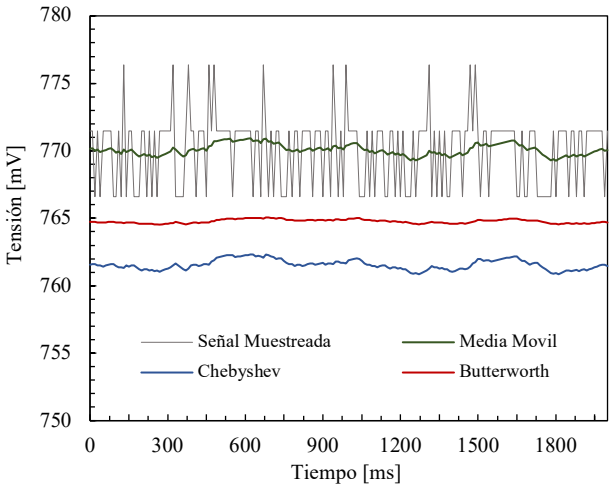


Fig. 10. Respuesta temporal de los filtros digitales

III. Discusión

La implementación de este sistema propuesto como herramienta pedagógica demuestra la sinergia entre teoría y práctica en la formación de ingenieros electrónicos. A continuación, se discute los aportes de cada componente del sistema y sus dificultades o desafíos:

Módulo de Suministro de Aire: el foco está en la importancia de mostrarle a los estudiantes la dificultad e importancia de saber controlar variables de potencia electrónica con precisión durante la experiencia. Este módulo subraya la necesidad de una comprensión profunda de la electrónica de potencia y es importante destaca cómo una comprensión superficial puede llevar a resultados erróneos en la experimentación.

Módulo de Instrumentación: en esta etapa del circuito los estudiantes exploran la aplicación de conceptos de termopilas y medición diferencial. La observación de fluctuaciones en las mediciones debido a variaciones ambientales o ruidos externos e internos e introduce a los

estudiantes a desafíos reales de la instrumentación y el procesamiento de señales, planteando la necesidad de un posterior procesamiento digital.

Módulo de Acondicionamiento de Señales: El diseño e implementación de un filtro pasa bajos y un amplificador diferencial permiten a los estudiantes aplicar teoría de circuitos y electrónica analógica en la creación de sistemas funcionales. La práctica de calibración del offset y ajuste de la ganancia refuerza la comprensión de los estudiantes sobre la importancia de la precisión y el tratamiento de señales en el diseño de sistemas electrónicos.

Módulo de Procesamiento Digital: La evaluación de diferentes filtros digitales y la simulación del algoritmo de interpolación de la curva del sensor ofrecen a los estudiantes una experiencia directa con el procesamiento digital de señales. Esta parte del laboratorio fomenta el desarrollo de habilidades en programación y análisis de datos, mostrando la importancia del manejo efectivo de señales para obtener resultados precisos y confiables.

Aunque el proyecto ha proporcionado valiosas lecciones prácticas, se han identificado desafíos especialmente en la realización de pruebas que simulen condiciones reales de manera más precisa. La limitación principal radica en la falta de acceso a laboratorios especializados para pruebas con hidrógeno, lo que nos obligó a utilizar aire como sustituto. Esta aproximación, si bien útil, subraya la brecha entre la experimentación educativa y las aplicaciones industriales reales, marcando un área para mejoras futuras.

IV. CONCLUSIONES

Este proyecto demuestra la eficacia de un modelo educativo que interconecta conocimientos de distintas disciplinas para enriquecer la experiencia de aprendizaje, alineándose con las tendencias educativas actuales de enfocarse en competencias y prácticas. Este enlace interdisciplinario, lejos de ser una simple acumulación de saberes, se convierte en un eje transversal que facilita la experiencia de aprendizaje resaltando la importancia de una educación integrada. Esta metodología prioriza el aprendizaje basado en competencias y experiencias prácticas, un enfoque promovido por instituciones como el CONFEDI en Argentina.

Al mismo tiempo, esta práctica educativa evita la tendencia hacia prácticas puramente empíricas, manteniendo un equilibrio entre la teoría y la aplicación real. Proyectos de esta índole hacen accesibles conceptos teóricos avanzados, aplicándolos en contextos prácticos que van desde el diseño electrónico hasta el análisis de los métodos medición y evaluación del sistema, lo que no solo demuestra la aplicabilidad de la teoría sino que también resalta su importancia, mejorando significativamente su enseñanza y su pertinencia en el mundo real.

Este enfoque establece un vínculo importante entre la academia y el mercado laboral, esto se vincula con el trabajo publicado en el Congreso TAEE 2022 [8], subrayando la necesidad de abordar temáticas emergentes, como la tecnología del hidrógeno y las energías renovables que prometen nuevas oportunidades laborales. Al adelantarse a las tendencias tecnológicas futuras, el proyecto no solo prepara a los estudiantes para los desafíos inminentes del sector energético, sino que también destaca la importancia de continuar explorando y desarrollando proyectos que integren estas áreas clave, asegurando así que la formación en ingeniería permanezca al frente de la innovación y relevancia en el cambiante paisaje global.

REFERENCIAS

[1] International Energy Agency. “CO2 Emissions in 2022”, 2023.

[2] Hydrogen Council, McKinsey & Company, “Hydrogen Insights 2023: An update on the state of the global hydrogen economy, with a deep dive into North America”, 2023.

[3] Presidencia Argentina, Subsecretaría de Asuntos Estratégicos. “Estrategia Nacional para el Desarrollo de la Economía del Hidrógeno”. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2023/07/estrategia_nacional_de_hidrogeno_-_sae.pdf

[4] HySchools, 2024 [Online]. Disponible en: https://www.hyschools.com/

[5] The Hydrogen International Institute, 2024 [Online]. Disponible en: https://hydrogeninstitute.com/

[6] Iordache I., Dumbrava V., Steinberger W. R., Al-Mufanchi N., “TeacHy – A flagship project for teaching fuel cell and Hydrogen technology”. 23rd World Hydrogen Energy Conference, 26-30 June 2022, Istanbul.

[7] Consejo Federal de Decanos de Ingeniería - CONFEDI. “Propuesta de Estándares de segunda generación para la acreditación de carreras de ingeniería en la República Argentina – Libro Rojo de CONFEDI”. Argentina, 2018.

[8] Zaradnik I., Jaimes Soria L., Brengi D., Spano R. “Integración de la carrera de Ingeniería Electrónica a partir de tecnologías asociadas al Hidrógeno”. TAEE, 2022.

[9] Magda F C., Rueda Manzano M., Luis Efraín C., & Luisa Carolina V. "Formación por competencias: Reto de la educación superior ". Revista de Ciencias Sociales (Ve) XXV, no. 1 (2019): . Redalyc, https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=28059678009

[10] Ramos Torres D. “Contribución de la educación superior a los Objetivos de Desarrollo Sostenible desde la docencia”. Revista española de educación comparada. 2021, n. 37, enero-junio ; p. 89-110.

[11] Fauroux, Degaetani y Juárez. “Analisis comparativo de sensores para flujo de hidrogeno”. Revista Digital del Departamento de Ingenieria e Investigaciones Tecnologicas de la Universidad Nacional de la Mataza,num 7.

[12] Leandro Soria, Ignacio Zaradnik, Rodrigo Spano, Diego Brengi, Alejandro Martinez. “Selección de sensores y actuadores para un controlador de flujo másico de hidrogeno”. Libro de actas 6to Congreso Argentino de Ingeniriería y 12avo Congreso Argentino de enseñanza de Ingenieria, Resistencia (Chaco) y Corrientes (Capital), 2022.

[13] Reneras Electronics Corporation. (2018). Datasheet Gas and Liquid Flow Sensor Module FS1012 [Online]. Disponible en: https://www.renesas.com/us/en/document/dst/fs1012-datasheet?r=344046

[14] Zaradnik I., Jaimes Soria L., Spano R., “Evaluación de Filtros Digitales para la Medición del Flujo de Hidrógeno”. CASE, 2023.

Un acercamiento a la enseñanza de teoría de señales mediante utilitarios de cálculo

Silvano R. Rossi
Dpto. Ing. Electromecánica - Núcleo INTELYMEC – CIFICEN (UNCPBA-CICPBA-CONICET)
Facultad de Ingeniería, UNCPBA
Olavarría, Argentina
srossi@fio.unicen.edu.ar

Roberto J. de la Vega, Franco E. Déber, Carolina Puglisi
Dpto. Ing. Electromecánica – Núcleo INTELYMEC
Facultad de Ingeniería, UNCPBA
Olavarría, Argentina
{rjdlv, fdeber, cpuglisi}@fio.unicen.edu.ar

Adriana L. Rocha
Dpto. de Formación Docente - Núcleo GIDCE
Facultad de Ingeniería, UNCPBA
Olavarría, Argentina
arocha@fio.unicen.edu.ar

***Abstract*— Se describe la propuesta docente implementada en la asignatura Introducción a la Teoría de Señales, correspondiente a la carrera Tecnicatura Universitaria en Electromedicina de la Facultad de Ingeniería-UNCPBA. Se presenta el enfoque detallado dado a la asignatura en el contexto de la carrera junto a la propuesta de enseñanza mediante utilitarios para cálculo numérico y tratamiento de señales. Dicha propuesta busca recurrir al fundamento matemático riguroso en la medida de lo necesario, de acuerdo al profesional que se requiere formar. Se presentan aspectos metodológicos de la propuesta de enseñanza, se discuten sus aspectos centrales y se presentan ejemplos del uso de utilitarios de cálculo y software de simulación empleados durante el desarrollo de la asignatura.**

Keywords—señales, tiempo y frecuencia, simulación, utilitarios, Moodle

I. INTRODUCCIÓN

En términos de su relación con el equipamiento biomédico, el técnico egresado de la carrera Tecnicatura Universitaria en Electromedicina (TUE) de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA) que se desempeña en servicios de tecnología biomédica, debe poseer la capacidad de identificar y caracterizar señales típicas en sistemas eléctricos y electrónicos, adquiriendo destrezas para su interpretación en diferentes contextos. Además deberá trabajar, siempre desde el punto de vista técnico-tecnológico, con señales más complejas en su diferenciación, tratamiento, interpretación y caracterización, como las de electrocardiograma (ECG), electroencefalograma (EEG) y electromiograma (EMG), entre otras. En estos casos, la morfología de la señal, su amplitud y ancho de banda, por citar alguna de las características principales, resultan fundamentales desde el punto de vista práctico. Por ello, no sólo el sustento matemático que permite describir a determinado fenómeno es crucial para comprenderlo, sino también su visualización (simulación y/o animación), en particular cuando se trata de señales. Junto a la teoría y a las actividades experimentales, el uso de las herramientas gráficas, así como los utilitarios de cálculo con posibilidad de análisis gráfico, son relevantes para la caracterización de estas señales de acuerdo al perfil del profesional que se está formando [1-3]. En el campo de la teoría de señales y sistemas, uno de los grandes desafíos radica en que el análisis de las señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia conlleva un sustento matemático que, en determinados casos, puede tener una complejidad importante [4]. La cuestión es hasta qué punto se profundiza dicho sustento y se lo equilibra con la simulación/visualización y la actividad experimental, para no sacar de escena el enfoque práctico en la formación del estudiante. Esto se da, a su vez, en un contexto de cambios constantes [5-7]. Pueden mencionarse los cambios metodológicos y las readecuaciones gestadas durante la pandemia de Covid-19 [8], que han dejado una importante experiencia, haciendo que los nuevos enfoques y recursos tecnológicos que sustentaron y sustentan la modalidad virtual se utilicen hoy también como herramientas en cursos presenciales [9], [10].

En este trabajo se presenta la propuesta de enseñanza desarrollada en el marco de la asignatura Introducción a la Teoría de Señales (ITS), correspondiente al segundo cuatrimestre del plan de estudio de la TUE.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección II se contextualiza la propuesta. En la Sección III se describen los aspectos metodológicos, considerando el desarrollo de la asignatura y los objetivos de aprendizaje. En la Sección IV se trata el uso de utilitarios de cálculo y software de simulación empleados en la asignatura. En la Sección V se comenta sobre los resultados obtenidos y, en la Sección VI, se realiza una discusión sobre la implementación de la propuesta. Finalmente se exponen las conclusiones del trabajo.

II. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA PROPUESTA

La presente propuesta es el resultado de una adecuación metodológica e innovación realizada entre los años 2020 y 2021, en contexto de virtualidad y posteriormente readecuada.

ITS posee una carga horaria presencial de 90 horas y se desarrolla en el segundo cuatrimestre de la carrera, cuya duración es de seis semestres (tres años) (www.fio.unicen.edu.ar). En dicha carrera se abordan, en general, temáticas relacionadas con acondicionamiento de señales, análisis de circuitos eléctricos y electrónicos, análisis de diagramas en bloques y esquemáticos del principio de funcionamiento de equipamiento biomédico.

En relación a sus competencias de egreso, el Técnico Universitario en Electromedicina posee fundamentos teóricos y metodológicos que contribuyen al conocimiento, la comprensión, el análisis y la evaluación de sistemas o componentes electrónicos de equipamiento para medicina.

En dicho contexto, la asignatura es una primera aproximación a las temáticas específicas de la carrera, abordando desde una perspectiva conceptual y procedimental

el análisis e interpretación de señales en los dominios del tiempo y de la frecuencia. Al finalizar la asignatura se espera que el estudiante sea capaz de reconocer las características principales de una señal tanto en el tiempo continuo como discreto; representar y analizar señales tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia; interpretar el concepto de filtrado y correlación; y emplear utilitarios de tratamiento y análisis de señales. Se considera que la capacidad de visualizar señales en ambos dominios, indistintamente, es necesaria y fundamental para comprender el funcionamiento de circuitos, sistemas y diferentes operaciones orientadas al mantenimiento y reparación del equipamiento biomédico y tecnologías afines.

III. Descripción de la Propuesta

A. Desarrollo de la Asignatura

Previo al inicio de ITS, los estudiantes cursan la asignatura Matemática Aplicada, en la que se espera que desarrollen una base de conocimiento que les permita entender las expresiones fundamentales relacionadas con el procesamiento de señales. A la luz de esta formación inicial en matemática y lo que se pretende en relación al desarrollo profesional del futuro graduado, se requiere que ITS tenga un carácter teórico-práctico, con el sustento matemático necesario, acompañado con un fuerte contenido de análisis visual de las señales a partir del empleo de utilitarios y programas de cálculo y con el soporte de actividades experimentales mediante la utilización de equipamiento e instrumentos de medida para la caracterización y visualización de señales en tiempo real. La asignatura se organiza y planifica en torno a las siguientes premisas:

- Se recurre a la matemática en la medida de lo necesario;
- Se emplean utilitarios y software libre para la simulación y/o cálculos necesarios;
- Se trabaja en actividades de tipo experimental, utilizando instrumentos de medición;
- Se realiza evaluación continua formal e informal.

La asignatura cuenta con un aula virtual que se aloja actualmente en la plataforma institucional FIO Virtual, basada en Moodle (https://virtual.fio.unicen.edu.ar/elearning1). En el sitio se dispone el material de la propuesta didáctica: guías de estudio, secuencia de scripts y programas de ejemplo realizados con utilitarios de cálculo y/o simulación, cuestionarios, tareas, informes de avance de actividades y material multimedia. Los estudiantes que pertenecen al curso vigente tienen acceso a la planificación de la asignatura, cronogramas y material de clase. Además, pueden realizar consultas a través de los espacios de novedades y foro de intercambio.

Los contenidos conceptuales definidos para ITS son los siguientes: 1) Introducción a las señales continuas y discretas, 2) Análisis de una señal en el dominio del tiempo, 3) Análisis de una señal en el dominio de la frecuencia y 4) Herramientas para el tratamiento y análisis de señales. También se considera la contribución a los contenidos procedimentales, tales como: uso de programas de cálculo numérico, de procesamiento y visualización de señales, redacción de informes de avance escritos y presentaciones orales de los temas desarrollados. Además, se considera la contribución a los contenidos actitudinales, tales como: creación de hábitos para el aprendizaje autónomo y cumplimiento de normas y plazos.

B. Objetivos y Actividades de Aprendizaje

En la Tabla I se detallan los objetivos de aprendizaje, las actividades de aprendizaje y los recursos utilizados para llevar adelante la asignatura, de acuerdo a lo planificado.

De acuerdo a la Taxonomía revisada de Bloom [11], [12], el primer objetivo se vincula con las habilidades de pensamiento de orden inferior, como recordar y comprender, el segundo objetivo, se relaciona con las de orden medio a superior (analizar) y el tercer objetivo, nuevamente con comprender. Este ordenamiento se considera coherente con los conocimientos previos que el estudiante posee al cursar ITS y con la ubicación de dicha asignatura en el plan de estudios de la carrera.

En relación a las actividades de aprendizaje, la exposición docente dialogada se refiere al tipo de interacción que éste tiene con los estudiantes del gran grupo. En la forma dialogada, que es la preponderante, se establecen acuerdos para realizar determinadas actividades y se registra participación activa de los alumnos. En la exposición no dialogada hay una interacción mínima con los estudiantes. Esta última es la forma menos frecuente, no obstante, necesaria para algunos contenidos.

La actividad de lápiz y papel hace referencia a la resolución, por parte de los estudiantes, de un problema o ejercicio particular de la forma clásica. Esto resulta útil al inicio de la asignatura cuando se pretende que el estudiante sea capaz de, por ejemplo, esbozar la forma de señal correspondiente a la variación del flujo de aire en la respiración de un individuo en reposo, o para representar la variación de la temperatura de un horno una vez que se enciende.

TABLA I. Objetivos y Actividades de Aprendizaje

Objetivos de Aprendizaje	**Actividades de Arendizaje**	**Recursos Utilizados**
Reconocer las características principales de una señal tanto en el tiempo continuo como discreto	-Exposición docente dialogada y no dialogada -Actividad de lápiz y papel -Resolución de ejercicios -Actividad experimental	-Sitio de la asignatura (material de clases), sitios de internet, -Guías de estudio -Utilitarios de cálculo -Instrumentos de medición -Mesas de trabajo
Representar y analizar señales tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia	-Exposición docente dialogada -Resolución de ejercicios -Actividad experimental	-Sitio de la asignatura (material de clases), sitios de internet, -Guías de estudio -Utilitarios de cálculo y software de simulación - Instrumentos de medición -Mesas de trabajo
Interpretar el concepto de filtrado y correlación	-Exposición docente dialogada -Observación interpretativa -Resolución de ejercicios -Actividad experimental	-Sitio de la asignatura (material de clases) -Videos -Guías de estudio -Software de simulación -Software para grabación y edición de audio -Instrumentos de medición -Mesas de trabajo

La resolución de ejercicios es una actividad de aprendizaje que puede surgir espontáneamente durante el desarrollo de una exposición dialogada o puede tratarse de una actividad de las que se proponen en la guía de estudio. En la mayoría de los casos estos ejercicios requieren trabajar con simulaciones.

En las actividades experimentales los estudiantes entran en contacto con instrumental de laboratorio para analizar datos, plantear inquietudes y preguntarse a sí mismo o al grupo, cuestiones relacionadas al fenómeno que se está analizando. Este formato se planteó considerando la importancia de la actividad experimental con características de exploración y no como un espacio de práctica totalmente estructurada [13]. Dicha actividad puede requerir de simulación realizada mediante un utilitario o software de simulación. Dichas prácticas podrían clasificarse como actividades de laboratorio del tipo predecir-observar-explicar-reflexionar, de acuerdo a lo propuesto por Leite [14], pero con un acercamiento a la exploración.

La observación interpretativa, hacia el final de la asignatura, corresponde a una o más tareas extra clase, en las que los estudiantes generalmente miran un video, previo a una clase.

En cuanto a los recursos empleados, las guías de estudio se piensan como soporte para el aprendizaje que el estudiante va construyendo. Se trata de conceptos básicos, con algunos problemas abiertos y el incentivo al uso de determinados utilitarios de cálculo y/o simulación como herramientas para la interpretación y caracterización de señales. Los instrumentos de medición y accesorios se emplean en las actividades experimentales, en mesas de trabajo. Se utilizan fuente de alimentación, generador de señales, osciloscopio digital y multímetro y, en ocasiones, algunos dispositivos sensores. Nuevamente estas actividades se acompañan de la utilización de utilitarios de cálculo y/o software de simulación.

Para evaluar los aprendizajes se utiliza la forma de evaluación continua porque permite que el estudiante pueda tener un mayor control de su aprendizaje, a la vez que las evaluaciones son más frecuentes, posibilitando una construcción del conocimiento más progresiva y, por otro lado, la retroalimentación se hace más efectiva, permitiendo realizar acciones correctivas a tiempo [15]. En este contexto, la evaluación en ITS se desarrolla a través de una serie de instancias, siendo estas informales o formales, con devoluciones de carácter formativo. Las evaluaciones informales comprenden preguntas y observación de actividades de los estudiantes, sin calificación. Las evaluaciones formales comprenden exámenes parciales, resolución de cuestionarios (sobre las guías de estudio en desarrollo) y entrega de informes de avance individuales y/o grupales. Las evaluaciones parciales están pensadas para ser resueltas en un tiempo acotado no mayor a los 40 minutos, mientras que los cuestionarios, suponen un tiempo de resolución de 10 a 15 minutos. Un punto importante a destacar es que se emplea mayoritariamente la observación sobre resultados de simulación, a fin de obtener una conclusión sobre la misma.

IV. Utilitarios de Cálculo y Software de Simulación Utilizados

A. *Uso de Geogebra*

Geogebra, de Licencia GNU, ofrece una serie de utilitarios para la enseñanza de matemática, que permite crear aplicaciones personalizadas [16]. Es de suma utilidad en los inicios de la asignatura para ayudar a comprender gráficamente, por ejemplo, que ocurre al sumar dos señales senoidales de similares o diferentes características, pudiéndose apreciar distintas situaciones típicas que se observan en fenómenos físicos, como la interferencia constructiva, la interferencia destructiva y el batido. En la Fig.1 se muestra un ejemplo para ilustrar la suma (f(x)) de dos funciones senoidales (y1(x) e y2 (x)) de igual fase y frecuencia, pero de diferentes amplitudes. Este ejemplo es útil para observar la interferencia constructiva de señales.

Posteriormente se introduce la idea de que, si se suman varias funciones senoidales con características especiales, se puede obtener como resultado una función específica, como, por ejemplo, rampa, cuadrada o triangular. Esto conduce gradualmente al concepto de armónico de una señal y a la serie de Fourier.

B. *Uso de GNU Octave*

A medida que se avanza con los contenidos de la asignatura se emplea gradualmente el software GNU Octave [17], de gran utilidad para el cálculo numérico, como herramienta para la realización de scripts con el fin de simular y analizar diferentes casos prácticos. Aquí se plantean ejercicios que parten de ejecutar un script con el objetivo de realizar distintas actividades.

Por ejemplo, sumar funciones y a partir de ello determinar el orden máximo de la suma para lograr una función cuadrada que se asemeje a la ideal, lo que le permite al estudiante describir sus características. En la Fig. 2 se muestra la gráfica que surge a partir de ejecutar un script en el que se suman n señales para conformar una onda de tipo cuadrada, rampa o triangular, graficando, en el ejemplo, las señales de orden 1, 2 y 3 y la suma de las 3 señales consideradas.

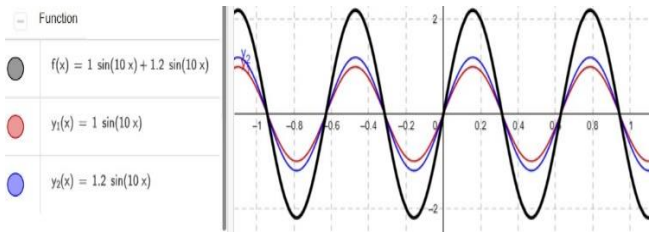


Fig. 1. Empleo de Geogebra para visualizar la suma de señales.

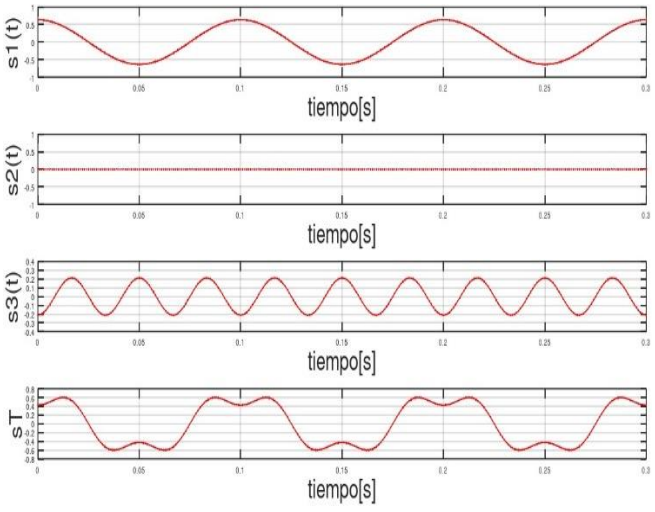


Fig. 2. Empleo de GNU Octave – Suma de n señales.

Otro de los aspectos fundamentales que se trata en la asignatura es el análisis de señales en el dominio de la frecuencia mediante la representación del espectro de amplitud y fase de la señal. Se tratan aquí el concepto de armónico y posteriormente el concepto de serie de Fourier, la Transformada Discreta de Fourier (TDF) y la Transformada Rápida de Fourier (FFT). En la Fig. 3 se muestra el gráfico obtenido a partir de la ejecución de un script que calcula la FFT de una señal, graficando la señal y su espectro de amplitud. Esto se logra empleando directamente la función de Octave fft(). Para ello se requiere definir el tipo de señal y sus valores característicos y una cantidad entera de ciclos y muestras por ciclo para definir el muestreo. Aquí se analizan, a través de diferentes ejemplos, los aspectos necesarios para la interpretación de la FFT, considerando el espaciado frecuencial de sus elementos, la simetría de la TDF y el escalado de los elementos de la FFT. Se espera llegar finalmente a que el estudiante sea capaz de interpretar la relación entre el número de muestras y la resolución en frecuencia.

C. Uso de Audacity y Octave

Una de los aspectos destacados que posee Octave para este tipo de usos es que se pueden generar scripts para interpretar diferentes tipos de archivos.

Esto permite almacenar la información de señales en archivos, cuyo formato depende de las características de la información que se desea guardar, como en formato de texto (.txt) y en formato de audio (.wav). Así, por ejemplo, se puede analizar la señal de ECG cuyas muestras se almacenan en un archivo en formato de texto, solicitándole al estudiante describir cualitativamente la señal en el dominio del tiempo, luego cuántas y cuáles componentes en frecuencia se observan, para determinar el rango de frecuencias de las componentes presentes en un ECG y en base a lo anterior analizar cuál podría ser la frecuencia de muestreo mínima para muestrear dicha señal.

Además, como análisis de señales en el dominio del tiempo, puede realizarse la correlación entre dos señales de audio almacenadas en archivos en formato de audio, que corresponden al sonido de letras generadas por voz. Por ejemplo, se encontrarán diferentes resultados al correlacionar la señal de audio correspondiente a la letra *a* con el de la letra *b* (correlación cruzada) y el de la letra *a* con sí misma (autocorrelación), permitiendo el reconocimiento de patrones.

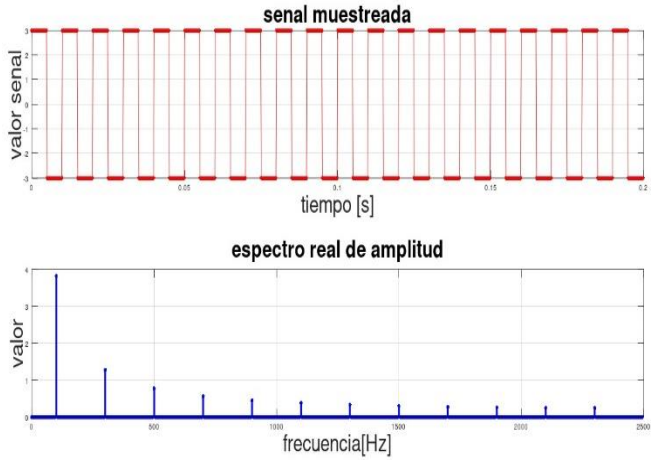


Fig. 3. Empleo de GNU Octave – FFT.

Este último caso se muestra en la Fig. 4 en que un script lee la información de las muestras almacenadas en dos archivos y realiza la correlación entre ambas, como las señales son iguales se presenta un valor máximo en t=0, característico de la autocorrelación.

Para la grabación de audios se empleó el software Audacity de licencia tipo GPL, que permite grabar y editar audio en formatos estándar [18]. Se optó por esta opción, dado su tipo de licencia, su facilidad de uso e interfaz de usuario intuitiva, permitiendo una rápida familiarización por parte de los estudiantes y docentes, además de ser multiplataforma.

V. Resultados Obtenidos

Durante los últimos cuatro años la implementación gradual de la propuesta ha mostrado una mejora en los aprendizajes por parte de los estudiantes, hecho que se ha evidenciado principalmente en los resultados de las diferentes evaluaciones que se realizaron en el marco de la asignatura. En el período 2021-2023, el porcentaje de aprobación de la asignatura se mantuvo entre 80 % y 90 %, registrándose una disminución de la deserción.

En la Tabla II se presentan los aspectos salientes de los aprendizajes relevados, en la medida que se fue implementado la propuesta. Se clasificaron aquellos aspectos de los aprendizajes considerados más importantes con respeto a los objetivos planteados en la planificación de la asignatura, colocándoles un orden de prioridad.

Estos aspectos surgen a partir de la información recolectada en los últimos cuatro años, considerando los diagnósticos previos al inicio de la asignatura, las reuniones del equipo docente para analizar el avance de los estudiantes y realizar pequeños ajustes en la planificación de la asignatura y la devolución realizada por los estudiantes a través de encuestas informales y comentarios durante las diferentes etapas de la asignatura.

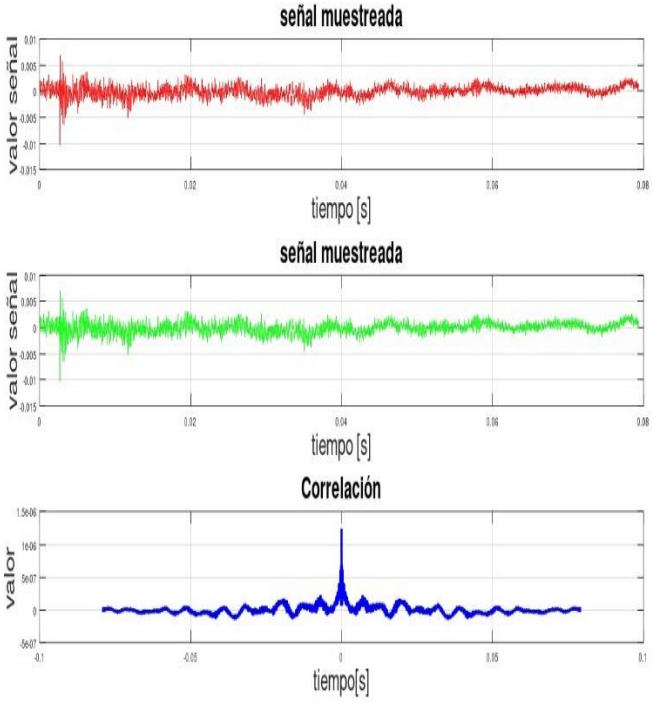


Fig. 4. Empleo de GNU Octave – Análisis de correlación.

TABLA II. APRENDIZAJES RELEVADOS

Prioridad	Aspectos Destacados de los Aprendizajes
1	Capacidad de distinción entre el mundo continuo y discreto
2	Capacidad de distinción entre el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia. Conceptualización del análisis en frecuencia como herramienta práctica
3	Adquisición de destrezas para emplear con solvencia utilitarios de cálculo para el análisis y tratamiento de señales
4	Adquisición de destrezas básicas para utilizar instrumental y equipamiento para el análisis y visualización de señales
5	Interpretación del vínculo que teoría de señales puede tener con las actividades que desarrollará el futuro profesional

En los gráficos siguientes Fig. 5, Fig. 6 y Fig. 7 se presentan los resultados obtenidos a partir de la encuesta institucional realizada a los estudiantes, durante los años 2020, 2021 y 2022, cabe aclarar que la matrícula en la asignatura es de 8 estudiantes en promedio. De la encuesta mencionada se tomaron tres ítems que se consideran relevantes en relación a la implementación de la propuesta, más allá de la mejora en los resultados de las evaluaciones. Se aclara que durante el año 2020 cuando se realizó la readecuación metodológica, la asignatura se desarrolló de manera virtual a causa de la pandemia de Covid-19, afectando en parte a las actividades experimentales. Posteriormente se volvió a la modalidad de dictado presencial.

En la Figura 5 se muestra el resultado de una encuesta en la que se invita a los estudiantes a responder si los recursos didácticos utilizados durante el desarrollo de la asignatura, fueron útiles para ayudar a comprender sus contenidos. Puede observarse un resultado altamente positivo en este ítem. En la Fig. 6 se detallan las respuestas a la percepción sobre si la asignatura contribuyó a su formación. Puede observarse un resultado alentador, en tanto que se observa un aumento en las respuestas afirmativas, incluso en el año 2022 la totalidad de los estudiantes responden que la asignatura contribuyó a su formación. En la encuesta cuyo resultado se refleja en la Fig. 7 se consultó a los estudiantes si fueron capaces de llevar al día el estudio de la asignatura, pudiéndose observar un resultado alentador en el año 2022, en relación a los anteriores.

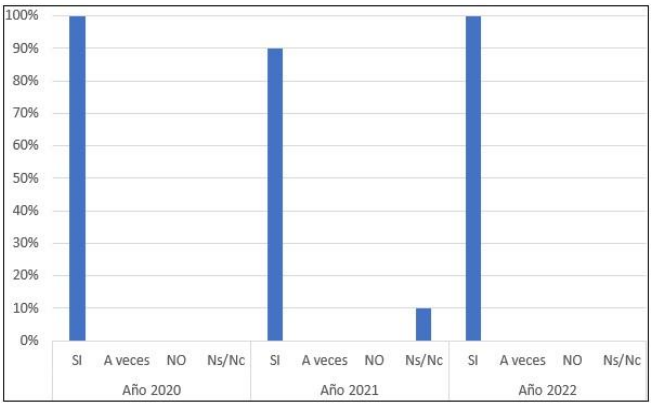


Fig. 5. Resultado de encuesta a estudiantes. ¿Los recursos didácticos utilizados fueron útiles para ayudar a comprender los contenidos de la asignatura?

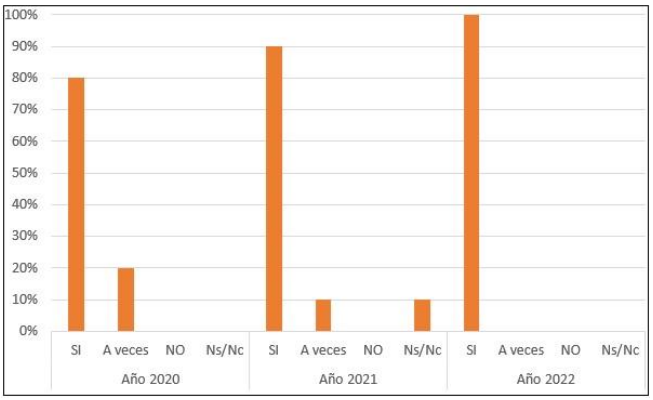


Fig. 6. Resultado de encuesta a estudiantes. ¿La asignatura contyribuyó a su formación?

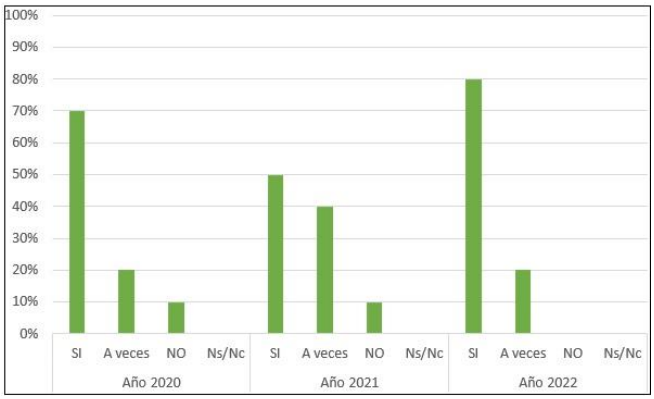


Fig. 7. Resultado de encuesta a estudiantes. ¿He sido capaz de llevar al día el estudio de la asignatura?

VI. DISCUSIÓN

La pertinencia de la presente propuesta puede hacerse considerando los alcances del título TUE: a) Colaborar como auxiliar en la elaboración, ejecución y/o implementación de los proyectos que se refieren a la puesta en marcha de sistemas o partes de sistemas de procesamiento o adquisición electrónica de sistemas médicos, b) Realizar las acciones pertinentes para la prueba, documentación y mantenimiento del instrumental electrónico en medicina y c) Asistir en la evaluación y selección de tecnología médica, su instalación y prestaciones. En este sentido cabe remarcar que el diseño no es un alcance o competencia del profesional que se forma como TUE, razón que también avala la presente propuesta.

ITS es una asignatura que tiene una matrícula reducida de estudiantes (en general un número menor a diez), por lo cual, durante estos últimos años, se ha podido realizar un trabajo acorde a lo planificado, permitiendo una evaluación continua del avance de los estudiantes, considerando que cumplieron satisfactoriamente las actividades planteadas. En dicho contexto se ha intentado resolver y conducir las dificultades encontradas por parte de los estudiantes, durante el desarrollo de la asignatura.

En algunas instancias se utilizó un aula taller, lo que favoreció el adecuado desarrollo de las actividades prácticas. Se considera que esto impactó de manera positiva en la metodología de enseñanza utilizada.

Se ha hecho hincapié en las cuestiones procedimentales (sin que esto implique una estructura cerrada en la que se resuelvan cuestiones o problemas paso a paso y de forma totalmente determinada) y en los aspectos metodológicos.

VII. Conclusiones

La implementación de la propuesta ha mostrado una mejora gradual en relación al aprendizaje en forma continua y autónoma por parte de los estudiantes y fundamentalmente avala la enseñanza de teoría de señales a partir de utilitarios de cálculo y software de simulación, soportada con actividades experimentales, recurriendo al sustento matemático profundo en la medida de lo necesario.

A pesar de tener una formación matemática inicial, la simulación mediante los utilitarios presentados les permite a los estudiantes conceptualizar el análisis de señales en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia y entender la importancia que tiene como herramienta, por ejemplo, el teorema de muestreo, la transformada rápida de Fourier y la correlación para su formación.

Se observó, además, que la utilización de guías de estudios dispuestas en el aula virtual de la asignatura impactó de manera positiva en el aprendizaje autónomo de los estudiantes. Los estudiantes manifestaron durante los últimos años que los recursos didácticos utilizados fueron útiles para ayudar a comprender los contenidos y que la asignatura ha contribuido a su formación.

Finalmente, se ha notado un incremento en la motivación atendiendo a las posibles actividades que el futuro profesional puede desarrollar

Referencias

[1] N. P. Rakhashia, A. A. Bhurane and V. M. Gadre, "Teaching signals and systems - A first course in signal processing," *ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Barcelona, Spain, 2020, pp. 9224-9228, https://doi.org/10.1109/ICASSP40776.2020.9054231

[2] F. Sadikoglu and I. Ibrahim, "Teaching signals and systems at undergraduate level," *Procedia Computer Science*, vol. 129, pp. 812-819, 2017. https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.312

[3] U. Patil, P. S. Pillai, S. B. Hiremath, R. M. Shet, R. K., and N. C. Iyer, "Experiential learning framework for signals and systems: an attempt towards reaching higher levels of cognition," *Journal of Engineering Education Transformations*, pp. 659–665, 2021. https://doi.org/10.16920/jeet/2021/v34i0/157239

[4] J. S. Bali and A. V. Nandi, "An experience, using software based tools for teaching and learning mathematically intensive signal processing theory concepts," *Proc. IEEE 4th Int. Conf. on MOOCs, Innovation and Technology in Education*, Madurai, India, 2016, pp. 100-104.

[5] G. A. Krudysz and J. H. McClellan, "Teaching signal processing concepts to digital natives," *2019 IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Brighton, UK, 2019, pp. 7864-7868.

[6] L. Maggiolini, E. Klimovsky and J. Quaglia, "Enseñando la matemática desde la electrónica. Experiencia didáctica en la cátedra Análisis de Señales y Sistemas," *Educación en Ingeniería*, vol .12, no 24, pp. 38-42, 2017.

[7] A. Gupta and A. Farswan, "Rethinking teaching practices for signal processing education," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Brighton, UK, 2019, pp. 7878-7882, https://doi.org/10.1109/ICASSP.2019.8682959

[8] Y. Velchev, K. Dimitrov and L. Laskov, "Teaching signals and systems via General Public License software during COVID-19 lockdown," *2020 XI National Conference with International Participation (ELECTRONICA)*, Sofia, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, https://doi.org/10.1109/ELECTRONICA50406.2020.9305125

[9] T. Almpanis and P. Joseph-Richard, "Lecturing from home: Exploring academics' experiences of remote teaching during a pandemic," *International Journal of Educational Research Open*, Elsevier, vol. 3, pp. 1-9, 2022.

[10] S. R. Rossi, R. C. Leegstra, F. E. Déber and R. J. de La Vega, "Tools for teaching electronics workshop in a virtual academic setting," *XV Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (XV Technologies Applied to Electronics Teaching Conference)*, Teruel, Spain, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/TAEE54169.2022.9840624.

[11] S. W. Aliaga Olivera, "Taxonomía de Bloom," Universidad C. Vallejo, https://santiagowalteraliagaolivera.files.wordpress.com/2012/03/4-taxonomia-de-bloom1.pdf (accessed Feb 27, 2024).

[12] A. Churches, "Taxonomía de Bloom para la era digital," http://eduteka.icesi.edu.co/articulos/TaxonomiaBloomDigital (accessed Feb 27, 2024).

[13] J. Carrascosa, D. G. Pérez, A. Vilches, P. Valdez,"Papel de la actividad experimental en la educación científica," *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, vol. 23, no. 2, pp. 157-181, 2006.

[14] L. Leitte, "Contributos para uma utilização mais fundamentada do trabalho laboratorial no ensino das ciências," in *Cadernos Didácticos de Ciências*, vol. 1, H. V. Caetano and M. G. Santos, Eds. Lisboa: Departamento de Ensino Secundário do Ministério de Educação, 2001, pp. 77-96.

[15] G. Monforte García y G. M. Farías Martínez, "La evaluación continua, un incentivo que incrementa la motivación para el aprendizaje," *Revista Iberoamericana de Evaluación Educativa*, vol. 6, no. 2, pp.265-278, 2013.

[16] "Teach and learn math in a smarter way." Geogebra. https://www.geogebra.org (accessed Feb 09, 2024).

[17] "GNU Octave. Scientific Programming Languaje." GNU Octave. https://octave.org (accessed Feb 09, 2024).

[18] "Audacity is the world's most popular audio editing and recording app." Audacity. https://www.audacityteam.org (accessed Feb 09, 2024).

Ruby: el módulo sensorial del proyecto Erasmus+ GEMS

Marta Marrón-Romera,
Universidad de Alcalá.
Dpto. de Electrónica.
Alcalá de Henares. España
0000-0001-7723-2262

Cristina Losada-Gutiérrez
Universidad de Alcalá.
Dpto. de Electrónica.
Alcalá de Henares. España
0000-0001-9545-327X

Daniel Pizarro
Universidad de Alcalá.
Dpto. de Electrónica.
Alcalá de Henares. España
0000-0003-0622-4884

Felipe Espinosa
Universidad de Alcalá.
Dpto. de Electrónica.
Alcalá de Henares. España
0000-0003-1588-0947

David Fuentes-Jiménez
Universidad de Alcalá.
Dpto. de Electrónica.
Alcalá de Henares. España.
0000-0001-6424-4782

José Manuel Villadangos
Universidad de Alcalá.
Dpto. de Electrónica.
Alcalá de Henares. España
0000-0001-5900-0978

Carlos Cruz
Universidad de Alcalá.
Dpto. de Electrónica.
Alcalá de Henares. España
0000-0001-6937-9838

Carolina Toledano-Monge,
Universidad de Alcalá.
Dpto. de Electrónica.
Alcalá de Henares. España
carolina.toledano@edu.uah.es

***Resumen*— En este trabajo se describe el módulo sensorial desarrollado en el marco del proyecto ERASMUS+ GEMS (*Graceful Equalising of Mechatronics Students*). El proyecto tiene como objetivo animar a los estudiantes a manejar una plataforma mecatrónica real, al tiempo que iguala las oportunidades de aprendizaje práctico. Los módulos de GEMS han sido cuidadosamente diseñados para que los estudiantes sean capaces de fabricarlos, ensamblarlos, probarlos y modificarlos mientras aprenden mecatrónica. El sistema global consta de cuatro partes diferenciadas, siendo Rubí el módulo sensorial. Este módulo incluye dos micrófonos, un módulo ultrasónico, un microcontrolador ESP32-C3 y comunicación CAN con el resto de los módulos. Para evaluar los objetivos del proyecto desde el diseño hasta la implementación de la tarjeta electrónica, seis estudiantes han abordado la tarea de ensamblar y probar el módulo, con resultados satisfactorios.**

Palabras clave: plataforma mecatrónica, implementación de PCB, pruebas de PCB, aprendizaje de sensores, hardware de bajo costo, hardware educativo.

I. Introducción

Este trabajo surge en el contexto del proyecto ERASMUS+ GEMS "*Graceful Equalising of Mechatronics Students*" (KA220-HED-CCD4EC8D) [1], cuyo objetivo principal es igualar las oportunidades de aprendizaje práctico para los estudiantes de mecatrónica, dándoles acceso a una plataforma mecatrónica real y modular. Así, el proyecto GEMS se centra en el desarrollo de elementos mecánicos y electrónicos educativos, que puedan ser fabricados, ensamblados, probados y modificados por los estudiantes, mientras aprenden durante el proceso. Además, la plataforma mecatrónica también debe ser lo suficientemente asequible como para que todos los estudiantes puedan adquirirla y trabajar en ella. Este sistema educativo para estudiantes de mecatrónica debe darles la oportunidad de aprender con hardware mecatrónico real, incluso para aquellos estudiantes que tienen necesidades especiales de aprendizaje, pero quieren aprender e involucrarse en el proceso educativo como todos los demás. Por ello, el proyecto GEMS persigue que todos los estudiantes puedan disponer de su propio material educativo con soporte online (MOOCs, *Massive Open Online Courses*) para adaptar el estudio de la mecatrónica a sus necesidades.

En el proyecto colaboran cuatro instituciones europeas, cada una de las cuales es responsable de uno de los cuatro módulos electrónicos que componen la plataforma completa. Cabe destacar que cada uno de los diferentes módulos lleva el nombre de una piedra preciosa, como se muestra en el diagrama de la Fig. 1.

- *Univerza v Ljubljana* (Eslovenia): módulo mecánico y de integración (Esmeralda), que incluye un motor de corriente continua con tren de engranajes y el sistema de gestión de la batería.
- *Technische Universiteit Delft* (Países Bajos): módulo de control (Diamante) con un controlador de motor de corriente continua y un controlador PID.
- *Teaching Factory Competence Center for Education and Development of Advanced Technologies for the Manufacturing Industry* -FCC- (Grecia): módulo de comunicación y automatización (Zafiro), centrado en diferentes protocolos de comunicación (WiFi, BLE, CAN), así como en la Interfaz Hombre-Máquina (HMI).
- Universidad de Alcalá (España): módulo sensorial (Rubí), que incluye diferentes sensores, y que se describe en detalle en este trabajo.

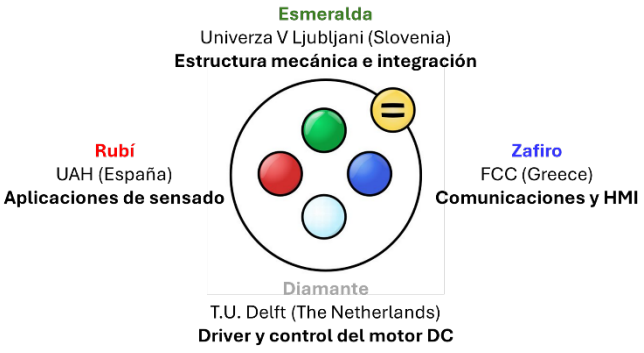


Fig. 1. Logo del proyecto GEMS, incluyendo los diferentes centros involucrados. Cada círculo representa una gema mientras que el oro (en amarillo) corresponde a los estudiantes.

Como se ha explicado anteriormente, los diferentes módulos deben ser lo suficientemente sencillos como para que los estudiantes puedan construirlos ellos mismos y tener un coste inferior a 30 euros para que sean asequibles. Además, estos módulos deben poder funcionar de forma independiente o conjunta (gracias a la comunicación CAN).

El diseño y desarrollo de este sistema mecatrónico, junto con los MOOC asociados que se desarrollarán en el proyecto GEMS deben contribuir a la formación de los estudiantes mejorando su capacidad de aprendizaje autónomo y estimulando su interés y motivación por la mecatrónica mediante el uso de un prototipo realista (mostrado en Fig. 2) que pueden implementar y probar por sí mismos. Además, puede utilizarse como apoyo a la educación formal, pero también como herramienta para el aprendizaje autónomo a lo largo de la vida de forma no formal.

En este contexto, el equipo de la Universidad de Alcalá (UAH) es el responsable del módulo sensorial, Rubí, vinculado a los demás (mecánico, control y comunicación), a través de un bus CAN. El módulo Rubí incluye dos micrófonos, un sensor ultrasónico, cinco LEDs y un microcontrolador ESP32-C3 [2] que permite aprender sobre la detección, incluyendo aspectos relacionados con la adquisición y el procesamiento de datos. Además, en este trabajo se describen las principales características del módulo sensorial (ver Fig. 3), desde la idea inicial hasta el prototipo final, incluidos los esquemas electrónicos, el diseño y la fabricación de la Placa de Circuito Impreso (PCB), su ensamblaje y evaluación, así como los resultados y las lecciones aprendidas después de que varios estudiantes de ingeniería hayan montado y probado la placa.

Fig. 2. Prototipo desarrollado en el proyecto GEMS, incluyendo los diferentes elementos que lo componen.

El resto del trabajo está organizado de la siguiente manera: en la Sección II se presentan los principales trabajos relacionados con el tema, a continuación, en la Sección III se describe en detalle el módulo Rubí. Los principales resultados y lecciones aprendidas después de que los estudiantes se enfrenten a la tarea de montar y soldar los componentes de la placa se recogen en la sección IV se recogen l, mientras que en la sección V se incluyen las principales conclusiones y el trabajo futuro.

II. Trabajos previos

La mecatrónica, como campo multidisciplinario de la ingeniería relacionada con el diseño de productos y procesos de fabricación, está incluida en la cartera de másteres de muchas universidades de todo el mundo. También está clasificado como un elemento relevante por el proyecto europeo de Habilidades, Competencias, Cualificaciones y Ocupaciones [3], y existen varios proyectos financiados por la Comisión Europea en materia de mecatrónica como el Desarrollo de laboratorio virtual para la implementación de métodos avanzados de enseñanza en el nuevo programa de estudios Electromovilidad [4], la plataforma de simulación y control distribuido para respaldar un ecosistema de desarrolladores de automatización digital [5], el nuevo sensor avanzado para la metrología automatizada [6], etc.

Desde 2020, debido a la pandemia de la COVID19, se ha trabajado mucho en la virtualización de la docencia, proponiendo laboratorios remotos o virtuales para el aprendizaje de la ingeniería [7], [8], [9]. Más recientemente, se han propuesto otros trabajos que utilizan estas soluciones virtuales o remotas como complemento a la educación formal [10], [11], siendo una herramienta interesante para mejorar la experiencia de aprendizaje [12]. Por otra parte, se ha demostrado ampliamente la eficacia de la experimentación práctica en la formación de ingenieros [13], [14]. Además, el uso de prototipos realistas puede aumentar el interés y la motivación de los estudiantes, mejorando la experiencia de aprendizaje [15] [16], [17].

En este contexto europeo, la propuesta presentada en este trabajo busca utilizar las herramientas tecnológicas disponibles para facilitar el aprendizaje remoto y autónomo, pero utilizando un prototipo de *hardware* realista que pueda ser fácilmente construido y utilizado por los estudiantes. Así, las principales aportaciones del proyecto GEMS Erasmus+ son las siguientes: A) Estimular prácticas innovadoras de aprendizaje y enseñanza. Uno de los principales objetivos del proyecto es motivar a los estudiantes universitarios proporcionándoles su propio *hardware* educativo mecatrónico, fomentando la igualdad de oportunidades para aprender interactuando individualmente con su propio prototipo real. B) Construir sistemas de educación superior inclusivos. Los resultados del proyecto contribuyen a igualar las oportunidades de aprendizaje de los estudiantes a pesar de sus diferencias o necesidades específicas. y C) apoyar las capacidades digitales y ecológicas del sector de la educación superior. Para ello, el proyecto GEMS tiene como objetivo apoyar el intercambio y la reutilización de *hardware* educativo entre estudiantes y organizaciones educativas.

III. El módulo Rubí

Como se ha explicado en la Introducción, la plataforma GEMS está compuesta por cuatro módulos electrónicos, cada uno de los cuales está diseñado por uno de los equipos involucrados en el proyecto, que lleva el nombre de una piedra preciosa específica. El equipo Esmeralda (U. Ljubljana) está a cargo de los módulos mecánicos y de integración, el equipo Diamante (TU Delft) se ocupa del control y el controlador del motor de CC, el equipo Rubí (UAH) es responsable del módulo de sensores y el equipo Zafiro (FCC) cubre el módulo de comunicación.

En esta sección se describen las principales características del módulo sensorial Ruby, que se muestran en Fig. 3. Como se puede ver, el módulo Ruby está compuesto por cuatro placas electrónicas diferentes. A continuación se explica en detalle cada uno de ellos.

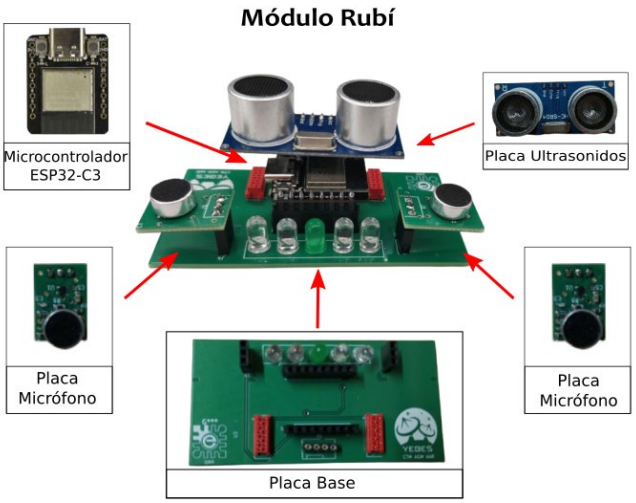


Fig. 3. Módulo Rubí: esquema de *hardware* y descripción.

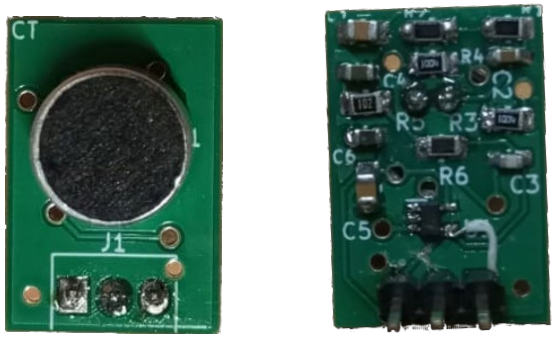
A. *Placa base*

La Placa Base es una placa electrónica de 4x8 cm donde se conectan el resto de elementos, y que incorpora la conexión CAN para la comunicación con el resto de módulos del prototipo GEMS. El tamaño de la placa base está impuesto por la estructura final del prototipo mecatrónico, de forma que los diferentes elementos se pueden montar adecuadamente en la estructura impresa en 3D.

Esta placa consta de una tarjeta PCB de doble cara con de conexión para los micrófonos en ambos lados (izquierdo y derecho), un conector para el sensor ultrasónico en la parte inferior central, una toma para el microcontrolador ESP32-C3 en el centro de la placa y 2 conectores para la comunicación por bus CAN en ambos lados de la placa. Además la placa principal incluye cinco diodos LED indicadores, cuatro de ellos rojos y uno verde en el centro. Estos LED se incorporan para mostrar información sobre el estado y las mediciones de los sensores (por ejemplo, la dirección del sonido detectado con los micrófonos), de forma independiente del resto de módulos.

B. *Tarjetas de micrófonos*

En el módulo Rubí se incluyen dos tarjetas de micrófonos. Cada una de ellas es una placa educativa de doble cara, diseñada y soldada para ser similar al diseño de la tarjeta de micrófono de Sparkfun [18], como se puede ver en Fig. 4. Esta versión permite a los estudiantes un cambio fácil y barato en caso de avería de la placa, montando y soldando una nueva PCB, o sustituyéndola por una comercial.



(a) (b)

Fig. 4. Detalle de la placa del micrófono (a) Parte frontal (b) Parte trasera.

C. *Placa de microcontrolador*

Para esta tarjeta se ha elegido el kit de desarrollo BEETLE-ESP32-C3 (DFR0868) [19] basado en el microcontrolador ESP32-C3, que incluye una conexión física a través de USB-C. Este kit ha sido elegido debido a sus características, que cumplen con los requisitos para el módulo Ruby: a) Wi-Fi integrado de 2.4 GHz y Bluetooth 5, b) MCU basado en RISC-V con 400KB de SRAM, c) 32 bits de un solo núcleo y d) 22 GPIOs programables con soporte para ADC, SPI, UART, I2C, I2S, RMT, TWAI y PWM.

Esta placa se conecta y programa desde el ordenador mediante Espressif IDE o Eclipse, lo que permite el desarrollo de proyectos personales de los estudiantes relacionados con la adquisición y procesamiento de datos de sensores.

D. *Placa de ultrasonidos.*

La placa con el sensor ultrasónico es similar a la que se usa habitualmente en las tarjetas de tipo Arduino, la SR-04 [20]. Las principales características de este sensor son: a) rango de trabajo de 20 mm a 4000 mm con un rango efectivo de 15º, b) resolución de 3 mm, c) baja corriente de trabajo y disparo digital y d) fuente de alimentación de baja tensión de 5V, obtenida a través de una conexión USB.

Vale la pena señalar que, mientras que las dos primeras placas deben diseñarse, fabricarse y ensamblarse, las dos últimas se pueden comprar directamente para insertar en los conectores correspondientes de la placa base. Los diferentes elementos se montan para obtener el módulo Ruby, que se muestra en Fig. 5, en el que también se incluyen los buses para la comunicación CAN.

Fig. 5. Módulo sensorial Rubí: vista general que incluye el bus CAN.

IV. Resultados y Discusión

Como se ha comentado, el objetivo principal del proyecto GEMS es desarrollar un prototipo que pueda ser ensamblado por los estudiantes. De esta manera, se propuso a un grupo de estudiantes evaluar los módulos ensamblando y soldando cada placa bajo la supervisión de un instructor. Los resultados presentados en esta sección e derivan de las encuestas realizadas entre ambos grupos de participantes, es decir, estudiantes y formadores. Dichas encuestas se centran en el procedimiento de ensamblaje y soldadura, y sus resultados de aprendizaje.

Las actividades propuestas fueron llevadas a cabo por 16 estudiantes bajo la supervisión de 5 instructores (uno para cada módulo, incluida la estructura 3D). En concreto, el módulo Rubí (analizado en este trabajo) fue realizado por 4 estudiantes.

A los participantes se les proporcionaron diferentes materiales, herramientas e información (tutoriales y vídeos)

para iniciar el proceso de soldadura. También se realizó una sesión práctica inicial de soldadura con placas más sencillas para practicar antes de abordar el ensamblaje y la soldadura de la placa en sí.

Las encuestas incluyeron un total de 55 preguntas distribuidas de la siguiente manera: 30 para los estudiantes y 25 para los formadores. Los tipos de cuestiones se distribuyeron entre preguntas de opción múltiple calificadas de: 1) 1 a 4 (utilizando una escala *Likert* de 4 puntos, siendo 1 punto como el valor más bajo y 4 como el valor más alto); 2) preguntas generales con respuestas Sí/No; y 3) preguntas generales con respuestas abiertas. Las encuestas tienen como objetivo conocer la percepción de los participantes sobre la capacidad de aprendizaje y el desarrollo de la actividad propuesta. Además, el objetivo principal de la evaluación es identificar el interés por las tareas realizadas y las dificultades encontradas al enfrentarse a un reto imprevisto que no está incluido en su currículo académico.

En general, la experiencia ha sido positiva y altamente motivadora para los participantes involucrados, ayudando a mejorar su aprendizaje en aspectos relacionadas con el diseño de la PCB y su ensamblaje. Sin embargo, durante el proceso de montaje de los diferentes módulos se encontraron algunas dificultades que requirieron la asistencia de los formadores (por ejemplo, la colocación de algunos componentes debido a su pequeño tamaño). A continuación, se describen en detalle los resultados obtenidos en relación con el tipo de preguntas formuladas.

A. Análisis de las respuestas de los estudiantes.

1) Preguntas tipo test (de la 1 a la 4).

En la Tabla I se resumen las respuestas de los estudiantes (valor medio y desviación estándar) a las preguntas de opción múltiple agrupadas en 5 áreas de acción: 1) documentación disponible; 2) selección y adquisición de componentes; 3) información impresa en las tarjetas; 4) ensamblaje de componentes electrónicos; y 5) prueba de módulos. Además, las puntuaciones específicas seleccionadas por los estudiantes para cada pregunta se muestran en Fig. 6. Como se puede ver, la mayoría de las puntuaciones están entre y 4, y solo unas pocas de ellas son de 2.

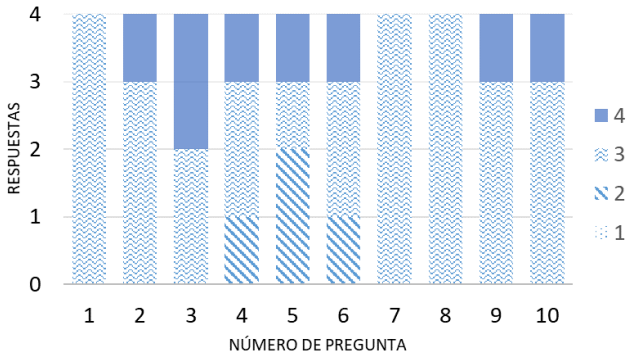


Fig. 6. Distribución de las respuestas de los estudiantes a las preguntas de opción múltiple. Los números de las preguntas corresponden a los que se muestran en la tabla I.

En general, la información proporcionada a los participantes fue clara y suficiente, aunque algunos de ellos, especialmente los que cursan el primer año de la carrera de ingeniería, encontraron dificultades con el lenguaje y la comprensión de la documentación proporcionada.

Cabe destacar que algunos participantes indicaron una falta de motivación en las actividades centradas en el abastecimiento de componentes que deben realizar los proveedores de productos electrónicos. El proceso de entrega tenía un largo plazo de entrega y una gran cantidad de componentes que debían comprarse con antelación, lo que suponía una importante pérdida de tiempo en la búsqueda de dispositivos adecuados entre los proveedores.

Los estudiantes también expresaron dudas sobre la polaridad de ciertos componentes y la información poco clara. Finalmente, encontraron algunas dificultades en la soldadura de componentes pequeños.

Cabe destacar que, si bien la mayoría de los estudiantes no tenían conocimientos previos sobre montaje y soldadura de PCB, por lo que la tarea les resultó bastante desafiante (como se puede concluir de los valores de la Tabla I), ésta fue realmente motivadora, ya que la mayoría de ellos pudieron cumplir con la tarea propuesta.

TABLA I. CLASIFICACIÓN DE LAS PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE (ENTRE 1 Y 4) FORMULADAS A LOS ESTUDIANTES IMPLICADOS EN LA EVALUACIÓN DEL MÓDULO RUBY.

Preguntas		**Media**	**D. Std.**
Documentación disponible	1. Es clara	3.00	0.00
	2. Está completa	3.25	0.50
Selección y adquisición de componentes	3. Facilidad para localizar proveedores	3.60	0.55
	4. Tiempo estimado de entrega	3.00	0.82
Información impresa en las tarjetas	5. Facilita la actividad	2.75	0.96
	6. Es sencillo identificar la ubicación de componentes	3.00	0.82
Ensamblaje de componentes electrónicos	7. Facilidad de inserción	3.00	0.00
	8. Facilidad de montaje de sub-módulos.	3.00	0.00
Evaluación del módulo	9. Guías de usuario para la evaluación	3.25	0.50
	10. Guías para la validación de los módulos	3.25	0.50

2) Preguntas generales (Sí/No):

En la Tabla II se muestran las respuestas obtenidas por los estudiantes involucrados en el módulo Ruby. La mitad de los participantes hizo hincapié en su falta de experiencia previa en soldadura. Además, todos ellos consideraron esta formación como altamente beneficiosa para su formación como ingenieros, ya que les permite aprender aspectos que no son abordados en sus programas de educación formal.

TABLA II. RESPUESTAS A LAS PREGUNTAS DE SÍ/NO FORMULADAS A LOS ESTUDIANTES.

Pregunta	Sí	No
¿Cuenta con experiencia previa en soldadura?	2	2
¿Considera que la actividad es interesante para su formación como en ingeniería?	4	0
Con la documentación disponible, ¿cree que podría haber realizado la actividad de forma autónoma?	2	2

Cabe destacar que también la mitad de los participantes confirmaron que con sus conocimientos previos y la formación proporcionada se consideraban capaces de realizar estas actividades de forma autónoma. Sin embargo, se resaltó la necesidad de disponer de las instalaciones y herramientas del laboratorio dentro de un horario compatible con sus compromisos académicos.

3) Preguntas generales (abiertas)

Por último, a través de la encuesta se publicaron preguntas abiertas como "¿qué aprendiste de la actividad?" o "¿qué te pareció más y menos interesante?". La lista de preguntas se muestra en la Tabla III.

TABLA III. PREGUNTAS ABIERTAS A LOS ESTUDIANTES.

Question
¿Qué te ha permitido aprender la actividad?
¿Qué te pareció más y menos interesante de la actividad?
¿Qué te pareció más difícil de la actividad?
Teniendo en cuenta la duración prevista para la actividad, ¿cuánto tiempo crees que hubieras necesitado para completar un prototipo?
Añada a continuación cualquier comentario que le gustaría hacer sobre la actividad, que no esté incluido en las preguntas anteriores.

La mayoría de los participantes considera que han aprendido sobre temas prácticos no cubiertos en sus titulaciones. Valoran muy positivamente la experiencia en la vida real sobre lo aprendido en la teoría, y también tienen en cuenta la aplicación práctica de los conceptos teóricos. Además, los estudiantes consideran importante cubrir el conocimiento de herramientas y técnicas para soldar y dessoldar componentes electrónicos, así como la capacidad de interpretar esquemas eléctricos otra competencia necesaria a destacar.

Cabe destacar que la mayoría de los estudiantes revelaron que no existen actividades dedicadas a los procesos de soldadura de PCB en sus grados y la mayoría de ellos hicieron hincapié en la necesidad de incluir este tipo de actividades como obligatorias en el plan de estudios.

En general, todos los participantes encontraron la actividad muy interesante, especialmente debido al contexto en el que se abordan técnicas totalmente novedosas para ellos. Destacaron el *software* de PCB para el diseño de placas de circuito impreso y las herramientas para soldar componentes pequeños como un tema muy interesante. Por otro lado, consideraron que las tareas de búsqueda de componentes web entre proveedores eran las más aburridas y menos propicias para el proceso de aprendizaje.

B. Análisis del informe de los formadores.

También se ha realizado una encuesta entre los instructores solicitando información acerca de las mismas áreas abordadas con los estudiantes: documentación disponible, información impresa en las fichas, selección y adquisición de componentes, ensamblaje de componentes electrónicos y validación de módulos. Las encuestas incluían tanto preguntas de opción múltiple, como otras de respuesta abierta.

1) Preguntas de opción múltiple (de 1 a 4)

En la Tabla IV se muestran las respuestas de la instructora encargada de supervisar a los alumnos que desarrollan el módulo Rubí. Aunque la percepción de la formadora fue muy positiva, destaca que: a) algunas de las indicaciones en la serigrafía de la PCB no eran claras, especialmente para la relación de polaridad de ciertos componentes; b) la disposición de los pines de los circuitos integrados también es información necesaria que debe proporcionarse; c) la dificultad de soldar componentes para participantes inexpertos; y d) el conector SB-C no se fijó a la placa PCB debido a la complejidad de la soldadura.

TABLA IV. CLASIFICACIÓN DE LAS PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE (ENTRE 1 Y 4) FORMULADAS AL SUPERVISOR QUE PARTICIPA EN LA EVALUACIÓN DEL MÓDULO RUBY.

Pregunta		Respuesta
Documentación disponible	Es clara	3
	Está completa	4
Selección y adquisición de componentes	Facilidad para localizar proveedores	4
	Tiempo estimado de entrega	3
Información impresa en las tarjetas	Facilita la actividad	3
	Es sencillo identificar dónde se ubican los componentes	2
Ensamblaje de componentes electrónicos	Facilidad de inserción	4
	Facilidad de montaje de sub-módulos.	4
Evaluación del módulo	Guías de usuario para la evaluación	3
	Guías para la validación de los módulos	3

Cabe destacar que la formadora hizo varias recomendaciones para mejorar y facilitar el procedimiento. Recomendó realizar pruebas de potencia cuando se sueldan los componentes activos. También consideró recomendable seguir un orden o criterio específico para el proceso de montaje. Finalmente, mencionó la dificultad de verificar la correcta instalación de algunos componentes antes de comprobar el funcionamiento del circuito.

2) Preguntas generales (abiertas)

Igual que en el caso de los estudiantes, también se han formulado preguntas abiertas a los formadores (por ejemplo, ¿qué le pareció más y menos interesante de la actividad? o ¿cuál fue el aspecto más desafiante de la actividad?).

Desde el punto de vista del formador, los estudiantes destacaron la importancia del proceso de soldadura para diferentes tipos de componentes (SMD, TSOP, BGA, etc.). El uso de equipos como estaciones de soldadura, microscopios o cámaras fotográficas facilitó la realización de la actividad. También se encontró que los participantes no se involucraron mucho con el comportamiento eléctrico y el funcionamiento adecuado de las placas de PCB. También se debe tener en cuenta la dificultad para ubicar los elementos que se van a adquirir, como rodamientos, ejes, tornillos o imanes antes de diseñar una placa PCB.

El formador también mencionó el proceso de soldadura de determinados componentes como un tema desafiante para los participantes sin ninguna experiencia. La dificultad adicional estaba relacionada con la pequeña PCB de los micrófonos debido a la alta concentración de elementos en un espacio muy pequeño.

En conclusión, la actividad ha permitido a los estudiantes conocer el proceso de soldadura sin necesidad de contar con conocimientos previos y han animado a todos los participantes a profundizar en el tema de los PCB, entendiendo los principales problemas que se pueden plantear para llegar al prototipo final.

El resultado general abre un abanico de posibilidades para que los participantes desarrollen su interés en el aprendizaje del *software* y el *hardware* para diseño y montaje de PCBs.

V. Conclusiones y trabajos futuros

Este documento describe el trabajo realizado en el módulo Rubí como parte del proyecto Erasmus+ GEMS. Este módulo contiene diferentes sensores (micrófonos y ultrasonidos) y un microcontrolador ESP32-C3. La placa electrónica ha sido diseñada para ser lo suficientemente simple como para que los estudiantes interesados estudiar un grado en ingeniería puedan construirla y soldarla ellos mismos, con la ayuda de los MOOCs generados por el proyecto GEMS. Además, la tarjeta también debe ser asequible para cualquier estudiante.

Para evaluar el diseño, se realizó una actividad en la que cuatro estudiantes de ingeniería de diferentes cursos participaron en el montaje y soldadura de la placa, bajo la supervisión de un profesor. La retroalimentación de los estudiantes y del profesor se recogió a través de varios cuestionarios. Las respuestas recogidas permitieron concluir que, a pesar de la naturaleza desafiante de la actividad y las dificultades encontradas, todos los estudiantes pudieron completar la tarea y la consideraron altamente motivadora e interesante. Además, destacaron la necesidad de incluir este tipo de actividades en su formación en ingeniería. Cabe destacar que los estudiantes indican que esta actividad les ha permitido aprender acerca de aspectos prácticos que no se abordan en sus grados, y la mayoría de ellos consideran que serían capaces de realizarla de forma autónoma si tuvieran acceso al material y herramientas del laboratorio. Por lo tanto, se considera que se han alcanzado los objetivos del módulo Rubí.

Como trabajo futuro, durante el desarrollo del proyecto Erasmus+ GEMS, está previsto generar MOOCs relacionados con el montaje, soldadura y evaluación de la placa, ayudando a los estudiantes a construir de forma autónoma el prototipo final. Además, se desarrollará el protocolo que permita comunicar los diferentes módulos a través del bus CAN. Por último, se crearán varias actividades demostrativas para ayudar a los estudiantes a programar el microcontrolador ESP32 para probar la funcionalidad de los sensores y que sirvan como punto de partida para desarrollar sus propios proyectos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación de la Comisión Europea a través del proyecto Erasmus+ 2022 "Graceful Equalising of Mechatronics Students", (2022-1-SI01-KA220-HED-000087727), aprobado por la agencia nacional eslovena CMEPIUS, y a la Universidad de Alcalá a través del proyecto de Innovación Docente "Retos prácticos y aula invertida para el fomento del aprendizaje activo en el laboratorio de Ingeniería de Control Electrónico" (UAH/EV1467).

Referencias

[1] Página web del proyecto GEMS ERASMUS+ https://web.fs.uni-lj.si/gems-erasmus/ [Última consulta: marzo-2024]

[2] V.Barral-Vales, et al. "Fine Time Measurement for the Internet of Things: A Practical Approach Using ESP32," IEEE Internet of Things Journal, 9:19. pp. 18305-18318, 2022.

[3] European Skills, Competences, Qualifications and Occupations (ESCO) Classification: Skills & competence related to mechatronics. http://data.europa.eu/esco/skill/d88cb3f1-8e02-4618-bf32-4b0488066934 [Último acceso: marzo-2024].

[4] Electromobility project. https://trimis.ec.europa.eu/project/development-virtual-laboratory-implementation-advanced-methods-teaching-new-study-program [Último acceso: marzo-2024]

[5] Daedalus project. https://cordis.europa.eu/project/id/723248 [Último acceso: marzo-2024]

[6] Proyecto Eleone https://trimis.ec.europa.eu/project/new-advanced-sensor-automated-metrology [Último acceso: marzo-2024].

[7] Ożadowicz, A. (2020). Modified blended learning in engineering higher education during the COVID-19 lockdown—Building automation courses case study. Education Sciences, 10(10), 292.

[8] Alam, A., & Mohanty, A. (2023). Design, Development, and Implementation of Software Engineering Virtual Laboratory: A Boon to Computer Science and Engineering (CSE) Education During Covid-19 Pandemic. In Proc. Third International Conference on Sustainable Expert Systems: ICSES 2022 (pp. 1-20).

[9] P. Vitliemov, D. Bratanov and M. Marinov, "An Approach to Use Virtual and Remote Labs in Mechatronics Education Based on Cloud Services," 2020 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE), 2020, pp. 1-4,

[10] Halabi, O. Immersive virtual reality to enforce teaching in engineering education. Multimed Tools Appl 79, 2987–3004 (2020).

[11] Papakostas, C., Troussas, C., Krouska, A. et al. User acceptance of augmented reality welding simulator in engineering training. Educ Inf Technol 27, 791–817 (2022).

[12] Kamińska, D., Zwoliński, G., Wiak, S. et al. Virtual Reality-Based Training: Case Study in Mechatronics. Tech Know Learn 26, 1043–1059 (2021).

[13] Browne, Aidan F.; Conrad, James M. A versatile approach for teaching autonomous robot control to multi-disciplinary undergraduate and graduate students. IEEE Access, 2018, vol. 6, p. 25060-25065.

[14] Precup, R. E., Preitl, S., Radac, M. B., Petriu, E. M., Dragos, C. A., & Tar, J. K. Experiment-based teaching in advanced control engineering. IEEE Transactions on Education, 2011, vol. 54, no 3, p. 345-355.

[15] C. Losada-Gutiérrez, F. Espinosa, C. Santos-Pérez, M. Marrón-Romera and J. M. Rodríguez-Ascariz, "Remote Control of a Robotic Unit: A Case Study for Control Engineering Formation," IEEE Transactions on Education, vol. 63, no. 4, pp. 246-254, Nov. 2020,

[16] Pennes, A., Mendez, K., Hanumara, N. et al. A Hands-on Medical Mechatronics Exercise to Pump Up Student Learnings. Biomed Eng Education 3, 235–242 (2023)

[17] Habib MK, Nagata F, Watanabe K. Mechatronics: Experiential Learning and the Stimulation of Thinking Skills. Education Sciences. 2021; 11(2):46.

[18] Guía de conexión de la placa de conexión SparkFun Electret Mic Breakout Board https://learn.sparkfun.com/tutorials/electret-mic-breakout-board-hookup-guide/all https://learn.sparkfun.com/tutorials/electret-mic-breakout-board-hookup-guide/all [Último acceso: marzo de 2024]

[19] Microcontrolador ESP32-C3. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3_datasheet_en.pdf [Último acceso: marzo-2024]

[20] Módulo sensor ultrasónico. https://handsontec.com/dataspecs/sensor/SR-04-Ultrasonic.pdf [Último acceso: marzo-2024]

Microcredenciales como medio de enseñanza del ecosistema RISC-V

Manuel Rodríguez Valido
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de La Laguna
La Laguna, España
mrvalido@ull.edu.es

Pedro P. Carballo, Pedro Hernández-Fernández, Antonio Núñez
Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada (IUMA)
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Las Palmas de Gran Canaria, España
{carballo, pedrohf, nunez}@iuma.ulpgc.es

***Resumen*—Este trabajo tiene como objetivo presentar las microcredenciales (cursos cortos) para crear una formación sobre el ecosistema *hardware-software* de RISC-V. Las microcredenciales son una nueva manera, propuesta por la Unión Europea y adoptada por los países miembros, para cubrir las necesidades de recualificación, a lo largo de la vida, de las personas activas. Proponemos una formación en torno a este ecosistema basada en las necesidades (conocimientos y habilidades) de los demandantes de empleo relacionados con Sistemas en Chip (SoC).**

***Index Terms*—RISC-V, microcredenciales, recualificación laboral, SoC, diseño de chips, soberanía tecnológica**

I. Introducción

Las microcredenciales son experiencias de aprendizaje, complementarias a las cualificaciones tradicionales, cursos breves de 1 a 15 ECTS (Sistema europeo de transferencia y acumulación de créditos) [1] que permitan, de forma selectiva, adquirir competencias y capacidades adaptadas a la sociedad y al mercado laboral [2]. Esta iniciativa de la Comisión Europea tiene por objeto proporcionar una norma a nivel europeo que permita que los resultados del aprendizaje de estas experiencias educativas sean reconocidos y entendidos por los empleadores, alumnos y las instituciones de educación y formación, suponiendo un componente clave para el Espacio Europeo de la Educación. En esta misma dirección, el pasado mes de junio de 2023, el Ministerio de Universidades presentó el plan de microcredenciales (Microcreds), con dotación económica para su desarrollo en el periodo 2024-2026 de 56 millones de euros [3]. En España, un grupo de 32 universidades, bajo el paradigma de formación, investigación e innovación como pilares básicos, han creado la asociación *Spanish Open Hardware Alliance* (SOHA). SOHA tiene como objetivo extender el uso del *hardware* abierto, basando su estrategia de éxito en la utilización de la arquitectura RISC-V y Linux. RISC-V representa una oportunidad de desarrollo en el ámbito de la arquitectura de procesadores, ya que su juego de instrucciones (ISA) no requiere el pago de derechos de licencia ni de *royalties*. Ello permite dotarnos de los mecanismos que garantizan la evolución colaborativa y eficiente, ya sea en el ámbito nacional como país o en Europa. Además, SOHA fomenta los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, relacionados con su ámbito de actuación, como la mejora en la eficiencia energética, la reducción de la huella de carbono, el aumento de la productividad económica, la igualdad de oportunidades, el aumento del acceso a las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) y la evolución colaborativa basada en la complicidad de los tres pilares básicos citados anteriormente [4]. RISC-V es una especificación de una arquitectura de procesador de tipo RISC abierta con repertorio de instrucciones (*Instruction Set Architecture* - ISA) definido y estandarizado pero abierto y extensible, y una plataforma*hardware/software (HW/SW)* también abierta, desarrollada originalmente en 2010 en la Universidad de California en Berkeley [5]. Esta característica, establece los cimientos de todo el ecosistema que rodea a RISC-V que incluye: *software* de código abierto, *software* comercial, bloque de propiedad intelectual (IP) *HW* de código abierto, IP comerciales, y herramientas de diseño y verificación. Bajo este contexto, las microcredenciales – sin perjuicio de que esta tecnología se vaya introduciendo en los títulos de Formación Profesional (FP), grados y máster universitarios del estado español – es un medio rápido y eficaz para adquirir capacidades y competencias en el ecosistema de RISC-V.

Este trabajo presenta una propuesta abierta de diferentes cursos cortos en torno al ecosistema RISC-V, organizada en tres niveles: cursos de nivel básico, cursos de nivel intermedio y cursoso de nivel avanzado. La estructura planteada permite que los estudiantes puedan ir enlazándolos adecuadamente para su formación en el diseño de Sistemas en Chip (SoC) basados en la especificación y plataforma RISC-V. Los contenidos concretos de estos cursos están fuertemente ligados, desde nuestro punto de vista, a la arquitectura RISC-V (por ejemplo de 32 o 64 bits), a la aplicación final, al diseño de extensiones (por ejemplo, la extensión vectorial), a la simulación de la arquitectura o al uso de herramientas de diseño automático EDA (Electronic Design Automation).

El estudiante puede optar por la especialización en distintos dominios, ya sea de diseño intensivo en *hardware* orientado a distintos objetivos de implementación: Internet de las cosas y bajo consumo de potencia, o sistemas complejos orientados a computación de altas prestaciones, como es el caso de los trabajos que se están desarrollando en la iniciativa EPI (*European Processor Initiative*), reuniendo a los principales proveedores y usuarios de tecnología [6].

En el dominio *hardware*, es posible distinguir distintos tipos de especialización, si la tecnología a utilizar está basada en dispositivos programables FPGA o, por el contrario, es necesario utilizar tecnologías ASIC para la implementación del SoC. Los problemas de diseño son diferentes, por los que se requiere un enfoque adaptado a cada uno de los casos de uso. En ambos tipos de implementación se requieren conocimientos básicos de diseño digital, principios básicos de arquitecturas de procesadores y de diseño electrónico basado en lenguajes de descripción *hardware*, así como síntesis desde especificaciones a nivel de transferencia de registros (RTL).

Si el estudiante, por el contrario, requiere una formación

orientada al dominio *software*, por ejemplo, enfocado al desarrollo de algoritmos optimizados o desarrollo de aplicaciones para la arquitectura RISC-V y sus distintas variantes y extensiones, será necesario crear una formación específica en entornos de desarrollo *software* optimizado, compiladores y flexibles.

II. Microcredenciales

El avance tecnológico, la transición hacia prácticas más sostenibles y los desafíos demográficos están remodelando tanto las actividades económicas como los empleos, además de otras dimensiones importantes en la vida de las personas. La amenaza de la automatización afecta a numerosos trabajadores, implicando que sus conocimientos, habilidades y competencias podrían volverse obsoletos mucho antes de la jubilación. Paralelamente, estos mismos procesos están generando oportunidades laborales de calidad que requieren nuevas habilidades, las cuales son aún escasas en la población activa. Este desajuste entre las capacidades demandadas y disponibles subraya la necesidad de un impulso decidido en la formación a lo largo de la vida, con el objetivo de asistir a la ciudadanía, sectores productivos, administraciones públicas y entidades sociales en el exitoso recorrido de esta fase de transición.

A. Necesidades de recualificación

Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) se estima que el 22 % de los empleos españoles son redundantes y se encuentran en riesgo elevado de automatización mientras que el 30 % se encuentra en riesgo significativo [7].

Por otro lado, la población adulta en España (15-64 años) se encuentra en las últimas posiciones, tanto de la UE como de la OCDE, en competencias y habilidades, incluyendo la comprensión lectora, las habilidades matemáticas, el conocimiento de idiomas extranjeros, las competencias digitales y las competencias blandas. Tan solo un 4,8 % de esta población adulta presenta un nivel alto de comprensión lectora por un 4,1 % en competencias matemáticas. Esto se debe, de acuerdo con el estudio de la OCDE y comparando con la media europea, a dos componentes principales: en primer lugar, la población adulta española comprendida entre 25 y 64 años que no dispone de estudios post-obligatorios en España es el doble que la media europea; y, en segundo lugar, para cada nivel educativo, el nivel competencial es notablemente inferior al de sus análogos europeos.

La combinación del cambio tecnológico acelerado y de los déficits competenciales genera desajustes en el mercado de trabajo de tal forma que trabajadores sin empleo conviven con puestos de trabajo no cubiertos.

En la Fig. 1 se muestra el incremento de vacantes por sectores y definida como la proporción de puestos de trabajo vacantes sobre el total de personas asalariadas). En el caso de los sectores Profesionales, Ciencias Técnicas y Información y comunicaciones tenemos 15.000 vacantes en 2021. Además, según este estudio el 8 % de empresas españolas en la industria, el 12 % en la construcción y el 11 % en los servicios manifiestan dificultades para encontrar mano de obra cualificada.

La proyección acumulada de demanda de empleo en el periodo 2018-2030, según este informe de la situación socioeconómica y laboral de España, habrá generado 1,8 millones de puestos de trabajo por nuevas actividades y 12 millones de puestos de trabajo por necesidades de reposición. Además, estos datos coinciden con un proceso de progresivo envejecimiento de la población activa y alargamiento de la edad de jubilación (67 años). Si en 2002 un 25,4 % de la población de 20-64 años tenía más de 50 años, en 2021 constituían el 35,2 % y en 2031 se prevé que alcancen el 38,2 %, según estimaciones del INE. Estos desajustes, en el mercado laboral español y el crecimiento de actividades económicas impulsadas por la transición digital y verde, requieren mayores necesidades de re-cualificación.

A pesar de esta necesidad de re-cualificación, el uso de la educación a lo largo de la vida en España es baja comparada con Europa. Si miramos el indicador europeo que define el porcentaje de adultos entre 25 a 64 años que ha participado en alguna acción formativa en los doce meses previos a la encuesta, España (43 %) está lejos de los países líderes como Países Bajos (64,1 %), Suecia (63,8 %) o Austria (59,9 %). El objetivo para 2025, fijado en el Marco Europeo de Cooperación en Educación de 2021, es del 47 %, mientras que el Plan de Acción del Pilar de Derechos Sociales, aprobado en Oporto en 2021, establece el objetivo para el año 2030 en el 60 % (Fig. 2). En síntesis, España se sitúa, comparada con los países europeos de nuestro entorno, en el cuadrante con menores competencias y habilidades en la edad adulta y, a la vez, con menor uso de la formación a lo largo de la vida que permitiría paliar estas carencias competenciales.

B. Plan de acción

En este escenario, han surgido de manera prominente a nivel internacional un tipo innovador de certificación educativa no convencional, especialmente adecuado para la formación en adultos: las microcredenciales.

La Comisión Europea, en su informe "Recomendación relativa a un enfoque europeo sobre microcredenciales para el aprendizaje permanente y la empleabilidad" [8], las describe como "el registro de los logros de aprendizaje que un estudiante ha obtenido después de cursar un breve período de formación". Es decir, certificaciones derivadas de formaciones cortas centradas en la adquisición de conocimientos, habilidades o competencias específicas, alineadas con las necesidades de los sectores productivos.

Estas credenciales se asocian con programas flexibles y adaptables a diversas necesidades y restricciones de disponibilidad de los alumnos adultos, incluso mediante modalidades virtuales. Con una estructura modular, cada formación tiene sentido de manera independiente y puede acumularse para combinarse en credenciales más amplias, como grados o másteres, en itinerarios formativos personalizados. Las instituciones con capacidad de generar programas basados en microcredenciales incluyen universidades, así como entidades de formación profesional, empleo, proveedores educativos no convencionales, empresas privadas y administraciones públicas.

Reconciliar el cambio tecnológico con el empleo, comprende una amplia gama de retos. En este sentido, las microcredenciales pueden ser un instrumento para evitar que este cambio de época derive en un proceso de polarización y fractura social, por el que una parte de la población encuentre dificultades para comprender y seguir el ritmo del cambio tecnológico, económico y social y, por lo tanto, no pueda ejercer plenamente los derechos sociales y de ciudadanía.

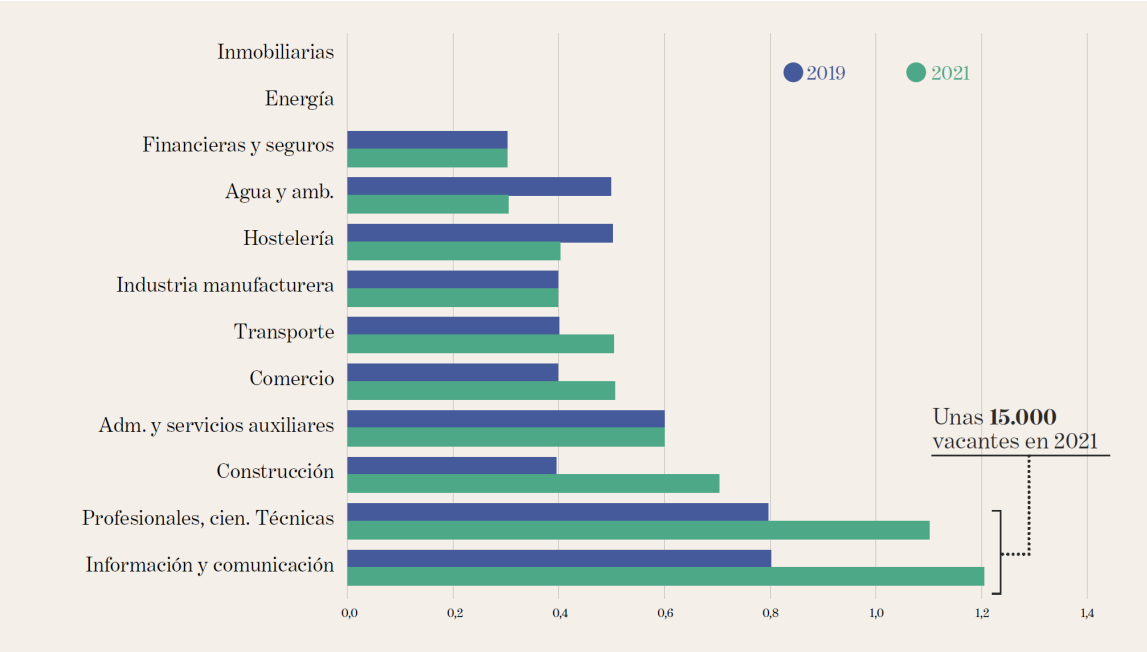


Figura 1. Tasa de vacantes por actividades en España. (Fuente: Memoria sobre la situación socio-económica y laboral 2021, Consejo Económico y Social elaborado a partir de datos de Eurostat e INE).

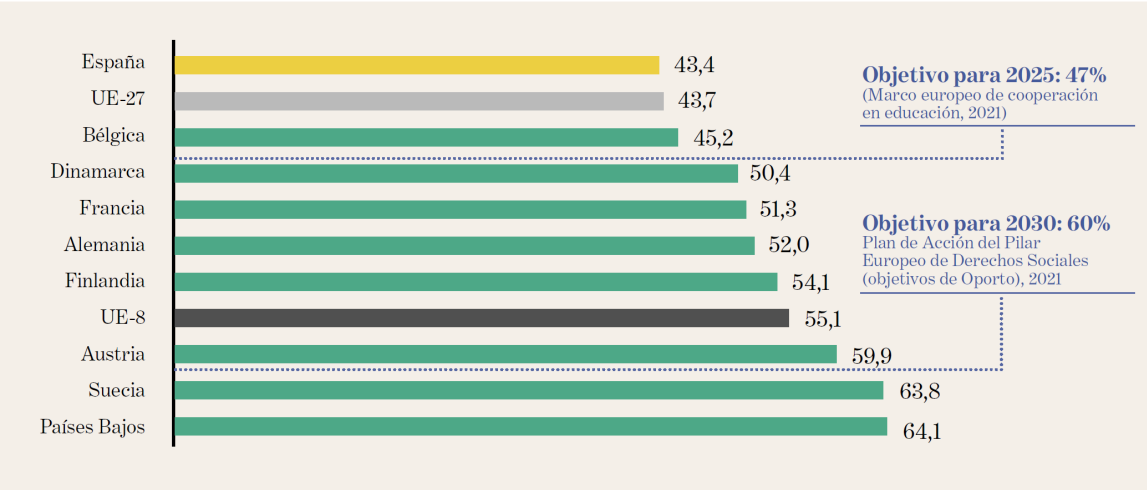


Figura 2. Adultos de 25 a 64 años que han participado en alguna acción formativa en los doce meses previos a la encuesta (Fuente: 2019, Eurostat Labour Force Survey).

También, las microcredenciales, pueden servir para ampliar y democratizar el acceso a la educación superior. Es decir, por sus criterios de acceso flexibles que incorporan el reconocimiento de la trayectoria profesional puede ser un trampolín educativo a los estudios de grado o máster, de manera que las personas adultas que obtengan un determinado número y tipo de microcredenciales dispongan de una vía garantizada para acceder a determinados programas de educación superior, de forma análoga a las actuales pruebas para mayores de 25, 40 o 45 años.

Por último, las microcredenciales, cuando se crean de manera específica para atender a grupos de población vulnerable, como refugiados o inmigrantes, con el propósito de facilitar la adquisición de competencias y habilidades pertinentes para ingresar al mercado laboral, pueden convertirse en un instrumento para promover la inclusión social.

A este respecto, los Ministerios de Asuntos Económicos y Transformación Digital; de Trabajo y Economía Social; de Inclusión, Seguridad Social y Migraciones y de Ciencia han diseñado un plan de acción en torno al concepto de microcredenciales [9]. El enfoque, como se ha señalado, se circunscribe al desarrollo de las microcredenciales universitarias, sin menoscabo de las actuaciones que deberán emprenderse en otros niveles educativos, así como en otros ministerios, para desarrollar un ecosistema de microcredenciales plural y al servicio de toda la ciudadanía.

III. Microcursos en torno a la tecnología RISC-V

Como comentamos anteriormente, y como aproximación a la enseñanza de este ecosistema *hardware/software* en torno a RISC-V, las microcredenciales pueden ser un medio –si es diseñado adecuadamente– diferencial para cualificar a una población egresada de las carreras/grados/master de ingeniería en el ámbito de las Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC).

A. Demanda del mercado laboral RISC-V

Datos recientes sobre la evolución de RISC-V en el mercado apuntan que esta arquitectura está protagonizando un crecimiento espectacular impulsado por la inteligencia artificial [10]. En concreto, según este análisis, la utilización de componentes basados en RISC-V crecerán a una tasa de crecimiento anual compuesta del 40 %, llegando a alcanzar 16.000 millones de unidades para el 2030, dato aportado por la Directora Ejecutiva (CEO) de RISC-V International, Calista Redmond. Por otro lado, un estudio realizado por ABI Research [11], muestra que las previsiones de utilización de RISC-V en aplicaciones de Inteligencia Artificial (IA) para procesamiento en el borde en redes IoT (edge AI RISC-V), está justo empezando. El crecimiento (penetración en el mercado) será constante durante el resto de la década, hasta alcanzar más de 129 millones de unidades en 2030 (Fig. 3). La tecnología clave para este impulso son las plataformas de inteligencia artificial, la mayoría de las cuales se dirigen a aplicaciones de consumo que utilizan sensores domésticos, así como aquellas que se encuentran en las plantas de fabricación.

Indudablemente, estas expectativas producirán una demanda laboral creciente y a corto plazo de expertos en el ecosistema *hardware/software* relacionado con la tecnologías en torno a RISC-V. En este sentido, países como China, Estados Unidos e India ya están invirtiendo mucho esfuerzo en el desarrollo de aplicaciones *software* y plataformas *hardware* de código abierto para seguir siendo competitivos y mantener su soberanía en sectores claves en los que cada vez preocupa más la seguridad.

En la misma dirección, con objeto de mantener su soberanía tecnológica, Europa debe responder creando una masa crítica para el desarrollo tanto *software* como *hardware* de código abierto. El desarrollo de un ecosistema europeo sólido de código abierto también debe impulsar la competitividad, ya que permite una innovación mayor y más ágil a costes más reducidos. Sin embargo, para lograrlo es necesario alinear y coordinar las actividades para que los principales actores europeos del sector creen las sinergias adecuadas [12]. Es decir, la realización de un ecosistema de este tipo requiere un cambio radical en el trabajo en todos los ámbitos, con el liderazgo y la contribución de los principales agentes industriales y de investigación europeos y otros agentes de la cadena de valor. Se necesita un enfoque similar al de la Iniciativa Europea de Procesadores [6], que reúne a los principales proveedores y usuarios de tecnología en la cadena de suministro, pero con el objetivo en este caso de producir Propiedad Intelectual (PI) de código abierto.

B. Conocimientos demandados por empresas sobre SoCs

Los ingenieros de diseño de SoC deben tener una amplia gama de conocimientos para tener éxito en este exigente mercado laboral. Debido a la complejidad del problema a resolver, hay que destacar que el proceso y la responsabilidad de desarrollar un SoC recae normalmente en un equipo de expertos muy estructurado y especializado compuesto por ingenieros de producto, ingenieros *software*, ingenieros *hardware* e ingenieros de diseño de chips entre otros. Entre las más importantes capacidades y conocimientos se incluyen los siguientes:

- Diseño lógico con experiencia en lenguajes de descripción *hardware*;
- Arquitectura de procesadores y su aplicación al diseño de SoC;
- Procesado digital de señales, procesado de imagen, arquitecturas para IA, y su integración en un SoC;
- Metodologías, como por ejemplo Universal Verification Methodology (UVM) y leguajes para verificación, como por ejemplo SystemVerilog;
- Diseño analógico y *mixed-signal* para la integración de IPs analógicos;
- Comunicaciones en SoC e interfaces de alta velocidad;
- Sincronización a nivel de SoC, diseño del árbol del reloj y de la red de *reset*;
- Gestión de la alimentación;
- Diseño y prototipado con FPGA;
- Programación (C/C++, Python, ensamblador);
- Síntesis RTL y diseño para test (DFT), análisis temporal;
- Diseño físico, *placement and routing*;
- Post-silicon lab bring-up, evaluación, depuración y test;
- Gestión de proyectos, comunicación y resolución de problemas.

C. Ecosistema software/hardware RISC-V

La iniciativa RISC-V necesita a su alrededor de un ecosistema completo de *software* y *hardware* para su éxito. En este sentido, instituciones internacionales, empresas y organizaciones centran sus esfuerzos en acelerar el crecimiento y adopción de esta tecnología globalmente. RISC-V International [13], una organización global sin fines de lucro, sirve como el epicentro del estándar abierto de Arquitectura de Juego de Instrucciones (ISA) RISC-V, así como de sus especificaciones asociadas y la comunidad de partes interesadas. Al adoptar RISC-V, la comunidad puede colaborar en inversiones técnicas compartidas, contribuir al desarrollo estratégico futuro, acelerar el proceso de creación, beneficiarse de una libertad de diseño y lograr notables reducciones en los costos asociados a la innovación. Por otro lado, la iniciativa RISC-V Software Ecosystem, (RISE) creada en Linux Foundation [14] tiene como objetivo aunar esfuerzos de colaboración, dirigido por líderes del sector con la misión de acelerar el desarrollo de herramientas *software* de código abierto para la arquitectura RISC-V.

Los componentes del ecosistema *software* de RISC-V son diversos y abarcan todas las capas, desde el *firmware* de bajo nivel, drivers de dispositivos y los *bootloaders* hasta un kernel de sistema operativo totalmente funcional, aplicaciones y herramientas de diseño y verificación. Los numerosos esfuerzos de la comunidad se dirigen a las necesidades de clases específicas de aplicaciones que van desde la computación de ultra bajo consumo para IoT hasta la amplia gama de sistemas embebidos e incluso plataformas informáticas de supercomputación a nivel exaescala.

Para desarrollar aplicaciones, es necesario disponer de *drivers* y *API* que se comunique directamente con la plataforma *hardware*. Este *software* de bajo nivel debe ponerse en marcha con emuladores y simuladores antes de que el *hardware* esté disponible. Por ejemplo, cuando RISC-V International define características completamente nuevas en el conjunto de instrucciones, el desafío es que los desarrolladores no quieren esperar dos o tres años para que el sistema en un chip fabricado con la nueva característica esté disponible para probarla y escribir la correspondiente aplicación *software*. En este sentido hay que resaltar la importancia de las herramien-

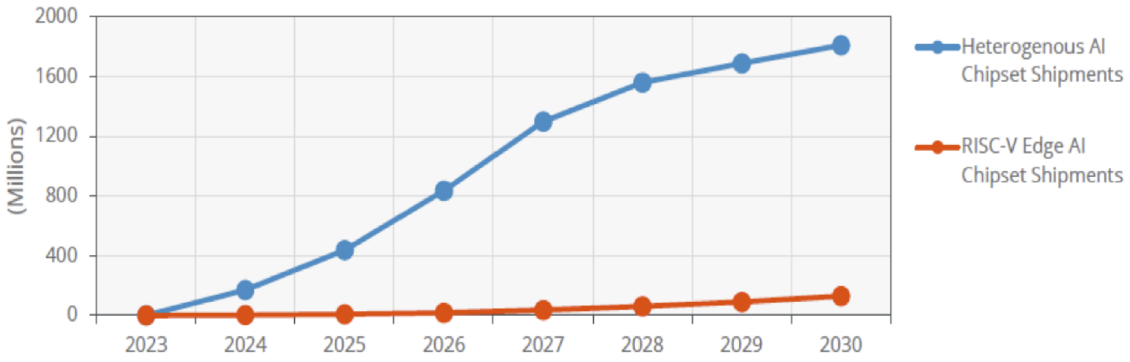


Figura 3. La utilización de chipsets heterogéneos para IA alcanzarán más de 1.800 millones en 2030. También en 2030 se utilizarán 129 millones de sistemas de aceleración para IA en el borde basada en RISC-V. (Fuente: Informe 2024 ABI Research Group).

tas de simulación y emulación, así como las utilizadas para la verificación en el proceso de diseño.

Una vista del ecosistema *software* en torno a la tecnología RISC-V se presenta en [15]. Este amplio ecosistema está compuesto por simuladores, compiladores y librerías, herramientas para depurado, herramientas para *bootloader* y monitoreo, sistemas operativos y *kernels*, sistemas operativos en tiempo real, entornos de desarrollo y herramientas de verificación, entre otras.

Por otro lado, en la actualidad hay más de 100 núcleos RISC-V, 40 SoC basados en RISC-V y numerosas plataformas SoC disponibles, y el numero crece ([16], [17]). Mientras la Fundación RISC-V protege el estándar y protege y promueve la arquitectura libre y abierta del conjunto de instrucciones RISC-V junto con su ecosistema de *hardware* y *software* para su uso en todos los dispositivos informáticos, otras muchas organizaciones están construyendo diversas partes del ecosistema RISC-V. Como ejemplo de estos esfuerzos de la comunidad, en [18] se encuentra una guía que recoge contribuciones sobre la arquitectura RISC-V, aplicaciones, bibliotecas *software* y *hardware* y herramientas del ecosistema.

IV. Estructura de la formación basada en microcredenciales para el ecosistema RISC-V

La organización de una formación en el ecosistema *HW/SW* RISC-V basada en microcredenciales implica una estructura de conocimientos complejos que posiblemente deban estar integrados en programas de cooperación entre instituciones y empresas que enriquezcan con su *know-how* el programa desde el punto de vista global, sin perder de vista las potencialidades de cada universidad. Es importante, por un lado, que la formación esté condicionada por la demanda de capacidades y habilidades que los empleadores del sector SoC requieren y por otro, que el estudiante pueda elegir, en esta formación, su recorrido curricular, seguramente con un perfil interdisciplinar potenciado como personal experto en distintas áreas.

Para el diseño de un programa de microcrédenciales de SoC basados en RISC-V, al no estar cubierto por un programa reglado y permitir el acceso a estudiantes con un conjunto de conocimientos heterogéneos de partida, es necesario que el programa tenga en cuenta y cubra el recorrido que el estudiante quiera realizar para alcanzar sus objetivos formativos y que cuente con distintos puntos de entrada dependiendo de la formación inicial e interés del estudiante.

Sin pérdida de generalidad, y suponiendo que el estudiante (por ejemplo, un estudiante de los grados en ingeniería electrónica o en informática existentes en el estado español) no posee esos conocimientos específicos de la formación en el ecosistema SoC basado en RISC-V, es necesario establecer un conjunto mínimo de conocimientos que el estudiante pueda alcanzar dentro del propio programa de microcredenciales. También, superada esta etapa inicial, la estructura de la formación debe ofertar cursos independientes que especialicen la formación del estudiante en algunos de los conocimientos requeridos por los generadores de empleo.

Como comentamos anteriormente, los conocimientos y habilidades demandados por las empresas del sector van a condicionar perfectamente la estructura de una formación de SoC basada en microcredenciales para el ecosistema RISC-V. Pero no se debe olvidar que, para encontrar una solución adecuada a este problema, aspectos tales como la motivación (demanda laboral o entusiasmo del alumno por el ecosistema), disponer de recursos humanos (expertos y personal de apoyo), de material adecuado, de colaboración entre instituciones públicas y privadas y financiación ayudarán de forma notable al éxito de esta formación.

En esta línea, la necesidad de colaboración entre distintas instituciones es un aspecto relevante. Esta colaboración puede favorecer la compartición de recursos, como, por ejemplo, el material desarrollado de forma conjunta y que sea accesible para los estudiantes. Ello contribuye de forma notable a la consecución de los objetivos formativos. Hay que tener en cuenta que este tipo de cursos requiere de una formación práctica importante. Desarrollar el material práctico supone un coste importante para la institución, ya sea tanto en medios materiales como en horas de desarrollo. Compartir esos costes mediante desarrollos conjuntos genera un beneficio multiplicador del impacto obtenido. Este es uno de los principios de la comunidad RISC-V: compartir los proyectos desarrollados ya sea mediante plataformas GitHub o similares.

Por tanto, la disponibilidad de material, tanto de formación teórica como práctica pudiera parecer un problema resuelto. La experiencia nos muestra que es necesario dedicar un gran esfuerzo para poder realizar un proceso de selección e integración en esquemas productivos del posible material práctico a utilizar en los recorridos formativos plateados. La escasez de documentación relativa a los *cores* y a los métodos de diseño, tarea generalmente soportada con una mínima información (las empresas comerciales dedican de-

partamentos completos a esta costosa labor) no facilita la labor del profesor. Bajo nuestro punto de vista es labor del docente definir el punto de partida, el recorrido a realizar en el programa de microcredenciales, seleccionar el material necesario y desarrollar aquel que pueda no estar disponible. La presencia de equipos interdisciplinares ayudará de forma relevante y con resultados multiplicadores en esta labor.

Se trató anteriormente el posible perfil heterogéneo de los estudiantes candidatos a realizar la formación basada en microcredenciales. La capacidad de trabajo autónomo es clave para este tipo de programas. Además de alentar a los estudiantes a seguir un aprendizaje interdisciplinario, en el proceso de diseño creativo es preciso motivar a los estudiantes para que realicen su propio estudio, lo que requiere la cooperación intensiva del personal docente con el estudiante y la aplicación de su experiencia en los aspectos prácticos de la formación. Con el fin de mejorar el estudio independiente es de interés que el programa de microcredenciales incluya conferencias (actividades), experimentos, se apoye en técnicas de educación semipresencial, prácticas y talleres o actividades relacionadas. Es de interés que los estudiantes publiquen sus resultados significativos obtenidos como resultados del desarrollo de su trabajo para lo cual se deben identificar o crear la infraestructura necesaria, añadiendo valor a los resultados obtenidos.

Atendiendo a las competencias demandas por las empresas del sector de diseño y fabricación de chips y SoC y teniendo en cuenta aspectos heterogéneos del posible alumnado proponemos una estructura de pila de micro cursos agrupados en tres niveles formativos: nivel básico, nivel intermedio y nivel avanzado. Cada uno de los niveles organizados en módulos permite obtener credenciales de forma individualizada. Los módulos conforman un itinerario formativo para RISC-V. Cada uno de estos módulos está organizado en 12 créditos y la duración de cada curso está adaptada al nivel de dificultad. Todos los cursos incluyen formación teórica y práctica, pudiendo combinarse la modalidad virtual para los aspectos teóricos y la presencial para la formación práctica en el laboratorio. En la Fig. 4 se muestra la organización general, incluyendo la organización por módulos, la duración de los módulos y cursos y el título de los cursos propuestos, que se desarrollan en este apartado. Se ha tenido en cuenta que un crédito ECTS equivale a 25 horas de esfuerzo del estudiante, correspondiendo a 10 horas de interacción entre el estudiante y el profesor y a 15 horas de trabajo personal.

Figura 4. Estructura del programa de microcredenciales propuesto.

A. Módulo de nivel básico

Este módulo es introductorio para alumnos de ingeniería y alumnos de FP y trabajadores del sector que quieran formarse en conceptos básicos del ecosistema RISC-V, además de cubrir competencias en diseño lógico, diseño RTL y una breve introducción al diseño basado en FPGA. El módulo consta de 12 créditos ECTS. Cada curso tiene una duración de 1,5 créditos ECTS. Se han incluido los siguientes cursos:

- **MB1: Introducción a RISC-V**. Este curso introduce la arquitectura RISC-V, el ecosistema de RISC-V y la organización de la comunidad RISC-V.org.
- **MB2: Arquitectura RISC-V**. Este curso cubre los aspectos teóricos de la arquitectura ISA de RISC-V: formatos de instrucciones, registros, juego de instrucciones para los distintos tipos de arquitecturas.
- **MB3: RISC-V *Toolchain***. En este curso se tratan de forma práctica las herramientas de compilación, ensambladores, y herramientas de emulación, entre otros, de la arquitectura RISC-V.
- **MB4: Lenguajes de programación C/C++, Python**. Este curso básico está orientado a los estudiantes sin formación en lenguajes de programación C/C++ y Python. Además, se incluye la utilización de herramientas de desarrollo basadas en Linux, tales como compiladores, *makefiles*, *scripts*, etc.
- **MB5: Desarrollo de aplicaciones**. El objetivo es desarrollar aplicaciones completas sobre emuladores y plataformas existentes que utilizan procesadores basados en RISC-V ya sea utilizando aproximaciones *baremetal* o FreeRTOS, por ejemplo.
- **MB6: Diseño lógico**. En este curso se presentan los aspectos básicos del diseño lógico, cubriendo el diseño combinacional, aspectos de la representación de los datos, circuitos aritméticos, máquinas de estado y máquinas de estado finito com ruta de datos (FSMD).
- **MB7: Diseño con VHDL/SystemVerilog**. Este curso introductorio incluye los principios de diseño con lenguajes de descripción *hardware* ya sea usando VHDL o SystemVerilog y su utilización en entornos de simulación.
- **MB8: Introducción al diseño con FPGAs**. Este curso incluye la aplicación de los conceptos de diseño lógico y diseño con HDL para la implementación en dispositivos FPGA de distintos bloques diseñados a nivel RTL.

B. Módulo de nivel intermedio

Los cursos de nivel intermedio son de 3 créditos ECTS y para su realización requieren que el estudiante demuestre que ha alcanzado los resultados del aprendizaje del nivel básico.

El módulo consta de 12 créditos ECTS. Los cursos incluidos en este módulo son los siguientes:

- **MI1: Diseño de una CPU RISC-V**. En este curso se explica el proceso de diseño de una CPU básica para la ejecución de un subconjunto de instrucciones para tipos de datos enteros. El curso incluye la simulación de las unidades funcionales diseñadas en HDL y su control.
- **MI2: Integración en FPGA de núcleos RISC-V**. A partir de *cores* RISC-V disponibles, se integra en una placa FPGA dicho *core*, pudiendo ejecutar una aplicación *baremetal* o basada en FreeRTOS.
- **MI3: RISC-V Toolchain avanzado y técnicas de optimización**. En este curso se incluyen distintas herramientas avanzadas del ecosistema de RISC-V y se introducen distintas técnicas de optimización del código y su inclusión en el compilador.
- **MI4: RISC-V y Linux**. El curso incluye la elección de *cores* con soporte al sistema operativo Linux, su integración en un SoC para FPGA, la compilación del entorno de arranque, la configuración del *kernel* y de las aplicaciones disponibles en el *rootfs*..

C. Módulo de nivel avanzado

Los cursos de nivel avanzado tienen una igualmente son de 3 créditos ECTS y requieren que el estudiante haya alcanzado los resultados del aprendizaje del nivel intermedio. El módulo igualmente supone un esfuerzo de 12 créditos ECTS. Los cursos incluidos en este módulo son los siguientes:

- **MA1: RISC-V SoC Design**. Se trata de un curso avanzado, donde se tienen en cuenta aspectos a nivel de sistema, tales como la arquitectura de buses, la jerarquía de memoria, las interrupciones o traps, los modos de operación etc. La arquitectura obtenida se simula y se miden las prestaciones utilizando *benchmarks*.
- **MA2: Verificación de RISC-V basado en UVM**. Se explican los conceptos básicos relacionados con la metodología UVM (*Universal Verification Methodology*) y su aplicación a la verificación de CPUs basadas en RISC-V.
- **MA3: Implementación de *cores* RISC-V en tecnologías ASIC** Este curso avanzado pretende introducir al estudiante en la metodología de diseño orientado a tecnologías ASIC, incluyendo la síntesis RTL, optimización, DFT, implementación física y procesos de *sign-off*. *Post-silicon lab bring-up*, evaluación, depuración y test.
- **MA4: Extensión del juego de instrucciones de RISC-V**. En este curso se plantea la introducción de nuevas instrucciones especializadas para dar soporte a la aceleración de aplicaciones (operaciones vectoriales, *machine learning*, etc.). Incluye el desarrollo del soporte *software* (librerías, *drivers*).

V. Conclusiones

Las microcredenciales, a diferencia de los estudios reglados (grados y masters), pueden ser, según su definición y objetivos, un medio de enseñanza eficaz y rápido para la actualización del perfil laboral de la personas activas a lo largo de su vida laboral. Es decir, un medio de recualificación laboral continua. En este sentido, hemos hecho un propuesta de formación en torno al ecosistema RISC-V con el objeto de cubrir la demanda laboral y re-cualificar a la población activa interesada en formación en SoC.

Esta propuesta de formación basada en microcredenciales se ha estructurado en tres módulos: básico, intermedio y avanzado de 120 horas (12 créditos) cada uno. Cada módulo se organiza en una serie de cursos con sus correspondientes prácticas de tal forma que se alcanzan los objetivos del demandante de la formación. El objetivo final es cubrir las necesidades e intereses formativos del mercado laboral (cambiante) en torno al ecosistema RISC-V.

Creemos que el éxito de esta formación tiene que centrar sus pilares en la "colaboración", filosofía de la comunidad RISC-V. Es decir, lo ideal es que diferentes grupos de investigadores y enseñantes procedentes de instituciones y del sector empresarial ejecuten esta formación de manera coordinada, compartiendo recursos tanto materiales como humanos.

Además, y no menos importante a la colaboración, dado el posicionamiento estratégico que supone la formación basada en microcredenciales tal como se ha presentado, debe existir una financiación permanente para desarrollar esta formación y que el esfuerzo docente dedicado debe y tiene que ser reconocido como méritos docentes consolidables en la actividad del profesorado.

Agradecimientos

Queremos agradecer a la asociación SPANISH OPEN HARDWARE ALLIANCE (SOHA) por su iniciativa y esfuerzo para reimplantar "de nuevo", unir los recursos necesarios, hacer viable, y fomentar, el diseño de chips procesadores y de SoCs, consciente de su importancia hoy en día en un mundo globalizado pero fracturado y en compleja competencia. Concretamente agradecemos a Antonio Rubio y Rafael Gomá (BSC) por su impulso en organizar diferentes grupos de trabajo en el seno de la asociación SOHA, como el grupo GREEN RISC-V, o el grupo Nuevos Estudios, entre otros. Igualmente, los autores agradecen las aportaciones de Emma Ramos (IUMA) relacionadas con los trabajos y experimentos sobre RISC-V.

Referencias

[1] E. Commission, S. Directorate-General for Education Youth y Culture, *ECTS users' guide 2015*. Publications Office of the European Union, 2015. DOI: doi/10.2766/87192. dirección: https://www.doi.org/10.2766/87192 (visitado 10-05-2024).

[2] European Commission, *Un enfoque europeo de las microcredenciales*, 2024. dirección: https://education.ec.europa.eu/es/education-levels/higher-education/micro-credentials (visitado 20-03-2024).

[3] Ministerio de Universidades, *El Ministerio de Universidades presenta en la Universidad de Málaga el plan de microcredenciales universitarias*, jun. de 2023. dirección: https://www.universidades.gob.es/el-ministerio-de-universidades-presenta-en-la-universidad-de-malaga-el-plan-de-microcredenciales-universitarias/ (visitado 25-03-2024).

[4] United Nations, *Take Action for the Sustainable Development Goals - United Nations Sustainable Development*. dirección: https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/ (visitado 26-03-2024).

[5] K. Asanović y D. A. A. Patterson, «Instruction sets should be free: The case for RISC-V,» University of California, Berkeley, California, inf. téc., 2014, págs. 1-7. dirección: https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2014/EECS-2014-146.html.

[6] European Processor Initiative, *EPI - European Processor Initiative*, 2024. dirección: https://www.european-processor-initiative.eu/project/epi/ (visitado 26-03-2024).

[7] Consejo Económico y Social, «Memoria sobre la situación socioeconómica y laboral de España 2022,» CONSEJO ECONÓMICO Y SOCIAL, Madrid, Spain, inf. téc., jun. de 2023, pág. 548. dirección: https://www.ces.es/documents/10180/5233540/Memoria-Socioeconomica-CES-2022.pdf.

[8] Consejo de la Unión Europea, *BOE.es - DOUE-Z-2022-70041 Recomendación del Consejo de 16 de junio de 2022 relativa a un enfoque europeo de las microcredenciales para el aprendizaje permanente y la empleabilidad.* Jun. de 2022. dirección: https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-Z-2022-70041 (visitado 26-03-2024).

[9] Ministerio de Ciencia Innovación y Universidades, *Plan Microcreds. Dale forma a tu futuro*, 2023. dirección: https://www.universidades.gob.es/plan-microcreds/ (visitado 26-03-2024).

[10] K. Krewell, *RISC-V Summit Expands Influence, Shows Growing Pains*, 2023. dirección: https://www.eetimes.com/risc-v-summit-expands-influence-shows-growing-pains/.

[11] ABI Research, *1.8 Billion Heterogenous AI Chipsets by 2030, 129 Million RISC-V AI Shipments by 2030 and 36 Other Transformative Technology Stats You Need to Know*, 2024. dirección: https://www.abiresearch.com/press/18-billion-heterogenous-ai-chipsets-by-2030-129-million-risc-v-ai-shipments-by-2030-and-36-other-transformative-technology-stats-you-need-to-know/ (visitado 26-03-2024).

[12] W. group on open source hardware y software, «Recommendations and roadmap for European sovereignty on open source hardware, software and RISC-V Technologies,» European Commission, inf. téc., 2022, pág. 79. dirección: https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/recommendations-and-roadmap-european-sovereignty-open-source-hardware-software-and-risc-v.

[13] RISC-V International, *RISC-V International – RISC-V: The Open Standard RISC Instruction Set Architecture*. dirección: https://riscv.org/ (visitado 26-03-2024).

[14] RISE. The Linux Foundation, *Rise: RISC-V Software Ecosystem – Linux Foundation Project*. dirección: https://riseproject.dev/ (visitado 27-03-2024).

[15] RISC-V International, *RISC-V Software Ecosystem*, 2024. dirección: https://wiki.riscv.org/display/HOME/RISC-V+Software+Ecosystem (visitado 27-03-2024).

[16] B. W. W. Mezger, D. A. A. Santos, L. Dilillo, C. A. A. Zeferino y D. R. R. Melo, «A Survey of the RISC-V Architecture Software Support,» *IEEE Access*, vol. 10, págs. 51 394-51 411, 2022, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3174125. dirección: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3174125.

[17] S. Kalapothas, M. Galetakis, G. Flamis, F. Plessas y P. Kitsos, «A Survey on RISC-V-Based Machine Learning Ecosystem,» *Information*, vol. 14, n.º 2, 2023, ISSN: 2078-2489. DOI: 10.3390/info14020064. dirección: https://www.mdpi.com/2078-2489/14/2/64%20https://doi.org/10.3390/info14020064.

[18] M. Royal, *RISC-V-Guide: RISC-V Guide. Learn all about the RISC-V computer architecture along with the Development Tools and Operating Systems to develop on RISC-V hardware.* 2024. dirección: https://github.com/mikeroyal/RISC-V-Guide (visitado 27-03-2024).

S2A – SECONDARY EDUCATION AND VOCATIONAL TRAINING EXPERIENCES AND PROJECTS 1

DSPACE: diseño y desarrollo de un nuevo entorno de aprendizaje adaptativo mediante inteligencia artificial

Unai Hernandez-Jayo
Universidad de Deusto
48007 Bilbao (España)
Email: unai.hernandez@deusto.es

Olga Dziabenko
Universidad de Deusto
48007 Bilbao (España)
Email: olga.dziabenko@deusto.es

Javier Garcia-Zubia
Facultad de Ingeniería - Universidad de Deusto
48007 Bilbao (España)
Email: zubia@deusto.es

Diego Casado Mansilla
Universidad de Deusto
48007 Bilbao (España)
Email: dcasado@deusto.es

Unai Aguilera
Universidad de Deusto
48007 Bilbao (España)
Email:unai.aguilera@deusto.es

***Resumen*—Este trabajo presenta los resultados del primer año de desarrollo del proyecto "DSPACE: An AI-Enhanced Classroom for Deeper Learning in STEM" financiado por la Unión Europea en el programa ERASMUS+. El objetivo principal del proyecto es desarrollar un espacio de aprendizaje adaptativo en el que un tutor inteligente representado mediante un Agente Conversacional, pueda guiar al alumno a través de un camino de aprendizaje adaptado a sus capacidades**

***Index Terms*—Inteligencia Artificial, aprendizaje online, experimentación remota, aprendizaje mediante indagación.**

I. Introducción

Los sistemas de evaluación tradicionales en ciertas ocasiones no están armonizados con los planes de estudio alineados con el desarrollo de las denominadas competencias del siglo XXI, las cuales requieren una comprensión profunda por parte de los alumnos. El proyecto DSPACE (Discovery Space), propone el desarrollo de una hoja de ruta para la denominada Aula del Futuro en la cual se incorpora a la Inteligencia Artificial como una herramienta al servicio del profesor para ayudar a cada alumno a alcanzar el máximo de sus capacidades. Así, este proyecto tiene como objetivo facilitar la transformación del aula tradicional en un entorno que fomente la exploración e indagación científica y respalde el desarrollo de habilidades clave para todos los estudiantes, ya que como se ha demostrado en otros trabajos, el aprendizaje activo se considera una condición necesaria para adquirir conocimientos y habilidades profundos [1] [2]. Los socios participantes en este proyecto que tiene una duración de 3 años son: Universidad de Bayreuth (Alemania), Universidad de Deusto (España), Ellinogermaniki Agogi (Grecia), Institute of Communication and Computer Systems (Grecia), Labs-Land (España), Athens Technology Center (Grecia), European Physical Society Association (Francia) y NUCLIO – Núcleo Interativo de Astronomia e Inovação em Educação (Portugal).

II. Contexto del proyecto

La crisis derivada de la pandemia COVID-19 puso de manifiesto las numerosas insuficiencias y desigualdades de los sistemas educativos: desde las carencias en la conexión a internet o de los ordenadores necesarios para la educación en línea, pasando por los entornos y espacios de apoyo necesarios para facilitar el aprendizaje de los estudiantes.

Cuando los países cerraron las escuelas a principios de 2020 para hacer frente a la pandemia de COVID-19, el aprendizaje se hizo en línea. En los años transcurridos desde entonces, profesores, alumnos y administraciones han realizado lo que en la práctica es un curso intensivo colectivo sobre educación digital. Ha habido muchos aspectos negativos, desde la fatiga ante la pantalla y el estrés de adaptación hasta el retraso de quienes no estaban preparados para el aprendizaje digital o para aprender por sí mismos. Pero las experiencias vividas durante la pandemia y los años siguientes, han catapultado los sistemas educativos, tradicionalmente rezagados en materia de innovación, años hacia adelantes en busca de la escuela inteligente.

Sin embargo debemos tener en cuenta que las aulas remotas no son lo mismo que las inteligentes. Más bien, han sido una medida provisional que ha mantenido el aprendizaje en marcha y conservado las prácticas educativas existentes en lugar de transformarlas. Como resultado, las llamadas aulas remotas rara vez han alcanzado el mismo nivel que las físicas y, nuevamente, han sido los estudiantes que carecen de los recursos -tecnológicos o mentales- los más afectados.

Un ejemplo específico son las aulas y laboratorios de ciencias. En la mayoría de los países de la UE, el trabajo experimental, las actividades de investigación, las tareas basadas en problemas no han logrado encontrar sus equivalentes digitales durante el cierre de las escuelas. Incluso en un esquema híbrido, las restricciones impuestas crearon un marco

bastante problemático para la implementación de proyectos y actividades basados en la investigación.

La introducción de enfoques basados en la investigación en los planes de estudio escolares sigue siendo una prioridad en la mayoría de los Estados miembros de la UE. De este modo, la investigación derivada del aprendizaje mediante indagación se considera un catalizador para el desarrollo de la competencia de aprendizaje profundo de los estudiantes. Como resultado de estas investigaciones, se muestra que el aprendizaje activo es esencial para adquirir conocimientos y habilidades profundos. El aprendizaje experiencial, respaldado por la indagación, permite a los estudiantes tomar decisiones activas, experimentar las consecuencias de sus acciones y adaptar sus conocimientos y habilidades en respuesta a estas experiencias. Sin embargo, evaluar el desarrollo de estas competencias sigue siendo un desafío para los sistemas educativos.

En este contexto, las tecnologías emergentes pueden ayudar a reintegrar el aprendizaje con un sistema de evaluación y retroalimentación del alumno, utilizando datos en tiempo real para ayudar a los estudiantes a aprender mejor, a los profesores a enseñar mejor y a que los sistemas educativos sean más efectivos [3]. Mientras estudiamos ciencias o matemáticas mediante un PC o tablet, este soporte electrónico puede ahora analizar cómo estudiamos y luego mejorar nuestra experiencia de aprendizaje de manera mucho más detallada, adaptativa e interactiva.

Junto con sensores y sistemas de gestión del aprendizaje, la Inteligencia Artificial (IA) puede brindar a los profesores una verdadera idea de cómo aprenden los diferentes estudiantes de manera diferente, dónde se interesan los estudiantes y dónde se aburren, dónde avanzan y dónde se atascan. La tecnología puede ayudar a adaptar el aprendizaje a las diferentes necesidades de los estudiantes y dar a los aprendices un mayor control sobre lo que aprenden, cómo aprenden, dónde aprenden y cuándo aprenden. La IA ya se está utilizando en contextos educativos de múltiples maneras. Sin embargo, a pesar de utilizar tecnologías de vanguardia, estas aplicaciones a menudo no hacen más que automatizar algunas prácticas de aula obsoletas, en lugar de utilizar las ventajas únicas de la IA para reinventar la enseñanza y el aprendizaje.

En otras palabras, la atención de los investigadores y desarrolladores de IA que trabajan en educación hasta ahora se ha centrado en los aspectos relativamente fáciles de abordar, aunque aún complejos, como memorizar y recordar conocimientos. Pocas posibilidades que aborden problemas educativos más complejos, como el aprendizaje colaborativo o nuevas formas de evaluación y acreditación, aún no han sido completamente investigadas, y mucho menos están disponibles como productos comerciales a gran escala.

III. CONTRIBUCIONES DEL PROYECTO DSPACE

Un enfoque alternativo para la evaluación tradicional podría ser posible con herramientas de IA diseñadas para monitorizar constantemente el progreso del estudiante, proporcionar retroalimentación específica y evaluar el dominio del estudiante de la materia bajo estudio/aprendizaje. Toda esta información es susceptible de ser recopilada a lo largo del tiempo que el estudiante pasa en entornos educativos formales (y en algunos casos informales). Si bien el uso de la evaluación continua impulsada por IA para reemplazar exámenes de alto riesgo y puntuales puede ser atractivo, también ilustra los dos aspectos de la aplicación de la IA en la educación: los beneficios y los desafíos. Permitir a los estudiantes demostrar sus competencias mientras aprenden es ventajoso. Estas aplicaciones (evaluación continua y adaptativa habilitada por IA) han sido denominadas como la çuarta revolución educativa"[4][5]. Sin embargo, es importante reconocer desde el principio que el uso de la IA para el aprendizaje y la evaluación también plantea varias preocupaciones que aún no se han abordado adecuadamente. Estas incluyen desafíos sobre su integración efectiva en la práctica educativa, la falta de evidencia sólida sobre su eficacia y su posible impacto en los roles de los profesores, así como cuestiones éticas más amplias [6][7].

El consorcio del proyecto Discovery Space, con experiencia previa en investigaciones que tenían como objetivo la implementación de innovaciones basadas en TIC en entornos educativos, propone un enfoque tangible para responder a los desafíos mencionados anteriormente mediante el desarrollo de una hoja de ruta para el Aula Mejorada mediante IA para un Aprendizaje Profundo en el ámbito STEM, el cual tiene que facilitar la transformación del aula tradicional en un entorno innovador que fomente la exploración científica y apoye el desarrollo de habilidades clave para todos los estudiantes. Para lograrlo, el consorcio propone:

- Realizar un ejercicio de previsión para aumentar la comprensión crítica compartida del potencial, oportunidades, barreras, problemas de accesibilidad y riesgos del uso de tecnologías emergentes (sistemas de evaluación mediados por la IA combinados con interfaces de realidad aumentada y virtual) para la enseñanza y el aprendizaje de STEM, considerando al mismo tiempo un marco para la digitalización sostenible de la educación y el aprendizaje en el futuro.
- Proporcionar evidencia de investigación sobre la adaptación y la integración del uso de enfoques basados en la investigación digitalmente mejorados, con el fin de aumentar y extender el aprendizaje, al tiempo que se mantiene su dimensión humana y relevancia social.
- Proporcionar buenas prácticas en forma de escenarios sobre la capacitación de profesores, formadores y estudiantes con las habilidades necesarias para el uso de la tecnología de manera creativa, crítica, competente e inclusiva.
- Desarrollar una formación de docentes innovadora y adecuada en relación con las prácticas educativas en el Aula Mejorada por IA para un Aprendizaje más Profundo en STEM.
- El proyecto tiene como objetivo el desarrollo de un Entorno de Aprendizaje Exploratorio (Exploratory Learning Space), el Espacio de Descubrimiento (Exploratory Learning Environment), para facilitar la investigación y reso-

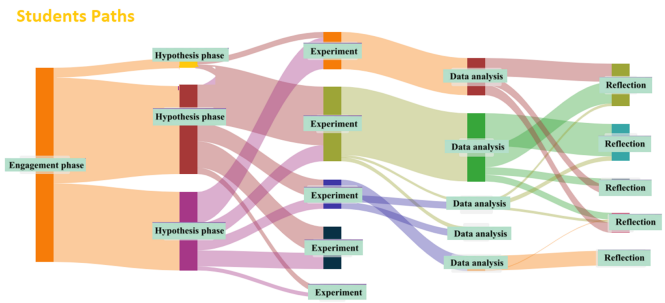


Figura 1. Ejemplo de Learning Path

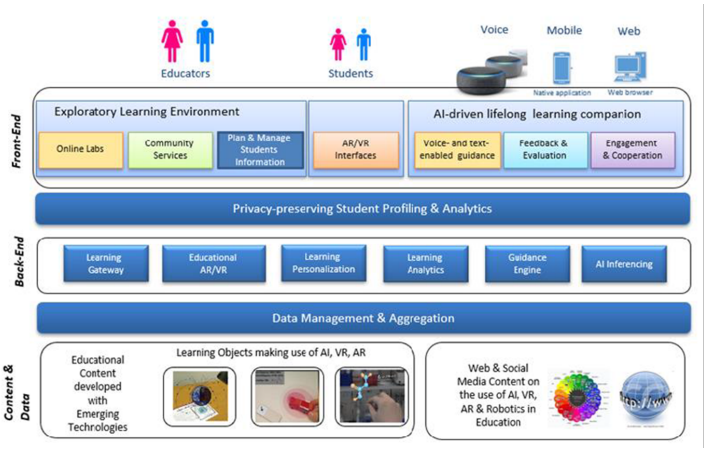


Figura 2. Arquitectura del Espacio de Exploración de Aprendizaje DSPACE

lución de problemas de los estudiantes mientras trabajan con laboratorios virtuales y remotos. Este entorno estará mediado mediante un sistema de tutorización basado en IA para proporcionar el apoyo y la orientación necesarios a los estudiantes, y con interfaces de realidad virtual y aumentada para mejorar la experiencia de aprendizaje, facilitar la colaboración, el modelado y la resolución de problemas.

Mientras utilizan el sistema, los estudiantes serán supervisados durante el proceso de construcción de su propio conocimiento explorando el entorno de aprendizaje y estableciendo conexiones en su esquema de conocimiento existente. El papel de la IA será minimizar la carga cognitiva que a menudo se asocia con el aprendizaje exploratorio al proporcionar orientación y retroalimentación automatizadas, basadas en el seguimiento del conocimiento y el aprendizaje automático [8]. Esta retroalimentación aborda conceptos erróneos y propone enfoques alternativos para apoyar al estudiante mientras realiza las tareas experimentales. El tutor inteligente materializado en un Agente Conversacional gestionado mediante IA tiene como objetivo apoyar a los estudiantes en el desarrollo de su propio camino de aprendizaje (Figura 1). Se pretende así proporcionar una estructura a la experiencia del estudiante y permitir que cada estudiante de manera individual pueda lograr aquellas metas que requieran un compromiso extendido o persistencia en múltiples contextos y oportunidades de aprendizaje.

El papel de los profesores en este entorno de aprendizaje exploratorio es el de un ”facilitador”del proceso de aprendizaje [9]. Este papel sería relativamente fácil en la interacción estudiante-tutor uno a uno, pero ampliarlo al número de estudiantes presentes en un aula típica plantea varios desafíos. Dada la naturaleza abierta de las tareas en las que los estudiantes están trabajando, constituye un desafío importante para los profesores saber qué estudiantes están progresando, cuáles están fuera de tarea y cuáles tienen dificultades y necesitan apoyo adicional. Tales herramientas podrían capacitar a los profesores proporcionándoles evidencias del aprendizaje de los estudiantes.

IV. Creación del Espacio de Exploración de Aprendizaje DSPACE

El Espacio de Exploración de Aprendizaje es la aplicación de acceso de los estudiantes a su Learning Path, y en el cual se integran todos los elementos necesarios para ejecutar su camino de aprendizaje: recursos educativos, materiales del profesor, acceso a terceras webs, acceso a laboratorios remotos y virtuales. Este sistema es accesible totalmente a través de tecnología web de forma ubicua para todos, desde cualquier lugar y en cualquier momento. La arquitectura del sistema del se presenta en la Figura 2. Consta de tres componentes principales: el Sistema de Gestión del Espacio de Descubrimiento, el Compañero de Aprendizaje Permanente impulsado por IA y las Interfaces de AR/VR en general.

Esta arquitectura está basada en un sistema modular de manera que el profesor tenga total libertad para crear cada Espacio de Exploración de Aprendizaje (ELE por sus sigles en inglés - Exploratory Learning Environment) según los conceptos teórico-prácticos que quiera trabajar con sus alumnos.

De esta forma, una parte importante del sistema es el denominado Authoring Tool. Esta herramienta es la que se ha creado durante la primera fase del proyecto y que actualmente está en fase de testeo. Mediante la Authoring Tool el profesor puede realizar las siguientes acciones:

- Definir grupos de alumnos. Se trata de un sistema de gestión de alumnos mediante el cual el profesor puede en primer lugar crear un listado de IDs y contraseñas de usuarios anónimos. De esta forma, es el profesor el único que conoce la identidad real de cada estudiante ya que en la base de datos DSPACE no se almacena ninguna información sobre la identidad de los estudiantes. Una vez creado el listado de estudiantes, el profesor asigna a cada grupo el ELE o ELEs que quiere trabajar en clase.
- Creación de ELE. Se trata de una herramienta completamente dinámica que se explica en detalle en la siguiente subsección.

Junto con el Authoring Tool, la otra parte fundamental del sistema es el denominado Students’ Interface. Es en esta

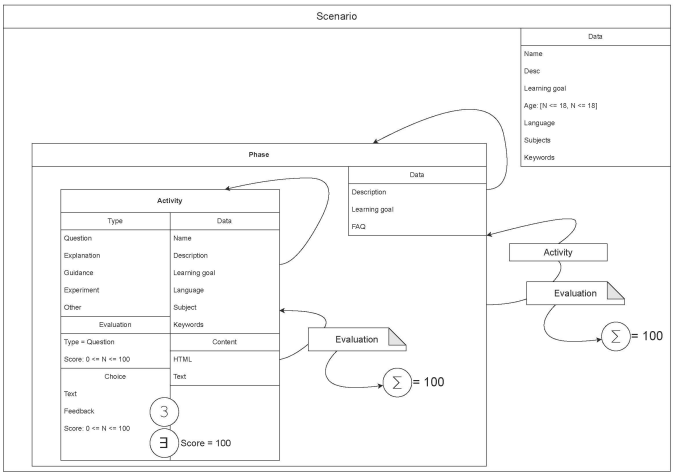


Figura 3. Estructura de un ELE

aplicación del ecosistema DSPACE en la que los estudiantes realizan su Learning Path mediante la supervisión y apoyo del Agente Conversacional.

IV-A. DSPACE Authoring Tool

Al Authoring Tool es una aplicación eminentemente dinámica y versátil para que el profesor pueda crear los Espacios de Exploración según sus necesidades y los objetivos de aprendizaje que quiera que sus estudiantes alcancen. La estructura recursiva de un ELE se muestra en la Figura 3.

Los principales elementos de un ELE son:

1. Fases: relativas a las fases de aprendizaje mediante el modelo de indagación, el cual se basa en las etapas de Orientación, Conceptualización, Investigación, Conclusión y Discusión [10]. Sin embargo, el profesor puede decidir si el ELE que está creando consta de estas 5 fases, de menos fases o de más fases, según su propio criterio, añadiendo o quitando fases.
2. Actividades: toda fase debe constar al menos con una actividad. En el ecosistema DSPACE se consideran las siguientes actividades: Explicaciones, las cuales se consideran información/conocimiento del escenario bajo estudio que el profesor quiere transmitir a los estudiantes; Experimentos, mediante los cuales el estudiante puede interactuar con laboratorios virtuales o remotos y ejecutar experimentos para poner en práctica los conceptos transmitidos mediante las explicaciones del profesor; Actividades de evaluación, basadas en cuestionarios que pueden tener tantas preguntas como el profesor decida y cada pregunta tantas opciones como el profesor considere. Cada cuestionario lleva asociada una rúbrica que también es definida por el profesor y que determina la siguiente actividad a ofrecer al estudiante según la calificación obtenida en cada cuestionario; Guías: son explicaciones ad-hoc según el rendimiento de cada alumno en cada de las actividades de evaluación.

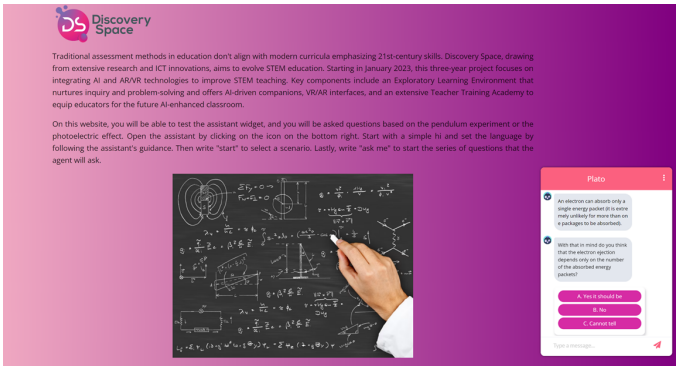


Figura 4. Vista del estudiante DSPACE

Se observa por tanto que el profesor tiene total libertad para determinar el tipo de fases y actividades de las que constará un ELE. Al mismo tiempo, el profesor es quien decide cual es la siguiente actividad a realizar por todos los alumnos o cada tipo de alumno según el rendimiento obtenido en las pruebas de evaluación. Se trata por tanto de una herramienta versatil pensada para que el profesor pueda sintetizar los diversos caminos y necesidades de aprendizaje que pueden tener sus estudiantes, tan y como se mostró en la Figura 1

IV-B. DSPACE Students' interface

Por su parte, la vista del estudiante (Students' View) se muestra en la Figura 4. Esta interfaz consta de 2 elementos diferenciados:

1. Interfaz del Estudiante, en el cual se le muestran al estudiante los contenidos de las actividades. También aparecerán aquí integrados los accesos los laboratorios remotos o virtuales seleccionados por el profesor. De esta forma nos aseguramos de que el estudiante no tenga que logearse en páginas de terceros para completar un espacio de aprendizaje. Además, en este espacio se mostrará la información complementaria que el estudiante pudiera necesitar para completar un cuestionario, como por ejemplo, imágenes.
2. Agente Conversacional (AC). En la esquina inferior derecha de la Figura 4 se puede observar el Agente Conversacional que desempeña el paper del tutor acompañante durante el proceso de aprendizaje. Será el tutor el que recomiende al estudiante la siguiente actividad a desarrollar según el Learning Path creado por el profesor en el Authoring Tool y según su desempeño. Además, este AC a medida que el espacio DSPACE vaya siendo usado por más alumnos irá aprendiendo cómo los estudiantes van ejecutando cada Learning Path de modo que podrá hacerles sugerencias de actividades, pero siempre supervisadas por el profesor físico.

V. Conclusion

EL proyecto DSPACE dió comienzo en enero de 2023, estando prevista su finalización para diciembre de 2025. Durante la segunda anualidad del proyecto se van a realizar diferentes

actividades formativas con profesores en primer lugar para enseñarles a utilizar la herramienta de diseño de ELEs para posteriormente, en una segunda fase del proyecto, realizar un pilotaje con estudiantes. Durante esta fase de pilotaje se van a recoger datos de uso de la herramienta así como la opinión tanto de profesores como estudiantes que ayuden a validar los desarrollos realizados. De este modo en la tercera anualidad del proyecto se espera obtener una herramienta consolidada y que pueda ofrecerse de manera general a la comunidad educativa.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto DSPACE https://discoveryspace.eu/ (ID 101086701) está financiado por la Unión Europea en el programa ERASMUS-EDU-2022-PI-FORWARD

REFERENCIAS

[1] Sotiriou, S.A., Lazoudis, A. Bogner, F.X. *Inquiry-based learning and E-learning: how to serve high and low achievers*. Smart Learn. Environ. 7, 29 (2020). https://doi.org/10.1186/s40561-020-00130-x

[2] de Jong, T. *Instruction based on computer simulations and virtual labs*. In R. E. Mayer P. A. Alexander (Eds.), Handbook of research on learning and instruction (2nd ed., pp. 1123–1167). (2016) New York: Routledge

[3] Organisation for Economic Cooperation and Development - OECD, *OECD Digital Education Outlook 2021: Pushing the Frontiers with Artificial Intelligence, Blockchain and Robots*, OECD Publishing, Paris, (2021), https://doi.org/10.1787/589b283f-en

[4] Luckin, R. *Towards artificial intelligence-based assessment systems* . Nat Hum Behav 1, 2017, 0028.

[5] Seldon, A. and Abidoye, O. *The Fourth Education Revolution: Will artificial intelligence liberate or infantilise humanity?* University of Buckingham Press. 2018

[6] Holmes, W., Bektik, D., Whitelock, D. and Woolf, B. P. *Ethics in AIED: Who cares?* 20th International Conference on Artificial Intelligence in Education (AIED'19), 25-29 Jun 2019, Chicago.

[7] Holmes, W., Bialik, M. and Fadel, C. 2019. Artificial Intelligence in Education: Promises and implications for teaching and learning. Boston, MA, Center for Curriculum Redesign.

[8] de Jong, T., Lazonder, A., Pedaste, M., Zacharia, Z. *Simulations, games, and modeling tools for learning*. In F. Fischer, C. E. Hmelo-Silver, S. R. Goldman, P. Reimann (Eds.), International Handbook of the Learning Sciences (pp. 256-266). 2018. Routledge, Taylor and Francis. https://doi.org/10.4324/9781315617572

[9] P. Dillenbourg. *Design for classroom orchestration*. Computers and Education, 69:485 – 492, 2013.

[10] de Jong T, Gillet D, Rodríguez-Triana MJ, Hovardas T, Dikke D, Doran R, Dziabenko O, Koslowsky J, Korventausta M, Law E, Pedaste M, Tasiopoulou E, Vidal G, Zacharia ZC. *Understanding teacher design practices for digital inquiry-based science learning: the case of Go-Lab*. Educ Technol Res Dev. 2021;69(2):417-444. doi: 10.1007/s11423-020-09904-z. Epub 2021 Jan 11. PMID: 33456285; PMCID: PMC7799867.

Motivando al estudiantado de Electrónica básica mediante el aprendizaje basado en retos

José V. Benlloch-Dualde
DISCA-ETSINF
Universitat Politècnica de València
Valencia, España
jbenlloc@disca.upv.es

Juan-Luis Posadas-Yagüe
DISCA-ETSINF
Universitat Politècnica de València
Valencia, España
jposadas@disca.upv.es

Vicent Lorente Garcés
DISCA-ETSINF
Universitat Politècnica de València
Valencia, España
vlorent@disca.upv.es

Sara Blanc
DISCA-ETSINF
Universitat Politècnica de València
Valencia, España
sablacla@disca.upv.es

Laura Grindei
Technical University of Cluj Napoca,
Cluj Napoca, Romania
laura.grindei@ethm.utcluj.ro

***Abstract*—Para mejorar la motivación del estudiantado de informática en el aprendizaje de electrónica, se ha desarrollado un programa intensivo híbrido en el marco Erasmus+ titulado DIG-SENSING, cuyo objetivo principal es abordar problemas socioambientales reales mediante el diseño de circuitos electrónicos y la programación de microcontroladores. Tras una formación preparatoria previa, que incluía seminarios sobre microcontroladores, entorno de desarrollo Arduino, sensores y actuadores, y tecnologías de comunicación, los participantes han preparado propuestas para solucionar los retos planteados que, trabajando colaborativamente en equipos internacionales, han podido implementar con éxito durante una semana de trabajo.**

Keywords— Aprendizaje basado en retos, Blended Intensive Programmes, microcontroladores, motivación

I. Introducción

Buena parte del estudiantado del grado en Ingeniería Informática puede experimentar dificultades en su primera asignatura de Electrónica, cuando trata de aplicar los conceptos necesarios para analizar circuitos de baja o media complejidad, aunque se hayan estudiado previamente en una asignatura de Física, como es nuestro caso. Nos referimos a conceptos tales como la ley de Ohm, el cálculo de la tensión en un punto del circuito, o el uso de los modelos asociados a los distintos dispositivos semiconductores, por citar unos cuantos. Esto supone, en no pocas ocasiones, una falta de motivación por la asignatura o incluso el fracaso académico en la misma.

En general, esta problemática se une a temarios extensos, que obligan a un ritmo acelerado de las sesiones de aula, y a unas prácticas de laboratorio bastante dirigidas que, fundamentalmente, tratan de fijar lo visto en el aula. Además, la ordenación académica de la asignatura en cuestión, con 10 profesores participando en su docencia, unos 500 estudiantes matriculados y grupos cada vez más numerosos (en el curso 2023-24, unos 60 estudiantes por grupo de aula y unos 30 en el laboratorio), no invita a plantear grandes cambios en el modelo pedagógico.

Con el propósito de hacer frente a esta situación, un grupo de docentes se planteó ensayar otro acercamiento a la disciplina fuera de la docencia reglada. Se trataba, por una parte, de proponer un enfoque mucho más aplicado y, por otra, de conectarlo con el mundo de la programación, que supuestamente es la materia de mayor interés para nuestro alumnado. Con estas dos premisas en mente, se propuso un aprendizaje basado en retos que, mediante el uso de una placa microcontroladora de bajo coste tipo Arduino [1], permitiera abordar problemas reales que resultaran interesantes para el alumnado.

En el año 2008, la compañía Apple acuñó el enfoque *Challenge Based Learning* (aprendizaje basado en retos) trabajando con educadores estadounidenses dentro de su proyecto "Apple Classrooms of Tomorrow - Today". Se definió como “an engaging multidisciplinary approach to teaching and learning that encourages students to leverage the technology they use in their daily lives to solve real-world problems. Challenge Based Learning is collaborative and hands-on, asking students to work with peers, teachers, and experts in their communities and around the world to ask good questions, develop deeper subject area knowledge, accept and solve challenges, take action, and share their experience” [2]. Una revisión bibliográfica reciente [3] investiga la aplicación de este concepto en la enseñanza universitaria, entre 2009 y 2020. Sus autores concluyen que se ha utilizado ante todo como un método para la transformación del aprendizaje de adultos. Respecto a los contextos en los que se ha aplicado, destaca el de las Ingenierías [4] [5] [6] [7] aunque señalan como emergentes los de Medicina [8] [9] y Diseño.

Otro trabajo de revisión bibliográfica [10] sobre el aprendizaje basado en retos en la educación universitaria introduce un marco que define las características más repetidas en los 100 trabajos analizados: temas de importancia global, retos del mundo real, colaboración, tecnología, flexibilidad, multidisciplinariedad y especificidad de las disciplinas, la definición de los retos y la creatividad e innovación. Estas características se alinean muy bien con estrategias globales de nuestra institución, como son el programa de competencias transversales o los objetivos de desarrollo sostenibles que difícilmente se abordan adecuadamente en el enfoque tradicional de la asignatura.

Para hacer la propuesta más atractiva, la idea se plasmó como un proyecto BIP (*Blended Intensive Programmes*), dentro del marco Erasmus+ [11]. Se trata de programas breves donde, inspirados por un enfoque de aprendizaje basado en retos, equipos transnacionales de estudiantes trabajan colaborativamente para abordar problemas reales, combinando un trabajo remoto inicial con un periodo de trabajo presencial en el que todos los estudiantes se trasladan al país de la universidad organizadora para una movilidad corta, normalmente de una semana.

El hecho de definirlo como un proyecto oficial ha facilitado que la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Informàtica (ETSINF) de la Universitat Politècnica de València (UPV), centro responsable del título, lo incluya dentro del catálogo específico de las actividades que serán objeto de reconocimiento de créditos en los estudios de Grado de Ingeniería Informática. En particular, se decidió que los/as estudiantes que participaran regularmente en el proyecto durante el curso 2022-23, serían reconocidos con tres créditos ECTS.

El resto del trabajo se estructura de la siguiente forma. La sección II describe aspectos generales del proyecto, así como las distintas fases llevadas a cabo durante el primer año de funcionamiento. La sección III presenta los resultados y el planteamiento para el segundo año del proyecto. Por último, la sección IV muestra las conclusiones.

II. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

En la convocatoria del curso 2022-23 es aprobado el proyecto BIP titulado "Digital Circuits and Electronics to Sensing" (DIG-SENSING). Como se comentó en la sección anterior es un proyecto europeo que, en esta convocatoria coordina la UPV y en el que participan otros tres socios: la Technical University of Cluj-Napoca (TUCN), Rumanía; la University of Applied Sciences Vienna (FH Campus Wien), Austria y la University of Limerick (UL), Irlanda.

El proyecto se ofrece principalmente a estudiantes de primer y segundo curso de los socios participantes en el proyecto y que pertenecen a titulaciones como ingeniería informática, ingeniería electrónica y eléctrica, robótica, mecatrónica e ingeniería mecánica. En nuestro caso, la mayoría de los estudiantes son del grado de Ingeniería Informática.

A. Objetivos del proyecto

El objetivo principal del proyecto es que los estudiantes, trabajando en equipo, planteen y aborden un reto socioambiental del mundo real, que ellos mismos deben identificar. Para ello, han de plantear un diseño de bajo coste que incorpore circuitos electrónicos y la programación de una placa microcontroladora de tipo Arduino. Las propuestas deben estar relacionadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas [12].

Los objetivos específicos del proyecto son:

- Motivar al estudiantado a aprender electrónica, diseñando circuitos que conecten con el mundo físico, mediante el uso de sensores y actuadores.
- Facilitar que los estudiantes apliquen sus conocimientos de programación a una placa microcontroladora que interactúa con ese mundo físico.
- Crear un entorno de aprendizaje híbrido que permita a los participantes conocer a personas de otras universidades europeas.
- Establecer nuevas sinergias interuniversitarias en el aprendizaje y la enseñanza.

B. Elección de la placa microcontroladora

Para poder abordar con éxito el proyecto, una de las primeras decisiones a tomar era la selección de la placa microcontroladora. Además de proporcionar la conexión con el mundo físico, se buscaba que integrara distintas tecnologías de comunicación inalámbrica.

La placa de desarrollo de microcontrolador ESP32 es una herramienta excelente para este fin debido a su versatilidad, bajo coste y amplia gama de funcionalidades. Integra conectividad Wi-Fi y Bluetooth, lo que permite profundizar en el ámbito de los protocolos de comunicación, facilitando proyectos relacionados con aplicaciones IoT (*Internet of Things*) y redes de sensores inalámbricas. También incorpora un amplio conjunto de periféricos integrados, tales como convertidores analógico-digitales (ADC), controladores de modulación por ancho de pulsos (PWM) e interfaces I2C y UART. Además, es compatible con el entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino *IDE*, una aplicación multiplataforma que facilita la programación incluso a los principiantes. Por último, cabe señalar que cuenta con una amplia comunidad en línea y una extensa documentación disponible, que incluye tutoriales, foros y proyectos de ejemplo. Esta abundancia de recursos facilita a los estudiantes la búsqueda de ayuda, la resolución de problemas y una curva de aprendizaje rápida. En particular, se ha trabajado con la placa Wemos D1 R32, con factor de forma de la Arduino Uno [13].

Para facilitar la realización de actividades prácticas se ha optado por utilizar también una placa multisensor que se conecta encima de la tarjeta del microcontrolador, tal y como muestra la Fig. 1. La placa multisensor incluye: dos pulsadores digitales, dos LED (azul y rojo), un LED RGB, un potenciómetro analógico, un sensor digital de temperatura y humedad (DHT11), un zumbador, una LDR, un sensor de temperatura analógico (LM35), entre otros.

C. Fases del proyecto

En esta primera edición del proyecto BIP, la primera actividad fue la difusión del mismo entre los estudiantes de primeros cursos de las universidades participantes y se completó con un seminario de presentación, organizado en la universidad que actúa como coordinadora. El evento se transmitió de forma síncrona al resto de universidades socias. Tras la misma se abrió el proceso de inscripción.

La primera fase consistió en una serie de cuatro seminarios técnicos para introducir al estudiantado en el hardware y software a utilizar, además de ir dando pistas a los participantes para pensar en sus retos. A continuación se describe en detalle los contenidos y formatos de cada uno.

Fig. 1. Placa microcontroladora ESP32 con la placa multisensor encima

El primer seminario, titulado "Introducción a los microcontroladores", fue impartido por un profesor de la FH Campus Wien, que se desplazó a la UPV. Fue igualmente

transmitido de forma síncrona mediante *MS-Teams*. Al finalizar la sesión, los estudiantes realizaron una sesión práctica bastante dirigida para familiarizarse con el conjunto placa microntroladora - placa multisensor.

El segundo seminario, titulado "Introducción al entorno de desarrollo de Arduino", fue impartido remotamente por un profesor de la *University of Limerick*. Para facilitar el seguimiento, todo el material elaborado (presentación, píldoras en vídeo, ejemplos de código) se puso a disposición de los participantes anticipadamente en la web del proyecto [14]. Los estudiantes asistentes al evento pudieron configurar su entorno para trabajar con la placa microcontroladora ESP32 y probar los distintos ejemplos presentados.

El tercer seminario, titulado "Uso de sensores y actuadores para experimentos prácticos", fue impartido por un profesor de la UPV. Como el primero, se difundió al resto de socios y se grabó para su posterior publicación. Al finalizar la sesión, los estudiantes realizaron una sesión práctica en un laboratorio equipado con instrumentación electrónica donde ensayaron los ejemplos presentados. La idea era construir un circuito que encendiera un LED cuando la luz recibida por una LDR (NSL-19M51) caía por debajo de un nivel de referencia. Para ello, se disponía de tres dispositivos para el control: un transistor bipolar, un amplificador operacional (LM393) y, finalmente, la propia placa microcontroladora. En todos los casos, había que calibrar previamente los dispositivos utilizados (LDR y potenciómetro).

El cuarto y último seminario, titulado "Tecnologías de Comunicación", fue impartido presencialmente en cada una de las universidades participantes en fechas planificadas por cada uno de los socios, pero con un esquema común de contenidos, entre los que se incluía: comunicaciones serie entre el ESP32 y el PC a través de una conexión USB; comunicaciones Bluetooth entre una placa microcontroladora y otro dispositivo, bien fuera otra placa o un teléfono móvil y, por último, comunicaciones Wi-Fi con el protocolo TCP, lo que permitía que el microcontrolador se conectara a Internet para poder publicar datos.

Cabe señalar que, a excepción del último seminario, todos se impartieron en inglés, que fue igualmente la lengua utilizada en la preparación de todos los materiales didácticos. Las grabaciones de los seminarios y toda la documentación desarrollada, se publicó en la web del proyecto [14].

Entre los estudiantes que asistieron regularmente a los seminarios, se realizó una selección final de 50 estudiantes, en función de sus expedientes académicos y de las propuestas de proyectos presentadas, en las que se valoró la justificación del enfoque social y/o medioambiental del reto, así como la solución práctica esbozada. La propuesta debía incluir también una lista con los componentes electrónicos necesarios (sensores y actuadores). Los estudiantes seleccionados se distribuyeron en 11 equipos de 4 o 5 personas y, en la mayoría de los casos, de al menos dos universidades. Estos equipos siguieron trabajando, de forma remota, en sus proyectos. Cada universidad proporcionó también algunas horas de tutorización a sus propios estudiantes para orientar las propuestas.

Por último, finalizado el curso en todas las universidades socias, los participantes se desplazaron a los laboratorios de la universidad coordinadora para implementar un prototipo, durante una semana de trabajo intensivo (*summer camp*). En esta semana, además de las actividades técnicas, se programaron también unas serie de actividades culturales.

La Tabla I resume las distintas fases del proyecto:

TABLA I. FASES DEL PROYECTO

Fase	Descripción	Fechas (2023)
0	Fase de difusión e inscripción	enero-febrero
1	Seminarios técnicos	marzo-abril
2	Propuesta de proyectos y creación de equipos	mayo
3	Trabajo remoto de los equipos preparando los proyectos	junio-mediados de julio
4	Semana intensiva (*summer-camp*)	17-21 julio

III. RESULTADOS

Tal y como se describió en la sección anterior, todo el trabajo previo debía alimentar la implementación de una serie de prototipos funcionales que dieran respuesta a los retos planteados. Con ese propósito, durante la tercera semana de julio, la UPV recibía a 50 estudiantes pertenecientes a tres universidades europeas. El profesorado participante en el proyecto, con el apoyo del personal técnico local, ponía a disposición del estudiantado los laboratorios de electrónica del Departamento de Informática de Sistemas y Computadores (DISCA).

A cada uno de los equipos se les proporcionó un conjunto placa microntroladora - placa multisensor, junto con una *protoboard* y cables. Adicionalmente, en función de las propuestas recibidas, otros materiales específicos, tales como sensores detectores de gas, de ultrasonidos, de humedad del suelo, de movimiento, de inclinación, medidores de nivel de agua, GPS, cámaras VGA, pantallas LCD, servos para motores, bombas de agua, relés, micrófonos, vibradores, o baterías, entre otros.

Los participantes completaron sus prototipos en unos cuatro días, trabajando una media de 6 horas diarias. El último día, los equipos defendieron su proyecto ante un tribunal formado por cuatro profesores de la universidad organizadora, pero ajenos al proyecto. En la evaluación de estos, hicieron uso de una rúbrica que incorporaba las siguientes dimensiones: innovación y usabilidad (0-4); dificultad (0-4); grado de terminación (0-2). A partir de la valoración global (0-10), se seleccionaron los tres mejores prototipos, que se muestran en las Fig. 2 a 4:

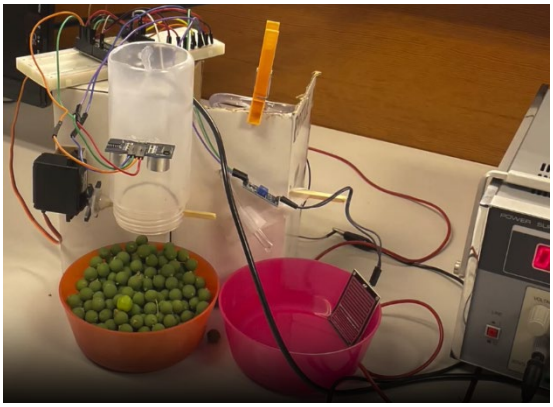


Fig. 2. Comedero para gatos (primer premio)

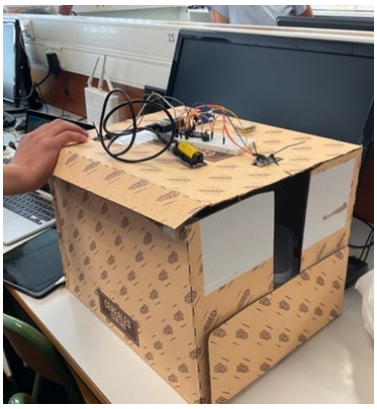


Fig. 3. Gestor de contenedores de residuos (segundo premio)

Fig. 4. Coche dirigido desde el teléfono móvil (tercer premio)

Otras temáticas abordadas en los proyectos fueron el control de riego y posicionamiento con transmisión de datos a una aplicación, un coche autónomo que seguía una línea en el suelo, o el riego automático de una planta (Fig. 5).

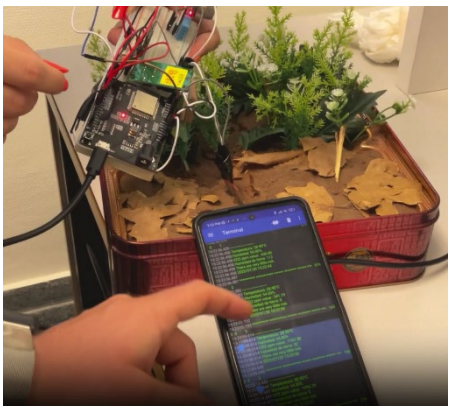


Fig. 5. Riego automático de una planta

Pese a la escasa formación previa en electrónica de los participantes, en su mayoría estudiantes de primer curso de un grado de ingeniería informática, han sido capaces de elaborar prototipos funcionales de bajo coste en el tiempo previsto.

A. Segundo año del proyecto

En el curso 2023-24 el proyecto ha vuelto a ser aprobado en el marco de Erasmus+, en este caso, coordinado por la TUCN rumana. Una evidencia del éxito obtenido por el proyecto es que en nuestra universidad, más de 100 estudiantes de los grados de Ingeniería Informática y de Informática Industrial y Robótica, se han inscrito en esta nueva edición del proyecto para realizar los seminarios de formación. En este segundo año, la semana intensiva se realizará en la TUCN. Como nuestros estudiantes no viajaron en la primera edición, se les ha ofrecido que lo hagan este año. Con el propósito que se mantengan vinculados a las actividades del proyecto, una parte de ellos está colaborando como tutores en las actividades prácticas de los estudiantes de primer curso, complementando al profesorado y, el resto, lo hacen con docentes de primaria y secundaria para introducir unas actividades prácticas sencillas con la placa microcontroladora en un centro escolar de nuestra ciudad, a modo de aprendizaje-servicio.

A falta de una valoración exhaustiva del proyecto, prevista para cuando se complete el segundo año, los estudiantes se han mostrado satisfechos con los contenidos de los seminarios y el enfoque general del proyecto, si bien sugieren reducir las exposiciones a como mucho una hora de duración. Como trabajo futuro, se pretende estudiar la posible correlación entre la participación en el proyecto y el rendimiento académico en las materias relacionadas con la electrónica.

IV. Conclusiones

Por nuestra experiencia hasta el momento, consideramos que los proyectos Erasmus BIP presentan numerosas ventajas para los estudiantes, el personal académico y las instituciones que participan en los mismos.

Los estudiantes, mediante el enfoque de aprendizaje basado en retos, mejoran sus competencias técnicas, al tiempo que desarrollan competencias transversales, como la comunicación en una lengua extranjera, el trabajo en equipo, el pensamiento crítico o la resolución de problemas, mientras trabajan en un contexto internacional y comparten valores interculturales. Sin duda, la semana de movilidad que incorporan este tipo de iniciativas supone uno de los principales alicientes para los participantes que se desplazan a un país extranjero, financiados por el proyecto Erasmus+. Las principales dificultades para el estudiantado han estado relacionadas con el comportamiento de los sensores y actuadores y su integración en el sistema.

Para los docentes, es también un estímulo colaborar con colegas de otras universidades europeas para diseñar las actividades y materiales didácticos, intercambiar experiencias y estrategias, al tiempo que les permite visitar dichas instituciones en estancias cortas.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento tanto a la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Informàtica (ETSINF) como al Departamento de Informática de Sistemas y Computadores (DISCA), de la Universitat Politècnica de València, por el apoyo dado para poder desarrollar este proyecto, así como a todos los estudiantes y personal técnico participante en el mismo.

Referencias

[1] M. Banzi, *Getting Started with Arduino*, Ill. Sebastopol, CA: Make Books - Imprint of: O'Reilly Media, 2008.

[2] M. Nichols and K. Cator, "Challenge Based Learning: Take action and make a difference," Apr. 2008.

[3] M. Leijon, P. Gudmundsson, P. Staaf, and C. Christersson, “Challenge based learning in higher education– A systematic literature review,” *Innovations in Education and Teaching International*, vol. 59, no. 5, pp. 609–618, Sep. 2022, doi: 10.1080/14703297.2021.1892503.

[4] W. B. Gaskins, J. Johnson, C. Maltbie, and A. Kukreti, “Changing the Learning Environment in the College of Engineering and Applied Science Using Challenge Based Learning,” *International Journal of Engineering Pedagogy (iJEP)*, vol. 5, no. 1, p. 33, Feb. 2015, doi: 10.3991/ijep.v5i1.4138.

[5] Á. Fidalgo, M. Sein-Echaluce, and F. García-Peñalvo, “Aprendizaje Basado en Retos en una asignatura académica universitaria,” *E Comunicaciones. Revista Iberoamericana de Informática Educativa*, pp. 1–8, Apr. 2017.

[6] F. V. Binder, M. A. Nichols, S. S. Reinehr, and A. Malucelli, “Challenge Based Learning Applied to Mobile Software Development Teaching,” *2017 IEEE 30th Conference on Software Engineering Education and Training (CSEE&T)*, pp. 57–64, 2017, [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:32332641

[7] J. Membrillo-Hernández *et al.*, “Challenge Based Learning: The Case of Sustainable Development Engineering at the Tecnologico de Monterrey, Mexico City Campus,” 2018, pp. 908–914. doi: 10.1007/978-3-319-73210-7_103.

[8] W. L. S. Cheng, “Application of Challenge-Based Learning in nursing education,” *Nurse Educ Today*, vol. 44, pp. 130–132, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.nedt.2016.05.026.

[9] S. L. Olivares Olivares, M. V. López Cabrera, and J. E. Valdez-García, “Aprendizaje basado en retos: una experiencia de innovación para enfrentar problemas de salud pública,” *Educación Médica*, vol. 19, pp. 230–237, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.edumed.2017.10.001.

[10] S. E. Gallagher and T. Savage, “Challenge-based learning in higher education: an exploratory literature review,” *Teaching in Higher Education*, vol. 28, no. 6, pp. 1135–1157, Aug. 2023, doi: 10.1080/13562517.2020.1863354.

[11] European Comission, “Erasmus+. Mobility projects for higher education students and staff.” Accessed: Dec. 27, 2023. [Online]. Available: https://erasmus-plus.ec.europa.eu/programme-guide/part-b/key-action-1/mobility-projects-for-higher-education-students-and-staff

[12] United Nations, *Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. 2015. Accessed: Mar. 18, 2024. [Online]. Available: https://sdgs.un.org/sites/default/files/publications/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf

[13] Handson Technology, “WeMOS D1 R32 ESP32 Wi-Fi and Bluetooth Board. Datasheet.” Accessed: Mar. 18, 2024. [Online]. Available: https://handsontec.com/dataspecs/module/ESP/WeMos%20D1%20R32.pdf

[14] “Digital Circuits and Electronics to Sensing (DIG-SENSING). BIP Project.” Accessed: Mar. 18, 2024. [Online]. Available: et.utcluj.ro/bip

Fomento de la perspectiva de género en el diseño de prototipos electrónicos para soluciones biomédicas.

Gil de Castro, Aurora
Departamento de Ingeniería Electrónica y de Computadores
Universidad de Córdoba
Córdoba, Spain
agil@uco.es

Santiago Chiquero, Isabel
Departamento de Ingeniería Electrónica y de Computadores
Universidad de Córdoba
Córdoba, Spain
el1sachi@uco.es

Saez Manzano, Aurora
Departamento de Ingeniería Electrónica y de Computadores
Universidad de Córdoba
Córdoba, Spain
aurora.saez@uco.es

Cañete Carmona, Eduardo
Departamento de Ingeniería Electrónica y de Computadores
Universidad de Córdoba
Córdoba, Spain
ecanete@uco.es

Gutierrez Ballesteros, Elena
Departamento de Ingeniería Electrónica y de Computadores
Universidad de Córdoba
Córdoba, Spain
p42gubae@uco.es

Lamo Anuarbe, Paula
Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología
Universidad Internacional de la Rioja
Logroño, Spain
paula.lamo@unir.net

***Abstract*—Este trabajo presenta los resultados parciales del proyecto de innovación docente "Diseño de prototipos electrónicos inclusivos para soluciones biomédicas", financiado por la Universidad de Córdoba en su Plan de innovación 2023/24. Su propósito fundamental es fomentar la perspectiva de género en la docencia de Ingeniería Electrónica, concretamente en el área del diseño de prototipos electrónicos. A través de esta iniciativa, se espera impulsar la igualdad de oportunidades, adecuar los materiales para que contemplen la perspectiva de género, fomentar vocaciones y proporcionar ejemplos destacados que desafíen los roles en el ámbito de la ingeniería electrónica.**

Keywords—Prototipado, electrónica, project-based learning, docencia en grados, perspectiva de género.

I. INTRODUCTION

La relevancia de la tecnología en las sociedades modernas ha ido en aumento, transformando la industria y permitiendo hablar de una 5ª revolución industrial (Industria 5.0). Lo digital se ha convertido en algo cotidiano en todos los ámbitos de la vida, creando un nicho de empleo y negocio que ofrece múltiples oportunidades para aprovechar al máximo el talento disponible. Sin embargo, a pesar del amplio campo de oportunidades, persisten desafíos en la participación equitativa de género en sectores tecnológicos clave [1], [2], [3].

En este sentido, la Unión Europea ha identificado el desarrollo de habilidades tecnológicas como una prioridad estratégica para sus ciudadanos y ciudadanas, reconociendo la necesidad de superar estereotipos de género y fomentar la participación de mujeres en campos STEM. Según el informe de la UNESCO [4], sólo el 35% de los estudiantes matriculados en las carreras vinculadas a las disciplinas de ciencias, tecnología, ingeniería y matemáticas (*Science, Technology, Engineering and Mathematics*, STEM) en la educación superior son mujeres, lo que refleja una brecha significativa en la representación de género en estos campos cruciales. La participación equitativa de género en el campo de la ingeniería electrónica sigue siendo un desafío global, con repercusiones significativas en la formación académica, la innovación tecnológica y el progreso social. Datos y estudios recientes, como [5], [6] demuestran que, a pesar de los avances, persisten desigualdades significativas en términos de representación, acceso a oportunidades y reconocimiento profesional para las mujeres en la ingeniería electrónica.

En este contexto, el proyecto de innovación docente "Diseño de prototipos electrónicos inclusivos para soluciones biomédicas" surge como una iniciativa fundamental para abordar esta problemática y promover la igualdad de oportunidades en la educación superior, dado que se sustenta en la necesidad imperante de superar las barreras y prejuicios de género que obstaculizan la plena participación de mujeres y otras minorías en el ámbito de la ingeniería [7], [8], [9]. También, se erige como un esfuerzo concreto para combatir estas disparidades y construir un entorno educativo más inclusivo y diverso. Además, con él se pretende trabajar el objetivo 5, "lograr la igualdad entre los géneros y empoderar a todas las mujeres y las niñas", de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) ya que busca potenciar la igualdad de oportunidades, fomentar vocaciones y servir ejemplos referentes que rompan con los roles en el campo de la ingeniería electrónica.

Para llevar a cabo la tarea, esta experiencia se desarrolla mediante una estrategia integral que incluye la adecuación de los materiales didácticos para que contemplen la perspectiva de género, la promoción de modelos de referencia que desafíen los roles de género tradicionales en la ingeniería y la implementación de acciones específicas para fomentar vocaciones en estudiantes de todos los géneros. Además, se enfatiza en la importancia de proporcionar ejemplos destacados de mujeres ingenieras y otros referentes que inspiren y motiven a los estudiantes a perseguir carreras en el ámbito STEM, contribuyendo así a la construcción de una comunidad académica más diversa y enriquecedora.

Aunque la experiencia se desarrolla en las asignaturas "Instrumentación Electrónica", "Tecnología Electrónica Aplicada" y "Diseño de Circuitos Electrónicos y Microelectrónicos", las cuales constituyen componentes obligatorios de tercer y cuarto curso del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial impartidas en la Escuela Politécnica Superior de Córdoba de la Universidad de Córdoba, la relevancia de este proyecto trasciende los límites de la academia, ya que busca impactar positivamente en la percepción social de la ingeniería electrónica y en la configuración de un futuro más equitativo y sostenible. A través de la implementación de medidas concretas y la colaboración activa de docentes, estudiantes y otros actores

clave, se espera que este proyecto genere cambios significativos en la cultura y las prácticas educativas en el campo de la ingeniería electrónica, sentando las bases para una transformación profunda y duradera.

Este manuscrito presenta los resultados parciales de esta iniciativa desarrollada en el actual curso 2023/24, destacando los avances realizados, los desafíos enfrentados y las lecciones aprendidas durante el proceso. Para ello, se organiza de la siguiente forma. En la Sección II se presenta el contexto en el que se lleva a cabo la propuesta. En la Sección III se describen las acciones llevadas a cabo. A continuación, se describen los principales resultados obtenidos. Por último, se presentan las conclusiones.

II. CONTEXTO

En España [10], [11], la primera etapa donde puede cuantificarse el número de mujeres y de hombres que optan por trayectorias vinculadas a la tecnología es en el bachillerato de ciencias y tecnológico [12]. Sin embargo, al incluir carreras o trayectorias profesionales vinculadas a las ciencias de la salud y la biología, los datos disponibles no permiten establecer diferencias entre las STEM vinculadas a ingeniería y aquellas de ciencias de la salud. Por lo que es necesario consultar los datos a nivel de universidad para garantizar el nivel de concreción deseado.

De forma específica, el proyecto se desarrolla en la Escuela Politécnica Superior de Córdoba (EPSC). En ella se lleva a cabo la docencia de los títulos de Grado en Ingeniería Eléctrica, Grado en Ingeniería Mecánica, Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Grado en Ingeniería Informática, además del Máster en Ingeniería Industrial. Estos títulos tienen un elevado grado de empleabilidad, tal y como indica el Consejo General de Colegios Oficiales de Graduados e Ingenieros Técnicos Industriales de España (COGITI) según datos recogidos en el portal ProEmpleoIngenieros.

En la Tabla I se muestran los datos disponibles sobre el número de estudiantes matriculados en la EPSC, según últimos datos publicados del Ministerio de Educación, Formación Profesional y Deportes pertenecientes al curso académico 2021/2022 [13]. Se puede apreciar que el Grado de Ingeniería Informática e Ingeniería Mecánica tienen un mayor número de alumnos matriculados. También, se puede ver que el porcentaje de mujeres matriculadas en estas titulaciones oscila entre un 8 y un 15 %.

TABLE I. NÚMERO DE ESTUDIANTES MATRICULADOS EN LA UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA. CURSO 2021/2022. [13]

Titulaciones	Total	Hombres	Mujeres
Grado de Ingeniería Informática	550	479	71
Grado en Ingeniería Eléctrica	173	159	14
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial	286	242	44
Grado en Ingeniería Mecánica	380	347	33
Total Ingeniería y Arquitectura (UCO)	2156	1.777 (82,4 %)	379 (17,6 %)
Total UCO	14.467	6.086 (42,1 %)	8.381 (57,9 %)

De forma específica, este proyecto se encuadra dentro del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial, cuyo objetivo es la formación de profesionales en el ámbito de la Ingeniería Electrónica Industrial, con una base amplia y generalista de conocimientos en Ingeniería Industrial, y una formación que garantice la adquisición de los conocimientos específicos de la titulación. Su plan de estudios se estructura en materias de formación básica, obligatorias, optativas y el trabajo fin de grado. Los alumnos/as deben cursar un total de 240 créditos ECTS. Dentro de esta, las asignaturas “Instrumentación Electrónica”, “Tecnología Electrónica Aplicada” y “Diseño de Circuitos Electrónicos y Microelectrónicos” pertenecen a los módulos específico y obligatorio de Tecnología Electrónica Industrial, las cuales constituyen componentes obligatorios de tercer y cuarto curso. Los estudiantes matriculados en ellas han adquirido previamente competencias básicas de las materias Electrónica y Electricidad, lo que les permite realizar proyectos a nivel de sistema relacionados con soluciones biomédicas. Este curso 2023/24, el número total de estudiantes matriculados en las asignaturas de tercer curso son 38 de los cuales, el 10,5% son mujeres y en asignaturas de cuarto curso 29 en total, de los cuales el 13,8% son mujeres.

Entre los recursos didácticos utilizados tradicionalmente por estas asignaturas encontramos el uso de plataformas virtuales de enseñanza-aprendizaje que permiten la integración de laboratorios a distancia o simulación de hardware [14]–[16], uso de sistemas de respuesta interactiva o el uso de aprendizaje basado en proyectos [17], en los que deben realizar una búsqueda de información bibliográfica y trabajar en una aplicación relacionada con la asignatura.

Aunque desde la Universidad y la EPSC se llevan acciones de visibilización de la mujer [18] y cada vez más asignaturas incluyen en su temario actividades para la consideración del impacto social que implica el uso o realización de los prototipos electrónicos que realicen en su carrera profesional, no son suficientes. Por ejemplo, actualmente en la asignatura de “Tecnología Electrónica Aplicada” se explica el concepto de responsabilidad social empresarial y de los ODS, enfocado al origen lícito en la procedencia de los materiales usados en la industria electrónica. Se invita al alumnado a que consulte los informes de responsabilidad social corporativa que emiten empresas de fabricación de circuitos integrados, y que evalúen cómo se acercan al cumplimiento de los ODS y si realizan actividades STEM para fomentar futuros talentos para la industria de semiconductores [19]. Sin embargo, ejemplos como este no dan a conocer el componente social que tiene el ámbito de la ingeniería electrónica, que es una actividad tecnológica creativa encargada de solucionar problemas a la sociedad y mejorar la vida de las personas. Por lo que, si se fomentase la participación de la mujer en ingeniería como actora, se conseguiría de manera natural que se incluyese la perspectiva de género en esta disciplina.

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

El proyecto de innovación educativa “Diseño de prototipos electrónicos inclusivos para aplicaciones biomédicas” en ejecución en el actual curso 2023/24, busca desarrollar un conjunto integral de competencias en los estudiantes mediante actividades cuidadosamente seleccionadas. Este enfoque se centra en fomentar la capacidad analítica y crítica para recopilar y analizar datos relevantes con el fin de formular juicios que consideren aspectos sociales, científicos y éticos, al mismo tiempo que se mejora la comunicación efectiva de ideas y soluciones a un público diverso. Paralelamente, el proyecto tiene como

objetivo elevar la competencia de los estudiantes en el uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), proporcionarles una base sólida en los principios de la electrónica, y sumergirlos en el estudio de la electrónica analógica y la instrumentación. Además, se pone un énfasis especial en el diseño y la implementación de sistemas electrónicos, cubriendo aspectos tanto analógicos como digitales y de potencia, asegurando así una formación completa que prepara a los estudiantes para enfrentar desafíos profesionales futuros. Para desarrollar estas competencias, se desarrollan dos tareas clave: A) incorporar actividades que promocionen la perspectiva de género en el contexto del prototipado electrónico y B) realización de un mini-proyecto, que se detallan a continuación.

A. Incorporar actividades que promocionen la perspectiva de género en el contexto del prototipado electrónico

Para llevar a cabo esta tarea se desarrollan cuatro actividades diferentes con objeto de proporcionar al alumnado nuevos elementos teóricos y metodológicos para la comprensión de la realidad social en la que afrontarán su ejercicio de la profesión.

- *Creación de materiales divulgativos, tales como vídeos breves, trípticos, infografías y pósteres, que serán ubicados en lugares estratégicos como la puerta de la clase o los pasillos.* Estos materiales buscan sensibilizar a la comunidad educativa sobre la importancia de la inclusión de género en este sector tecnológico. Se ha comenzado por generar un banco de imágenes, utilizando inteligencia artificial generativa (IAG), que sirven para dar visibilidad al proyecto y que aparecen en el material divulgativo a generar. La Fig. 1 recoge uno de los ejemplos generados en el que se aprecia la inclusión social a tener en cuenta en la realización de prototipos electrónicos.
- *Organización de charlas impartidas por expertos en la fabricación y desarrollo de placas de circuito impreso (PCB), quienes compartirán diferentes perspectivas sobre el tema.* Se hace especial énfasis en invitar a mujeres que sean referentes en el campo, con el objetivo de ofrecer modelos a seguir y fomentar la igualdad de género en este ámbito. A lo largo del curso académico se organizan webinars y talleres en los que participarán expertos en el prototipado electrónico tanto a nivel de diseño y fabricación de circuitos impresos, como relacionados con el desarrollo de aplicaciones biomédicas. La Fig. 2 muestra el cartel de una de las charlas organizadas. En el diseño y prototipado electrónicos se deben tener en consideración aspectos como la ergonomía o utilizar dispositivos que sean cómodos y seguros para diferentes grupos de género; así como orientar el diseño hacia la inclusividad, teniendo en cuenta las necesidades y características de diferentes grupos de género. En este sentido, una de las actividades ha consistido en mostrar al alumnado ejemplos de prototipos electrónicos destinados al cuidado de la salud de la mujer.
- *Analizar de forma crítica junto a los alumnos el impacto en los Objetivos para el Desarrollo Sostenible [20] con especial atención al Objetivo 5 sobre igualdad de género, que tendrá su actividad profesional como ingenieros/as.* La discusión en clase de los temas con perspectiva de género aporta al alumnado elementos para la deconstrucción de las diversas formas de discriminación existentes y les transmite valores de equidad y respeto a las diferencias. A través de sesiones de trabajo en grupo realizadas a lo largo del curso, el alumnado tomará conciencia sobre el análisis de las repercusiones en la sociedad que tendrán tanto su futura actividad profesional como las aplicaciones electrónicas diseñadas en sus Trabajos Fin de Grado (TFG).
- *Difusión del proyecto mediante la publicación de noticias en medios de prensa y en plataformas digitales como la página web de la universidad o del grupo de investigación*. El objetivo es destacar los esfuerzos y logros obtenidos en el proyecto, promoviendo así la concienciación y la importancia de la inclusión de la perspectiva de género en la tecnología y la innovación. Todas las actividades realizadas en el proyecto quedan recogidas en forma de material divulgativo a disposición del público en las redes sociales de la Universidad de Córdoba y de la EPSC en particular, a través de su canal de YouTube (https://www.youtube.com/@epsc) que complementarán acciones de promoción de la mujer ingeniera. Una de las contribuciones en esta tarea es la difusión en forma de píldoras educativas con información sobre perspectiva de género en el contexto del prototipado electrónico. En concreto, se elaboran entrevistas a estudiantes y egresados que presentan su percepción de la perspectiva de género en su formación académica y cómo la perciben en sus respectivas empresas donde contribuyen a la realización de prototipos electrónicos. Se pretende así dar visibilidad al trabajo que realizan hombres y mujeres en esta salida profesional. Asimismo, incluyen reflexiones sobre las repercusiones en la sociedad de sus trabajos.

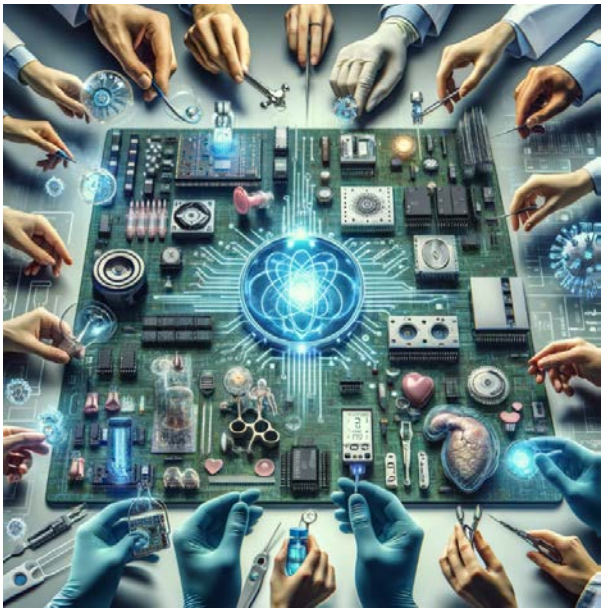


Fig. 1. Ejemplo imagen creada para hacer la difusión del proyecto.

Fig. 2. Cartel anunciando una conferencia del proyecto.

B. Realización de un mini-proyecto

Para promover la inclusión de diferentes perspectivas y enfoques fruto de la colaboración y del trabajo en equipo, lo que puede llevar a una mayor creatividad y pensamiento innovador, así como una mayor eficacia y eficiencia en la resolución del problema, se plantea realizar un mini-proyecto basado en un prototipo electrónico para mejorar la salud de la mujer a través de tres actividades.

- *Entrevistas con clínicos especializados en la salud de la mujer para conocer necesidades de tecnología en dicho ámbito* (factores dato y objetivo). De las charlas de expertos en el prototipado incluidas en el apartado A junto con estas entrevistas, extraerán un reto a resolver relacionado con la salud de la mujer.
- *Toma de contacto con el proceso de diseño y fabricación de placas de circuito impreso* en sí mismo. El alumnado ha realizado una visita a una fábrica de placas de circuito impreso para conocer las técnicas de fabricación, materiales, disposición de componentes, soldadura, y, en general, las claves para una correcta realización del mini-proyecto. En la Fig. 3 se muestra una imagen de los alumnos que han visitado las instalaciones en Madrid.

Fig. 3. Visita instalaciones NCAB Group.

- *Ejecución del mini-proyecto*. Los alumnos de las asignaturas implicadas en este proyecto de innovación docente trabajarán por grupos en un mini-proyecto basado en un prototipo electrónico para mejorar la salud de la mujer.

En este sentido los mini-proyectos se han enfocado según las asignaturas implicadas. Por ejemplo, en la asignatura de Instrumentación Electrónica los alumnos deben adquirir los conocimientos necesarios para el diseño de sistemas de medida y para afrontar la programación de los sistemas de adquisición de datos. Se analizan conocimientos sobre el diseño de sistemas de medida, técnicas de medida de magnitudes físicas, acondicionamiento de señales y técnicas de conversión analógico-digital, entre otras.

Para que el alumnado pueda tomar conciencia de este contenido, en la asignatura de Instrumentación Electrónica se ha incluido como mini-proyecto el análisis de un dispositivo relacionado con la salud de la mujer desde el punto de vista de la instrumentación electrónica que contiene su diseño. El alumnado debe realizar una memoria explicando en qué consiste el sistema seleccionado considerando los objetivos del sistema (fin perseguido para asistir a la mujer), desarrollo del sistema, diagrama de bloques que lo componen asociándolos con los analizados en el temario (sensor, circuito de acondicionamiento, amplificador...), conclusiones o reflexiones, así como los detalles relevantes o cualquier otra característica que consideren de interés. Un ejemplo que se le muestra al alumnado es un sistema para el control y monitoreo de alteraciones hipertensivas en el embarazo con el uso de sensores biomédicos no invasivos.

Por otro lado, la asignatura de Tecnología Electrónica Aplicada está dedicada al estudio de las técnicas de fabricación de dispositivos electrónicos. Entre otros aspectos, el alumnado estudia diferentes tecnologías de circuitos, sus características, ventajas e inconvenientes. Se analiza todo el proceso de desarrollo y fabricación de los distintos tipos de circuitos y se describen los materiales que se utilizan para la fabricación de cada uno de los elementos de estos circuitos, y sus características e influencia en el funcionamiento global del mismo. También el alumnado debe conocer las aplicaciones que tienen en el mercado cada tipo de tecnología. De las muchas aplicaciones que podemos encontrar hoy en día, se les describen los productos denominados *wearable* o dispositivos electrónicos que sirven para ser llevados puestos.

Muchos de estos dispositivos deben estar fabricados con materiales flexibles, elásticos y biodegradables, que muestran importantes diferencias con los tradicionales circuitos impresos fabricados en placas o soportes rígidos. Para que el alumnado pueda ahondar en este tipo de tecnologías más innovadoras, se les propone en la asignatura la realización de un trabajo en grupo, donde deben centrarse en algún tema relacionado con estos aspectos de la asignatura. El alumnado debe buscar información, desarrollar un trabajo y realizar una exposición en clase con una duración de 15 minutos, y pasar a un posterior turno de preguntas o debate con el profesorado o con sus compañeros. En el marco de este proyecto de innovación docente se les ha hecho hincapié en elegir un tema relacionado con estas aplicaciones biomédicas de la electrónica, y ahondar en la fabricación de este tipo de circuitos, así como en las distintas aplicaciones. Para motivar al alumnado se le indica en clase una serie de aplicaciones novedosas en este campo como pueden ser medidores de glucosa realizados con circuitos flexibles adheridos a la piel; dispositivos diseñados para registrar el flujo sanguíneo de forma continua, inalámbrica, y no invasiva; la denominada piel electrónica, que recrea la sensibilidad de la piel humana para su uso en prótesis y robótica; o incluso vendajes inteligentes que aportan información acerca de la cicatrización de heridas crónicas.

IV. Resultados

Con la realización de este proyecto se lograrían alcanzar los siguientes conocimientos:

- *Conocimientos en bioinstrumentación*: el desarrollo de PCB que midan y procesen señales biológicas, como las relacionadas con la salud de hombres y mujeres, aportan al alumnado conocimientos en bioinstrumentación.
- *Diseño electrónico*: con la realización del esquema eléctrico del circuito que se quiere implementar en la PCB y la definición de los componentes que se utilizarán, se adquieren conocimientos en diseño electrónico. Una vez que se tiene el diseño electrónico es necesario diseñar la PCB en sí misma. Esto implica conocer las técnicas de diseño, los estándares de fabricación de PCB y el software especializado en el diseño de PCB.
- *Conocimientos en electrónica*: se adquieren conocimientos básicos en electrónica, facilitando la comprensión del funcionamiento del circuito que se está diseñando y permitiendo una adecuada selección de los componentes.
- *Conocimientos en fabricación*: el conocimiento sobre técnicas de fabricación de PCB asegura que el diseño se pueda llevar a cabo, y que la placa resultante tenga un buen desempeño.
- *Conocimientos en soldadura*: una vez que la PCB está fabricada es necesario soldar los componentes. Los conocimientos en soldadura adquiridos aseguran la obtención de una soldadura adecuada evitando así problemas de conexión en la placa.
- *Conocimientos en pruebas*: finalmente, para poder verificar que la PCB funciona correctamente y solucionar cualquier problema que pueda surgir se realizarán pruebas de conexionado, alimentación y puesta a masa, lo que favorecerá el uso de equipos de instrumentación y medida como osciloscopios digitales.

V. Conclusiones

Diversos son los resultados esperados con la implementación de este Proyecto de Innovación, según se trate de alumnado, profesorado o conocimientos.

Respecto al alumnado se pretende potenciar la igualdad de oportunidades, adaptar los materiales para que atiendan a la perspectiva de género, fomentar vocaciones y servir ejemplos referentes que rompan con los roles en el campo de la ingeniería electrónica.

Con la enseñanza basada en proyectos se pretende inducir sobre el alumnado el acercamiento a la realidad profesional, motivación del estudiante y mejora de su autonomía y del desarrollo de competencias, además de una mayor aceptación tecnológica y un reconocimiento del aprendizaje informal.

Se pretende así mismo dar visibilidad a la salida laboral del diseño electrónico dentro de la ingeniería electrónica, así como que el alumno/a sea capaz de analizar, diseñar, testar y poner en fabricación un prototipo electrónico.

Agradecimientos

Esta publicación ha sido financiada por el proyecto de innovación docente “Diseño de prototipos electrónicos inclusivos para soluciones biomédicas” (2023-3-5002), concedido por la Universidad de Córdoba en su Plan de innovación 2023/24. Además, esta publicación es parte del proyecto Exploración de la Aplicación Práctica de la Inteligencia Artificial Generativa en Entornos Educativos de Internet de las Cosas y la Industria Conectada (T24-002-I), financiada por la convocatoria del Programa Propio de Inversiones Estratégicas para el Desarrollo de Capacidades de Investigación y Transferencia (Programa Incentiva) del Instituto de Investigación, Transferencia e Innovación (ITEI) del Vicerrectorado de Transferencia de la Universidad Internacional de La Rioja.

Referencias

[1] E. Aydin, M. Rahman, and E. Ozeren, “Does Industry 5.0 Reproduce Gender (In)equalities at Organisations? Understanding the Interaction of Human Resources and Software Development Teams in Supplying Human Capitals,” *Information Systems Frontiers*, 2023, doi: 10.1007/s10796-023-10450-1.

[2] L. Espina-Romero, J. Guerrero-Alcedo, N. Goñi Avila, J. G. Noroño Sánchez, H. Gutiérrez Hurtado, and A. Quiñones Li, “Industry 5.0: Tracking Scientific Activity on the Most Influential Industries, Associated Topics, and Future Research Agenda,” *Sustainability*, vol. 15, no. 6. 2023, doi: 10.3390/su15065554.

[3] J. Alves, T. M. Lima, and P. D. Gaspar, “Is Industry 5.0 a Human-Centred Approach? A Systematic Review,” *Processes*, vol. 11, no. 1. 2023, doi: 10.3390/pr11010193.

[4] UNESCO, *Descifrar el código: la educación de las niñas y las mujeres en ciencias, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM)*. 2019.

[5] M. Martínez, F. Segura, J. M. Andújar, and Y. Ceada, “The Gender Gap in STEM Careers: An Inter-Regional and Transgenerational Experimental Study to Identify the Low Presence of Women,” *Education Sciences*, vol. 13, no. 7. 2023, doi: 10.3390/educsci13070649.

[6] G. Scandurra, “Advanced Research in Electronics: The Perspective of Women,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 13. 2023, doi: 10.3390/app13137641.

[7] G. Potvin *et al.*, “Gendered Interests in Electrical, Computer, and Biomedical Engineering: Intersections With Career Outcome Expectations,” *IEEE Transactions on Education*, vol. 61, no. 4, pp. 298–304, 2018, doi: 10.1109/TE.2018.2859825.

[8] M. Dabić, T. O. Posinković, J. F. Maley, B. Vlačić, G. Marzi, and S. Kraus, “Exploring the Multifaceted Challenges of Women in Engineering: A Comprehensive Literature Review,” *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 71, pp. 3325–3339, 2024, doi: 10.1109/TEM.2023.3342980.

[9] E. López-Iñesta, C. Botella, S. Rueda, A. Forte, and P. Marzal, “Towards Breaking the Gender Gap in Science, Technology, Engineering and Mathematics,” *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologias del Aprendizaje*, vol. 15, no. 3, pp. 233–241, 2020, doi: 10.1109/RITA.2020.3008114.

[10] J. Gómez, A. Tayebi, and C. Delgado, “Factors That Influence Career Choice in Engineering Students in Spain: A Gender Perspective,” *IEEE Transactions on Education*, vol. 65, no. 1, pp. 81–92, 2022, doi: 10.1109/TE.2021.3093655.

[11] A. García-Holgado, C. S. González-González, and A. Peixoto, “A Comparative Study on the Support in Engineering Courses: A Case Study in Brazil and Spain,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 125179–125190, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3007711.

[12] C. Mateos Sillero, Sara; Gómez Hernández, *Libro Blanco de las mujeres en el ámbito tecnológico*. 2019.

[13] M. de E. y F. Profesional, “Estadística de Estudiantes.” https://www.universidades.gob.es/estadistica-de-estudiantes/.

[14] D. Matabuena, F. J. Bellido-Outeirino, A. Moreno-Munoz, A. Gil-De-Castro, and J. M. Flores-Arias, “Educational platform for communications using the MQTT protocol,” 2018, doi: 10.1109/TAEE.2018.8475972.

[15] I. M. Moreno-Garcia, A. Gil-De-Castro, A. Moreno-Munoz, V. Pallares-Lopez, R. Medina-Gracia, and D. Matabuena, “Educational platform for reliability assessment of power quality,” in *IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON*, 2018, vol. 2018-April, doi: 10.1109/EDUCON.2018.8363428.

[16] A. Gil-De-Castro, I. M. Moreno-Garcia, V. Pallares-Lopez, D. Matabuena, R. Medina-Gracia, and A. Moreno-Munoz, “Implementation of an Educational Platform on Power Quality,” 2018, doi: 10.1109/TAEE.2018.8476087.

[17] A. Gil de Castro, E. Cañete Carmona, M. S. Climent Bellido, E. J. Palacios García, A. Moreno Muñoz, and A. Yépez, “Recursos multimedia bilingües para mejorar el aprendizaje en asignaturas de ingeniería,” *Revista de Innovación y Buenas Prácticas Docentes*, 2018, doi: 10.21071/ripadoc.v7i0.11674.

[18] “Video: Yo, ingeniera.” https://www.youtube.com/watch?v=E9WAgSxhFoQ (accessed Apr. 04, 2024).

[19] “Taiwan Semiconductor Manufacturing Company. Sustainability Reports and Documents.” https://esg.tsmc.com/en/resources/documents.html (accessed Apr. 04, 2024).

[20] N. Unidas, “Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible,” 2023.

Estudio del impacto de la IA ChatGPT en las prácticas de Instrumentación Electrónica

Jesús Ponce de León Vázquez
Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia (EUPLA),
centro adscrito a la Universidad de Zaragoza
Affective Lab
La Almunia de Doña Godina, Zaragoza, España
jponce@unizar.es

David Asiain Ansorena
Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia (EUPLA),
centro adscrito a la Universidad de Zaragoza
Affective Lab
La Almunia de Doña Godina, Zaragoza, España
dasiain@unizar.es

***Abstract*— En este trabajo se valora el impacto que la IA ChatGPT (como ejemplo de impacto general de la IA) puede tener en el desarrollo de las actividades de laboratorio de las asignaturas de Electrónica, en concreto con la de Instrumentación Electrónica. El caso expuesto parece paradigmático y las conclusiones son probablemente extensibles a cualesquiera asignaturas donde el alumnado deba manipular material con sus propias manos.**

Keywords*— *Instrumentación Electrónica, práctica, ChatGPT, termopar, NTC, Arduino.

I. Introducción

La irrupción de la Inteligencia Artificial (IA) se cierne sobre el futuro inmediato en muchos aspectos de nuestras vidas. La pregunta que, como seres humanos, nos planteamos es: ¿la IA resulta una ayuda o un problema? Más allá de las implicaciones filosóficas de esta y otras cuestiones relacionadas con la IA, se encuentra una preocupación más inmediata: como docentes, ¿hasta qué punto debemos preocuparnos por la irrupción de la IA y su impacto sobre la educación de nuestros estudiantes? La respuesta parece evidente: como con el resto de tecnologías, los docentes debemos aprender a convivir con la IA [1], que debe resultar un apoyo al desarrollo intelectual del alumnado en lugar de un factor de dependencia o incluso de *desaprendizaje*. El hecho de que el estudiantado emplea inteligencias artificiales como ChatGPT [2] con asiduidad es algo evidente [1-3]. La motivación de este trabajo es demostrar (tanto a nosotros mismos como al propio alumnado) las limitaciones de la IA (al menos en su actual nivel de desarrollo).

Tanto en el grado de Ingeniería de Datos en Procesos Industriales (actualmente en su tercer año de implantación en le Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia, EUPLA), se imparte la asignatura de Instrumentación Electrónica. En ambos casos se trata de una asignatura muy orientada al contenido práctico, y se ha empleado una de estas prácticas como plataforma para evaluar el impacto de ChatGPT y su utilidad (o interferencia) a diferentes niveles del desarrollo de la actividad de laboratorio. En el caso de Datos, al tratarse de una asignatura de formación *dual*, la mitad del alumnado seleccionada para esta opción no llegó a realizar la práctica que se presenta (su evaluación de la mitad de la asignatura es responsabilidad empresas locales), lo cual limita a tan sólo 11 el número de participantes en el estudio.

El planteamiento del mismo es muy simple. Al alumnado se le explica cuáles son los objetivos finales de la práctica y con qué dispositivos se cuenta para el desarrollo de la actividad, pero no se profundiza la fase del desarrollo. De este modo se les pide que recurran a las explicaciones de ChatGPT sobre la forma en la que se van obteniendo los resultados parciales de la práctica. En este punto cabe destacar que las respuestas de la IA están muy bien orientadas, siempre que se le hagan las preguntas correctas [1].

Con la orientación de ChatGPT y la colaboración puntual del profesorado, el alumnado completa los requisitos necesarios para la comprensión del problema y su resolución. En un último punto, se debe poner en práctica todo lo aprendido, montando los circuitos de medida y acondicionamiento necesarios y verificando el correcto funcionamiento del sistema. Es en esta última parte donde el apoyo de ChatGPT resulta limitado y el alumnado continúa dependiendo de sus propias habilidades y de la ayuda del profesorado.

El presente trabajo está ordenado como sigue: en la Sección II se describe la práctica a realizar, tanto a nivel de hardware como de software, insistiendo en las conexiones con ChatGPT. En la Sección III se analiza la encuesta individual mediante la cual se ha medido el impacto de la IA en el desarrollo de los diferentes aspectos de la práctica. En la Sección IV se muestran los resultados de la experiencia. Por último, en la Sección V se presentarán las correspondientes conclusiones.

II. Descripción del sistema

Se trata de realizar la Compensación de la Unión Fría (CUF) de un termopar, mediante el correspondiente software programado en la plataforma Arduino.

A. Principio de funcionamiento

Un termopar no es más que la unión de dos metales diferentes en un contacto eléctrico. Sin entrar en excesivos detalles [4], debido principalmente al efecto Seebeck, la tensión en bornes de un termopar (Figura 1) depende en primera instancia de las temperaturas las llamadas unión caliente y unión fría:

$$V_T = K(T_c - T_f) \qquad (1),$$

donde K es la sensibilidad del termopar, la cual depende a su vez del tipo de termopar que se trate (es decir, de los metales M1 y M2, los cuales pueden a su vez ser aleaciones de diferentes metales).

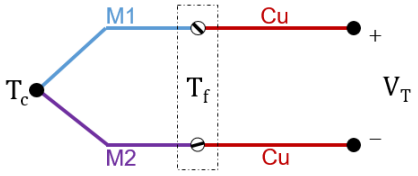


Figura 1. Termopar. Uniones caliente (Tc) y fría (Tf).

La CUF consiste en hacer desaparecer la dependencia de T_f en la Ecuación (1). En el caso que nos ocupa, esta compensación se hará mediante un simple programa de Arduino. Para ello, además del propio termopar, se requiere de un segundo sistema de medida de la temperatura que servirá para tomar el dato de T_f y, por simple adición, eliminar la dependencia citada. No obstante, las sensibilidades de los termopares son tan bajas que se requiere de una etapa de amplificación para poder trabajar con ellas en la medida de la temperatura. El hardware necesario para la CUF aparece en la Figura 2.

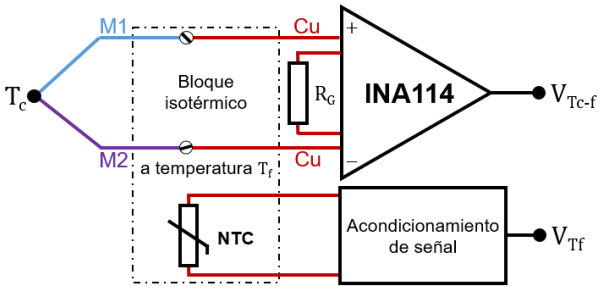


Figura 2. Sistema electrónico para la CUF. V_{Tc-f} y V_{Tf} se miden desde sendas entradas analógicas del Arduino.

Como se puede ver, la idea es obtener la temperatura de la unión fría (T_f) mediante un sensor en contacto isotérmico con esta parte del termopar. Esto es sencillo de conseguir, en la medida en que ambos sensores (unión fría y el sensor de temperatura adicional) se encontrarán a la temperatura ambiente del laboratorio.

El sensor de temperatura necesario para medir T_f será una NTC, un termistor de coeficiente térmico negativo que se suministra al alumnado. De la misma forma, el amplificador necesario para hacer practicable la medida de temperatura del termopar será un INA114 (que a su vez requiere de alimentación simétrica y por lo tanto de una fuente de alimentación adicional).

B. Información proporcionada al alumnado

Normalmente, estos aspectos y otros más detallados, que se verán más adelante, serían explicados en clase. Pero en este caso apenas se proporcionó la información sobre qué sensores se iban a utilizar y muy poco acerca de cómo utilizarlos, para que el propio alumnado obtuviese la información necesaria mediante el empleo de ChatGPT.

Como se ha adelantado (Figura 2), el termopar suministrado (que puede ser tipo J o K) se amplifica mediante un INA114. La tensión de este INA114 y la de salida del circuito de medida de la NTC (que, como se verá en la siguiente sección, debe linealizarse previamente) serán introducidas en el Arduino por sendas entradas analógicas. Al alumnado se le pide que, además de las correctas conexiones eléctricas, programe el Arduino para que extraiga la temperatura T_f mediante la lectura de la tensión (variable y dependiente de la temperatura) en la NTC y, para finalizar, que realice la oportuna CUF, presente en la tensión leída del INA114.

Adicionalmente, al alumnado se le pide que el hardware relacionado con la NTC (que resulta ser un sencillo divisor de tensión), se alimente con las salidas de +5V y GND del propio Arduino, que el INA114 se alimente a ±12V mediante la fuente de alimentación del laboratorio y que calcule la ganancia del amplificador, que debe quedar por debajo de un margen de seguridad que impedirá que la tensión, que ha de llegar al sistema Arduino por una de sus entradas analógicas, supere los 5V que el sistema soporta como máximo.

Los objetivos y el material necesario para la realización de la práctica se exponen a continuación.

C. Objetivos y material

§1. Objetivos de la práctica

En primer lugar, el alumnado debe linealizar el sensor NTC y calcular sus parámetros característicos A y B, teniendo en cuenta que la resistencia en una NTC puede escribirse como:

$$R_{T_x} = Ae^{B/T_x} \qquad (2),$$

donde, habitualmente, T_x se da en K.

Una vez obtenidos estos parámetros (y, por lo tanto, caracterizada la NTC), se debe programar en Arduino un código capaz de extraer el valor de la temperatura T_x a través de la lectura de una tensión analógica. Esta temperatura se filtra (paso-bajo) mediante un filtro exponencial (software).

Como se ha dicho, a continuación se debe amplificar la salida del termopar, dada por la Ecuación (1), mediante la oportuna resistencia de ganancia R_G, de modo que la tensión amplificada no supere los 5V bajo ninguna circunstancia.

Para finalizar, se programará un código en Arduino que lleve a cabo la CUF. El alumnado debe extraer la temperatura de la unión caliente T_c, filtrarla nuevamente y comprobar su recisión mediante un termómetro que se tomará como *ground truth*.

En efecto, es fácil ver que:

$$T_c = \frac{V_{Tc-f}}{G\,K} + T_f \qquad (3),$$

donde V_{Tc-f} (ver Figura 2) es la tensión a la salida del INA114, G es la ganancia del amplificador de instrumentación (conocida por el alumnado), K el valor de la sensibilidad del termopar (un valor determinado entre dos posibles, termopares tipo J y K) y T_f es la temperatura ambiental, obtenida a través de la NTC. De esta forma, el alumnado adquirirá conocimientos acerca de la linealización y caracterización de termistores, amplificación de tensiones mediante un amplificador de instrumentación de precisión, empleo general de termopares y la CUF de los mismos.

§2. Material necesario

El alumnado dispone de la placa Arduino y su correspondiente entorno de programación, el termopar, la NTC y el resto de fungible y material de laboratorio que pueda necesitar. El material básico para la realización de la práctica queda reflejado en la Tabla I.

TABLE I. MATERIAL NECESARIO (HARDWARE Y SOFTWARE).

MATERIAL NECESARIO
Resistencia NTC
Resistencia (10k)
Resistencia R_G para el INA114
Termopar (Tipo J o K)
INA114
Fuente de alimentación (bipolar)
Arduino
Entorno de programación Arduino (*Arduino IDE*)

D. Limitaciones de ChatGPT

ChatGPT es capaz de proporcionar la información básica sobre el manejo de los sistemas de medida y sensores, así como un código bastante preciso, tanto en la obtención de la temperatura T_f como para llevar a cabo la CUF. Sin embargo, el estudiante debe ensamblar físicamente el dispositivo y realizar una medida de temperatura de precisión, mostrando los resultados numéricos y gráficos al profesorado para obtener el visto bueno de este. Es aquí donde la utilidad de la IA resulta cuestionable, puesto que se requieren conocimientos y destrezas para poder realizar el montaje. Por ejemplo, uno de los errores más extendidos consiste en que la masa del Arduino y la de la fuente de alimentación del laboratorio (al ser fuentes independientes) deben estar unidas, para compartir el nivel de cero y que tanto los 5V de la NTC como los ±12V del INA114 sean compatibles y coherentes entre sí.

E. Estudio del impacto de ChatGPT

Como se ha dicho, nuestro objetivo con esta experiencia es valorar el impacto que pueda tener ChatGPT (o cualquier otra IA similar) en el desempeño de las actividades de laboratorio. Para ello, el alumnado tuvo que completar una encuesta al finalizar la práctica, cuyo objetivo era valorar en qué aspectos de la misma ChatGPT resulta más útil.

La encuesta y sus resultados se detallan en las siguientes Secciones.

III. Encuesta

La encuesta lanzada al alumnado a través de la plataforma Moodle, consta de 13 preguntas. Concretando, la primera pregunta sirve para valorar la experiencia previa del estudiante con ChatGPT. Las preguntas 2 a 7 ayudan a valorar el impacto de la IA en la experiencia de laboratorio. Las preguntas 8 a 10 permiten valorar la importancia del uso de ChatGPT en la elaboración del informe de prácticas. Por último, las preguntas 11 a 13 (esta última de carácter abierto) dan una idea de la opinión que el propio alumnado tiene acerca de la importancia que ha tenido la IA en el desarrollo global de la actividad.

§1. Encuesta: preguntas

1 Antes de la realización de esta práctica, eras usuari@ de ChatGPT… Opciones: **(a)** Ocasional, **(b)** Regular, **(c)** Frecuente.

2 Valora del 1 (nulo) al 5 (muy elevado) el uso de los siguientes elementos para la búsqueda general de información de la práctica.

- **(a)** Chat GPT.
- **(b)** Páginas web, foros, etc.
- **(c)** Profesor.
- **(d)** Material docente (libros, artículos, etc.).
- **(e)** Otros.

(Mismas posibilidades en las preguntas 2 a 10).

3 Valora del 1 (nulo) al 5 (muy elevado) el uso de los siguientes elementos para la linealización de la NTC.

4 Valora del 1 (nulo) al 5 (muy elevado) el uso de los siguientes elementos para el empleo del termopar.

5 Valora del 1 (nulo) al 5 (muy elevado) el uso de los siguientes elementos para la obtención de los códigos de Arduino (NTC y Compensación de la Unión Fría, CUF).

6 Valora del 1 (nulo) al 5 (muy elevado) el uso de los siguientes elementos para el empleo del INA114.

7 Valora del 1 (nulo) al 5 (muy elevado) el uso de los siguientes elementos para el montaje general de laboratorio.

8 Valora del 1 (nulo) al 5 (muy elevado) el uso de los siguientes elementos para la escritura del marco teórico del informe.

9 Valora del 1 (nulo) al 5 (muy elevado) el uso de los siguientes elementos para la escritura del método operativo del informe.

10 Valora del 1 (nulo) al 5 (muy elevado) el uso de los siguientes elementos para la representación de los resultados de laboratorio en el informe.

11 Valora la utilidad de ChatGPT como herramienta de búsqueda de información. Opciones: **(a)** Útil pero no indispensable, **(b)** Muy útil.

12 Valora la utilidad de ChatGPT como herramienta de ayuda/apoyo en el laboratorio (a nivel de montaje). Opciones: **(a)** Poco o nada útil, **(b)** Útil pero no indispensable, **(c)** Muy útil.

13 Da tu opinión general sobre el empleo de ChatGPT en esta práctica. No olvides tratar aspectos esenciales como si crees que podrías haberlo conseguido con la ayuda exclusiva de ChatGPT o si las explicaciones del profesor de prácticas han resultado imprescindibles.

IV. Resultados

Como se ha dicho, la asignatura se engloba en un contexto de formación dual (en colaboración con empresas locales), motivo por el cual el número de alumnos que realizaron la práctica y la subsiguiente encuesta (obligatoria) fue de tan solo 11. A continuación se muestran los resultados obtenidos en la encuesta, así como las principales conclusiones que pueden extraerse de los mismos.

A. Resultados numéricos

En las siguientes tablas se reproducen los resultados recogidos y analizados en Moodle. Los resultados numéricos mostrados están en %.

TABLE II. Resultados numéricos de la encuesta al alumnado.

Pregunta	Opciones		
	(a)	(b)	(c)
1	36	18	45
12	36	45	18

Pregunta	Opciones	
	(a)	(b)
11	45	55

Pregunta 2	Opciones				
	1	2	3	4	5
(a)	0	0	36	55	9
(b)	0	36	45	18	0
(c)	0	18	27	18	36
(d)	36	18	18	27	0
(e)	91	9	0	0	0

Pregunta 3	Opciones				
	1	2	3	4	5
(a)	9	18	27	27	18
(b)	18	36	18	27	0
(c)	18	0	27	18	36
(d)	64	0	9	27	0
(e)	100	0	0	0	0

Pregunta 4	Opciones				
	1	2	3	4	5
(a)	0	18	36	9	36
(b)	9	45	18	18	9
(c)	9	9	9	27	45
(d)	64	9	0	18	9
(e)	100	0	0	0	0

Pregunta 5	Opciones				
	1	2	3	4	5
(a)	0	18	18	45	18
(b)	36	9	27	18	9
(c)	45	9	27	18	0
(d)	73	27	0	0	0
(e)	100	0	0	0	0

Pregunta 6	Opciones				
	1	2	3	4	5
(a)	9	18	36	18	18
(b)	9	18	45	18	9
(c)	9	9	27	18	36
(d)	45	9	0	27	18
(e)	91	9	0	0	0

Pregunta 7	Opciones				
	1	2	3	4	5
(a)	27	18	18	27	9
(b)	27	18	45	9	0
(c)	0	0	9	45	45
(d)	55	0	18	9	18
(e)	100	0	0	0	0

Pregunta 8	Opciones				
	1	2	3	4	5
(a)	0	18	9	36	36
(b)	18	9	18	18	36
(c)	36	18	27	18	0
(d)	36	0	9	55	0
(e)	100	0	0	0	0

Pregunta 9	Opciones				
	1	2	3	4	5
(a)	55	27	9	0	9
(b)	45	36	18	0	0
(c)	36	27	0	36	0
(d)	55	9	27	9	0
(e)	82	0	0	0	18

Pregunta 10	Opciones				
	1	2	3	4	5
(a)	55	9	18	18	0
(b)	55	9	18	18	0
(c)	45	9	18	9	18
(d)	64	9	0	18	9
(e)	82	0	0	0	18

B. Comentarios

Cabe destacar que la mayoría de los estudiantes ya tenían experiencia previa en el manejo de ChatGPT. En concreto, casi la mitad se confiesan usuarios frecuentes de la IA.

En cuanto a los resultados relativos a la experiencia de laboratorio, el alumnado le concede una importancia muy variable, pero generalmente alta, a la ayuda obtenida a través de ChatGPT. Si bien se trata de una importancia en general mayor que la concedida a páginas web, foros, libros, etc., cabe destacar que incluso en la búsqueda de información la importancia que se le concede a la labor del profesorado es, en general, mayor que la de la IA. Esto es debido a que se requiere una cierta orientación a la hora de preguntar a la IA sobre aspectos técnicos concretos. Ante preguntas menos concretas las respuestas tienden a ser más generalistas y menos útiles. En las preguntas 4 y 5, la importancia de ChatGPT a la hora de programar el Arduino crece de forma evidente, mientras que la intervención del profesor se vuelve mucho menos importante. Sin embargo, a la hora de realizar el montaje físico (preguntas 6 y 7), la importancia del profesorado se vuelve capital y el resto de herramientas pierden peso. En cuanto a la elaboración del informe de prácticas (8 a 10), de nuevo se incrementa el uso de ChatGPT, pero su importancia tampoco destaca muy por encima de otras fuentes. En este apartado, el profesor se limita a orientar, de modo que su papel resulta más discreto. Para terminar, la importancia que el estudiante concede a ChatGPT en las preguntas 11 y 12 resulta poco clarificadora, al estar bastante repartida. No obstante, en la pregunta 13 el alumnado vuelca sus opiniones de forma bastante más clara. He aquí algunas:

"Me parece bien que el uso de usar ChatGPT en una práctica este permitido, ya que brinda mucha información útil. No obstante, creo que para la elaboración de la práctica, no nos ha servido de mucha ayuda. Sobre todo, porque no sabemos exactamente lo que hay que buscar, y si lo que hemos buscado está bien o no".

"Creo que ChatGPT tiene su utilidad, es fácil de usar pero tiene un inconveniente, necesitas estar un poco en situación para saber que preguntar".

"En mi opinión ChatGPT es más un apoyo que otra cosa, únicamente con su ayuda exclusiva no habríamos conseguido terminar".

"ChatGPT ayudaba en aspectos más teóricos, pero si no fuese por ayuda del profesor, hubiese sido muy difícil hacer la práctica por nuestra cuenta".

"Es una herramienta útil aunque a la hora de hacerle preguntas nunca te responde lo mismo, lo que llega a generar algo de confusión".

"El uso de ChatGPT acelera muchos procesos como la parte teórica o más general pero en muchas partes puede ser un lastre".

"En mi opinión, con ChatGPT se puede hacer un gran uso para la búsqueda de información (…). Pero a la hora de realizar una práctica de laboratorio o realizar código en Arduino IDE es muy poco útil, ya que hay cosas que se deja por explicar, o que pasa por alto".

"El empleo de ChatGPT ha sido útil en la práctica pero no imprescindible. En mi opinión debería usarse como un método más de apoyo y ayuda a la hora de consultar información o cómo realizar un montaje, no ser la herramienta principal en la que basarse para hacer una práctica".

"ChatGPT puede llegar a ser muy útil pero para nada indispensable. Nada como la ayuda del profesor para resolverte las dudas, además de que en caso de tener algún problema con el circuito, la IA sería incapaz de solucionarlo".

V. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una experiencia práctica para evaluar el impacto de la IA en la vida académica. Como cabía esperar, la impresión que tiene el estudiante es que, al menos a la hora de elaborar la práctica, ChatGPT resulta en el mejor de los casos una herramienta de apoyo, pero no sirve para suplir la carencia de conocimientos, ni mucho menos la destreza del alumnado en el manejo del material. Esto significa que, si bien la IA puede afectar al desarrollo de las clases teóricas, en el caso de las prácticas el impacto es significativamente menor.

Esta tranquilizadora conclusión puede variar pronto, en función del desarrollo de la IA, en desarrollo acelerado en estos días.

Referencias

[1] Yu, Hao. *"The application and challenges of ChatGPT in educational transformation: New demands for teachers' roles."* Heliyon (2024).

[2] *ChatGPT*. Available: https://chat.openai.com/

[3] Buriticá, Omar Iván Trejos, et al. *"Inteligencia artificial en la educación superior o los nuevos roles del ingeniero docente: una mirada crítica."* Página legal.

[4] Perez, M.A. et al. *"Instrumentación electrónica"*. 2Ed..Thomson, 2011.

Explorando Chat-GPT para su uso en asignaturas de Instrumentación Electrónica y Biomédica

Rafael Navas-González
Dpto. de Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
ORCID: 0000-0002-4453-9660

Fernando Vidal-Verdú
Dpto. de Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
ORCID: 0000-0002-5459-8306

***Resumen*—En este trabajo se explora el uso de la Inteligencia Artificial Generativa (Chat-GPT) en las asignaturas Instrumentación Electrónica e Instrumentación Biomédica como herramienta para introducir y afianzar conceptos teóricos, y trabajar competencias transversales: lectura y escritura en el contexto de la ingeniería.**

Palabras clave*—*Chat-GPT, competencias transversales, lectura y escritura en ingeniería, docencia en electrónica, inteligencia artificial generativa.

I. INTRODUCCION

La adquisición del lenguaje y la escritura propios de una rama del saber no debe ser ajena a la enseñanza de sus contenidos, por lo que su práctica, de acuerdo con diversos autores, debería ser abordada en el contexto de las mismas asignaturas en la que se presentan [1][2][3]. A menudo, en las carreras técnicas los estudiantes solo producen textos para ser evaluados, (informes, memorias de prácticas, y/o respuestas a cuestiones en los exámenes escritos), de los cuales, muchas veces, no reciben una adecuada realimentación, más allá de una calificación global, que les instruya sobre la precisión y calidad de los términos y usos del lenguaje especializado que deben emplear. Por otra parte, en muchas de estas producciones es habitual encontrar la "reutilización" de materiales y textos, encontrados en internet u otras fuentes, sin apenas una reflexión o reelaboración, sin más fin que el de cumplir con la entrega encomendada por el profesor; por lo que, en muchas ocasiones, los trabajos que presentan resultan pastiches, poco eficaces para el propósito de consolidar aprendizaje de contenidos y competencias. En este sentido, la aparición de herramientas de Inteligencia Artificial (IA) Generativa como Chat-GPT [4], ha creado expectativas, al tiempo que ha disparado las alarmas y la preocupación en el ámbito educativo, como demuestra la cantidad de trabajos que desde su lanzamiento en 2022 se han publicado sobre experiencias, uso y posible impacto en el ámbito de la educación en muy diferentes campos [5][6][7][8][9]; y principalmente en lo que atañe a su impacto en los hábitos y procedimientos de evaluación [10]. La capacidad de estas herramientas de generar ensayos e informes que compiten y superan los generados por humanos, también está siendo objeto de evaluación [11][12]. Dado que, como ya ha ocurrido en otras ocasiones, este tipo de tecnologías disruptivas están aquí para quedarse, y estamos solo en el principio, este trabajo aborda una exploración personal de esta herramienta con el propósito de adquirir experiencia y perfilar actividades docentes en el contexto de algunas de las asignatura de grado que los autores imparten en la actualidad. La exploración se ha orientado principalmente hacia estimar su uso como medio para fomentar una lectura crítica, partiendo de los resultados proporcionados por Chat-GPT 3.5 (versión disponible gratuitamente en la actualidad), y en base al conocimiento que se espera que los estudiantes adquieran con el estudio de los documentos, material docente y la bibliografía utilizada en clase. Se explora también la posibilidad de utilizar sus respuestas como modelo para trabajar competencias de escritura en este contexto de la ingeniería.

En el siguiente apartado se presenta el contexto académico y docente de las asignaturas sobre las que se va a explorar el uso de Chat-GPT 3.5, poniéndolo en relación con el propósito y motivación de la experiencia A continuación se describe la metodología que se ha empleado, basada principalmente en la interacción con la herramienta. Se sigue con algunos ejemplos de las cuestiones que se han planteado, de las respuestas proporcionadas y de la revisión y evaluación que de esas respuestas hemos realizado. Este trabajo termina con una sección en la que se recogen las principales conclusiones, una reflexión personal sobre la experiencia y posibles actividades para llevar al aula.

II. CONTEXTO ACADÉMICO Y MOTIVACIÓN

Aunque con una orientación eminentemente práctica, como corresponde a asignaturas de ingeniería, habitualmente, en la mayoría de los temas que desarrollan la materia Instrumentación Electrónica se introducen también conceptos generales, como son el concepto de medida de magnitudes, la incertidumbre asociada dicha medida y su caracterización. Se abordan también cuestiones generales sobre los sistemas de medida y sus principales bloques constitutivos. Asimismo, se presentan los principales parámetros que se emplean en su caracterización, tanto estática como como dinámica, y que se utilizan en la práctica para establecer criterios y evaluar prototipos, o para seleccionar el sistema más adecuado para cumplir con los requerimientos de una medida, dentro de las posibles opciones de mercado y recursos disponibles.

Otros contenidos que habitualmente se incluyen en estas asignaturas son el estudio de sensores, como bloques fundamentales de un sistema de medida, incidiendo en sus principios de funcionamiento, su clasificación atendiendo a diferentes criterios, así como a un conjunto de características que permiten al ingeniero estimar su adecuación para formar parte de un determinado sistema de medida. Junto a los sensores, se presentan también los diferentes dispositivos, circuitos y técnicas de acondicionamiento de las señales que estos proporcionan. Estos contenidos aportan terminología propia, que es necesario comprender, identificar y saber cómo y cuándo utilizar.

En definitiva, junto a contenidos y metodología prácticos, en estas asignaturas se introduce un número importante de conceptos, definiciones y términos, que podríamos llamar "de teoría", que un ingeniero debería entender y manejar, para

comprender y responder a las cuestiones que se le puedan plantear, y que a su vez constituyen los elementos de lenguaje con los que debería expresar y comunicar sus ideas y exponer sus resultados, tanto de forma oral, como escrita.

Consideramos pues que nuestros estudiantes deberían adquirir y desarrollar una base sólida en estas cuestiones teóricas, y en ello insistimos cuando abordamos y presentamos estos contenidos en clase. Y por ello, en las pruebas escritas de evaluación, siempre aparecen preguntas que tratan de medir cómo los estudiantes asimilan estos conceptos, y testar así si han sido capaces de entenderlos y de expresarse haciendo un uso adecuado de ellos. Sin embargo, en general, los textos generados, tanto en pruebas de evaluación, memorias de prácticas, u otros documentos, muestran que los estudiantes prestan poca atención y cuidado a aprenderlos y emplearlos adecuadamente y con propiedad. Parece como si el estudiar teoría no tuviera importancia, no tuviera sentido o no "molase" para ellos. Esto se muestra claramente en los exámenes donde las respuestas, tanto a las cuestiones específicas de teoría, como a los problemas, ponen de manifiesto, no solo una falta de conocimiento y asimilación de conceptos fundamentales, sino un déficit en su capacidad de expresar, organizar y justificar ideas y argumentos que soporten un discurso coherente; que incluso hace sospechar, en ocasiones, sobre la correcta compresión de los enunciados de las preguntas planteadas. Aunque cabría pensar que para estudiantes universitarios las competencias de lectura y escritura deberían darse por adquiridas, también es cierto que las particularidades del uso del lenguaje en una determinada materia no es algo ajeno al aprendizaje de dicha materia, y que dichas capacidades deberían ser trabajadas como parte del aprendizaje de la asignatura en cuestión, como sugiere [1].

En este sentido, la capacidad de interacción con el interpelante y de proporcionar respuestas, que parece atribuirse a herramientas como Chat-GPT, hacen atractivo explorar su capacidad y habilidad como recurso para incentivar y retar a los estudiantes a utilizarlas para contrastar sus conocimientos, fomentando, al mismo tiempo, una visión crítica de dicha interacción, que los lleve a complementar su aprendizaje. A la par, esta interacción podría orientarse también a invitarles a practicar, para mejorar, su capacidad de escritura, explorando la posibilidad de utilizar las respuestas de Chat-GPT como modelo. Por su puesto, todo ello, sin descuidar, en este proceso, la propia interacción con el profesor y la colaboración y discusión entre compañeros.

III. Objetivo y Metodología

En este trabajo se plantea como objetivo estimar la capacidades de Chat-GPT 3.5 para proporcionar respuestas adecuadas, correctas y precisas, que puedan contribuir tanto al aprendizaje activo de los estudiantes de asignaturas de Instrumentación Electrónica, así como para fomentar la lectura crítica, y servir de modelo de respuesta escrita a las cuestiones que se les planteen en este ámbito.

Como método de trabajo se parte del diálogo con Chat-GPT 3.5, y del análisis de sus respuestas y capacidad de interacción. Inicialmente se plantean algunas cuestiones generales sobre la materia Instrumentación Electrónica y la formación de un ingeniero en esta materia, para proporcionar un contexto, y a continuación se pregunta sobre la ayuda que Chat-GPT puede proporcionar para conseguir los objetivos de este trabajo, con la intención de fijar un punto de vista de partida. Las respuestas se analizan y valoran atendiendo a su coherencia, veracidad y significado real en este contexto.

En una segunda fase se plantean a Chat-GPT 3.5 cuestiones sobre contenidos que desarrollan el temario y las competencias de nuestras asignaturas. En concreto se plantean cuestiones del mismo nivel que el de las que se formulan a los estudiantes, como guía de lectura y estudio, en las relaciones de cuestiones de clase, y/o aparecen en los enunciados de los exámenes. Aquí se distingue entre varios tipos de cuestiones: por una parte se plantean preguntas más directas relativas a definiciones y términos, usados en este ámbito; por otra, cuestiones más generalistas y de respuesta más abierta; y por último. preguntas en las que se pide desarrollar un tema cuya respuesta exige resumir y relacionar diferentes aspectos presentados a lo largo de uno o más temas o apartados del temario. A continuación se analizan y valoran las respuestas en el contexto de las asignaturas consideradas, atendiendo a diversos criterios, como son: adecuación, veracidad, corrección y rigor. En este análisis se incluye el posible diálogo y realimentación de Chat-GPT, incluida la reformulación de preguntas. También se considera el valor formal del texto generado, en la medida en que puede ser utilizado como modelo, referente o guía para las respuestas que se espera que los estudiantes proporcionen por sí mismos, sin la ayuda de la herramienta.

IV. Resultados

A. *Cuestiones generales sobre Instrumentación Electrónica y sobre la ayuda que puede proporcionar Chat-GPT.*

Estas son algunas de las cuestiones con las que se ha interpelado a Chat-GPT 3.5 en una primera fase:

- G1 ¿Qué debería estudiar un ingeniero en una asignatura básica de instrumentación electrónica?
- G2 ¿Es posible enseñar y evaluar el aprendizaje de todos estos contenidos solo a través de problemas y prácticas de laboratorio?
- G3 ¿Cómo de importante es para un ingeniero electrónico desarrollar sus capacidades de lectura y escritura?
- G4 ¿Cómo podrían trabajarse la habilidades de lectura y escritura específicas de una asignatura de instrumentación electrónica?

Chat-GPT 3.5 proporciona respuestas coherentes a estas cuestiones, que se corresponden con los contenidos y competencias que habitualmente se atribuyen y desarrollan en estas asignaturas en las distintas titulaciones en las que se inscriben. Resulta interesante destacar que en su respuesta a la pregunta G2 destaca la importancia de proporcionar *una base teórica sólida*, como soporte del resto de tareas de aprendizaje práctico, así como el importante papel que la *creatividad* debe jugar en la actividad del ingeniero.

Por otra parte, en su resumen, la respuesta a G3 destaca:

" *… desarrollar habilidades sólidas de lectura y escritura es de vital importancia para un ingeniero electrónico, ya que les permite comunicarse efectivamente, comprender documentación técnica, presentar propuestas y proyectos, colaborar en equipos y mantenerse actualizados con los avances en su campo.*"

Con estas ideas podríamos estar de acuerdo la mayoría de los docentes que impartimos disciplinas de ingeniería.

También merece la pena mencionar que en la respuesta a la pregunta G4, se proporciona un listado de tareas y actividades para trabajar las habilidades de lectura y escritura, entre las que destacan:

"*Fomentar la lectura activa de textos técnicos. Enseñar análisis crítico de la información. Practicar la síntesis y resumen de conceptos clave. Desarrollar habilidades de escritura técnica, como la redacción de informes y propuestas. Proporcionar práctica guiada con ejercicios específicos. Ofrecer retroalimentación constructiva para mejorar las habilidades.*"

Se trata de un conjunto de propuestas útiles, con las que, de nuevo, podemos estar de acuerdo una mayoría de docentes. Aunque la cuestión más importante para nosotros sería cómo incorporar de forma natural esas tareas y actividades a nuestra práctica docente.

Siguiendo con esta primera fase, se plantean cuestiones que aluden al papel que el propio Chat-GPT puede desempañar en estas tareas:

- G5 ¿Cómo podría contribuir Chat-GPT a fomentar la lectura crítica y mejorar la manera de escribir de un estudiante de ingeniería electrónica?

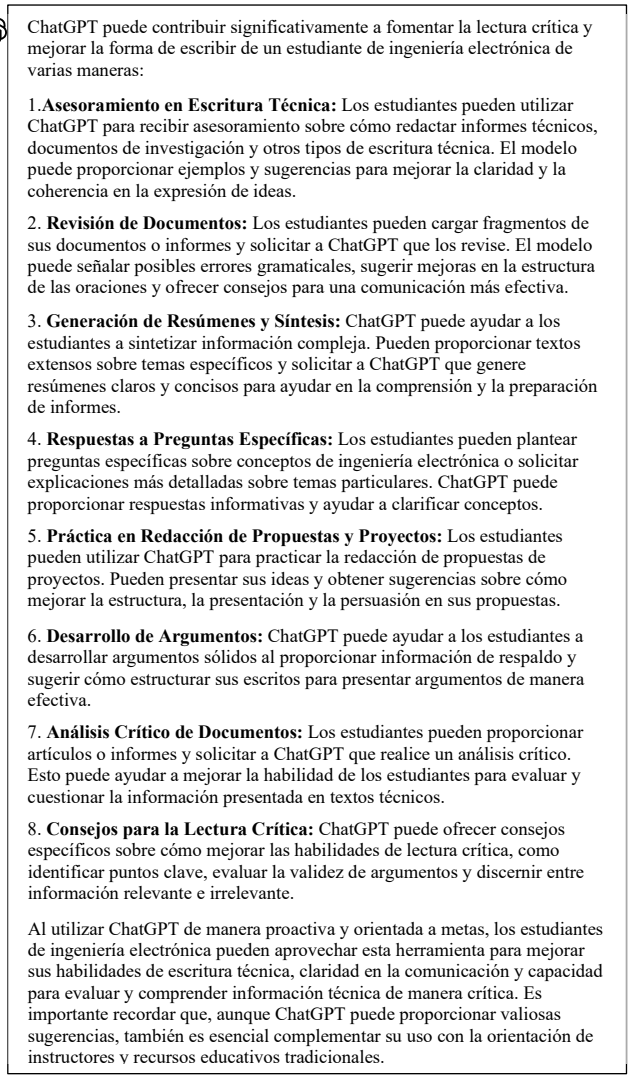
Como ilustración, la respuesta a G5 se reproduce en la Fig. 1. En ella se propone una lista de acciones que resultan consistentes, y que podrían considerarse válidas y útiles para otras mucha asignaturas.

En cualquier caso, el carácter genérico de la respuesta da pie a seguir interrogando a Chat-GPT 3.5, pidiendo que concrete algo más sobre cómo realizar esas tareas, dado que una cosa es decir que puede ayudar en tal o cual tarea, y otra mostrar ejemplos de cómo puede hacerlo. Para ello se ha continuado preguntando, por ejemplo:

- G6 ¿Cómo se puede utilizar Chat-GPT para resumir textos técnicos? Pon un ejemplo.
- G7 ¿Cómo se puede utilizar Chat-GPT para realizar un análisis de textos técnicos? Pon un ejemplo.
- G8 ¿Cómo podría contribuir Chat-GPT en el desarrollo de argumentos en este contexto? Pon un ejemplo.

En conjunto, en su respuesta a estas cuestiones, Chat-GPT 3.5 proporciona un procedimiento de interacción: propone que, antes de solicitarle que realice una de estas tareas, es importante indicarle su contexto, y el propósito y el alcance de la respuesta esperada. En cada caso, también nos recuerda que la calidad del resultado obtenido dependerá de la capacidad de Chat-GPT para comprender y contextualizar la información proporcionada, así como de la claridad y especificidad de las preguntas formuladas. Atendiendo al consejo de acotar el contexto y precisar las cuestiones que se plantean, hemos continuado con las siguientes:

- G9 Dame algunos consejos para realizar una lectura crítica de las respuestas que me proporciona Chat-GPT.
- G10 ¿Cómo podría orientar Chat-GPT en la redacción de respuestas a la cuestiones que me plantean en clase?
- G11 Ponme un ejemplo
- G12 Por favor haz una lectura crítica de tu anterior respuesta.



ChatGPT puede contribuir significativamente a fomentar la lectura crítica y mejorar la forma de escribir de un estudiante de ingeniería electrónica de varias maneras:

1.**Asesoramiento en Escritura Técnica:** Los estudiantes pueden utilizar ChatGPT para recibir asesoramiento sobre cómo redactar informes técnicos, documentos de investigación y otros tipos de escritura técnica. El modelo puede proporcionar ejemplos y sugerencias para mejorar la claridad y la coherencia en la expresión de ideas.

2. **Revisión de Documentos:** Los estudiantes pueden cargar fragmentos de sus documentos o informes y solicitar a ChatGPT que los revise. El modelo puede señalar posibles errores gramaticales, sugerir mejoras en la estructura de las oraciones y ofrecer consejos para una comunicación más efectiva.

3. **Generación de Resúmenes y Síntesis:** ChatGPT puede ayudar a los estudiantes a sintetizar información compleja. Pueden proporcionar textos extensos sobre temas específicos y solicitar a ChatGPT que genere resúmenes claros y concisos para ayudar en la comprensión y la preparación de informes.

4. **Respuestas a Preguntas Específicas:** Los estudiantes pueden plantear preguntas específicas sobre conceptos de ingeniería electrónica o solicitar explicaciones más detalladas sobre temas particulares. ChatGPT puede proporcionar respuestas informativas y ayudar a clarificar conceptos.

5. **Práctica en Redacción de Propuestas y Proyectos:** Los estudiantes pueden utilizar ChatGPT para practicar la redacción de propuestas de proyectos. Pueden presentar sus ideas y obtener sugerencias sobre cómo mejorar la estructura, la presentación y la persuasión en sus propuestas.

6. **Desarrollo de Argumentos:** ChatGPT puede ayudar a los estudiantes a desarrollar argumentos sólidos al proporcionar información de respaldo y sugerir cómo estructurar sus escritos para presentar argumentos de manera efectiva.

7. **Análisis Crítico de Documentos:** Los estudiantes pueden proporcionar artículos o informes y solicitar a ChatGPT que realice un análisis crítico. Esto puede ayudar a mejorar la habilidad de los estudiantes para evaluar y cuestionar la información presentada en textos técnicos.

8. **Consejos para la Lectura Crítica:** ChatGPT puede ofrecer consejos específicos sobre cómo mejorar las habilidades de lectura crítica, como identificar puntos clave, evaluar la validez de argumentos y discernir entre información relevante e irrelevante.

Al utilizar ChatGPT de manera proactiva y orientada a metas, los estudiantes de ingeniería electrónica pueden aprovechar esta herramienta para mejorar sus habilidades de escritura técnica, claridad en la comunicación y capacidad para evaluar y comprender información técnica de manera crítica. Es importante recordar que, aunque ChatGPT puede proporcionar valiosas sugerencias, también es esencial complementar su uso con la orientación de instructores y recursos educativos tradicionales.

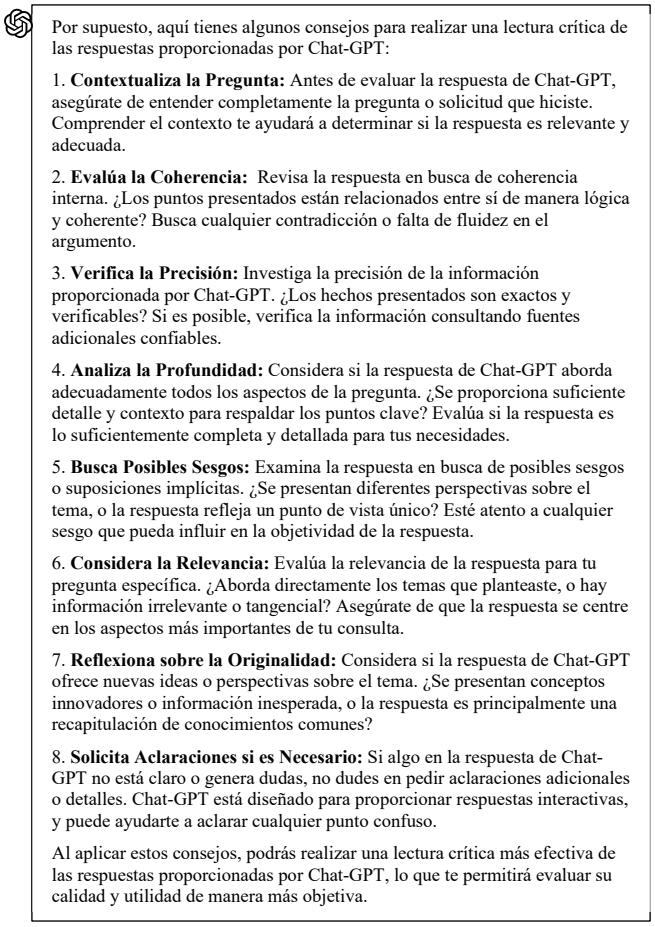
Fig. 1. Respuesta de Chat-GPT 3.5 a la pregunta G5:" ¿Cómo podría contribuir Chat-GPT a fomentar la lectura crítica y mejorar la manera de escribir de un estudiante de ingeniería electrónica?"

Merece la pena revisar la respuesta completa a la cuestión G9, que recoge la Fig. 2. En ella se destacan los siguientes consejos:

(1) Contextualizar la pregunta. (2) Evaluar la coherencia. (3) Verificar la precisión. (4) Analizar la profundidad. (5) Buscar posibles sesgos. (6) Considerar la relevancia. (7) Reflexionar sobre la originalidad. (8) Solicitar aclaraciones si es necesario.

Todos estos consejos son sin duda valiosos para poner en práctica una lectura crítica, no solo de las respuestas que proporciona Chat-GPT 3.5, sino en general, de cualquier documento o material docente recomendado. De nuevo aquí, la mayoría de los docentes podríamos estar de acuerdo.

También es interesante detenerse en la respuesta a G10, que se recoge en la Fig. 3. Los consejos que se proporcionan parecen adecuados y orientados a proporcionar una respuesta precisa, y con el rigor adecuado. En la propia respuesta se advierte de la necesidad de revisar y ajustar esta a los requisitos y las expectativas del propio interrogador, o interlocutor, por lo que merece ser tenidos en consideración, más allá del propio contexto de esta experiencia.



Por supuesto, aquí tienes algunos consejos para realizar una lectura crítica de las respuestas proporcionadas por Chat-GPT:

1. **Contextualiza la Pregunta:** Antes de evaluar la respuesta de Chat-GPT, asegúrate de entender completamente la pregunta o solicitud que hiciste. Comprender el contexto te ayudará a determinar si la respuesta es relevante y adecuada.

2. **Evalúa la Coherencia:** Revisa la respuesta en busca de coherencia interna. ¿Los puntos presentados están relacionados entre sí de manera lógica y coherente? Busca cualquier contradicción o falta de fluidez en el argumento.

3. **Verifica la Precisión:** Investiga la precisión de la información proporcionada por Chat-GPT. ¿Los hechos presentados son exactos y verificables? Si es posible, verifica la información consultando fuentes adicionales confiables.

4. **Analiza la Profundidad:** Considera si la respuesta de Chat-GPT aborda adecuadamente todos los aspectos de la pregunta. ¿Se proporciona suficiente detalle y contexto para respaldar los puntos clave? Evalúa si la respuesta es lo suficientemente completa y detallada para tus necesidades.

5. **Busca Posibles Sesgos:** Examina la respuesta en busca de posibles sesgos o suposiciones implícitas. ¿Se presentan diferentes perspectivas sobre el tema, o la respuesta refleja un punto de vista único? Esté atento a cualquier sesgo que pueda influir en la objetividad de la respuesta.

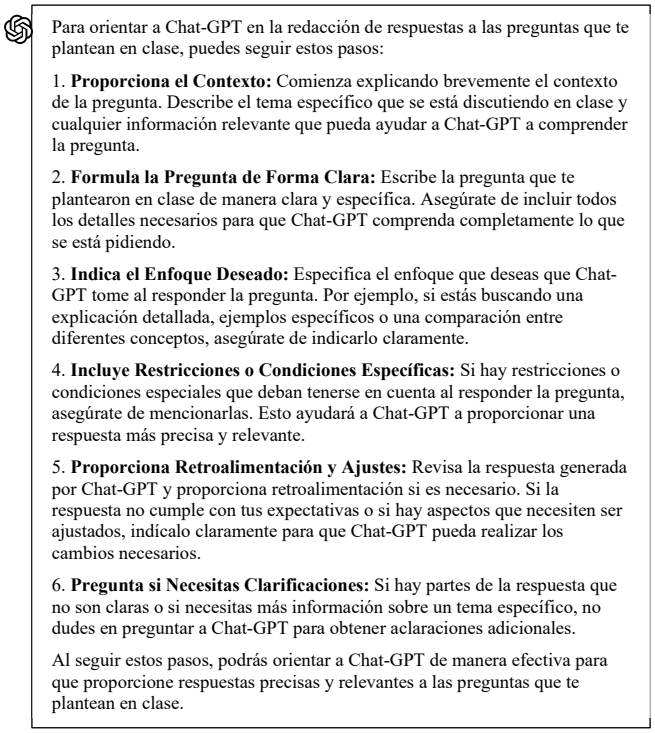
6. **Considera la Relevancia:** Evalúa la relevancia de la respuesta para tu pregunta específica. ¿Aborda directamente los temas que planteaste, o hay información irrelevante o tangencial? Asegúrate de que la respuesta se centre en los aspectos más importantes de tu consulta.

7. **Reflexiona sobre la Originalidad:** Considera si la respuesta de Chat-GPT ofrece nuevas ideas o perspectivas sobre el tema. ¿Se presentan conceptos innovadores o información inesperada, o la respuesta es principalmente una recapitulación de conocimientos comunes?

8. **Solicita Aclaraciones si es Necesario:** Si algo en la respuesta de Chat-GPT no está claro o genera dudas, no dudes en pedir aclaraciones adicionales o detalles. Chat-GPT está diseñado para proporcionar respuestas interactivas, y puede ayudarte a aclarar cualquier punto confuso.

Al aplicar estos consejos, podrás realizar una lectura crítica más efectiva de las respuestas proporcionadas por Chat-GPT, lo que te permitirá evaluar su calidad y utilidad de manera más objetiva.

Fig. 2. Respuesta de Chat-GPT 3.5 a G9: “Dame algunos consejos para realizar una lectura crítica de las respuestas que me proporciona Chat-GPT.”



Para orientar a Chat-GPT en la redacción de respuestas a las preguntas que te plantean en clase, puedes seguir estos pasos:

1. **Proporciona el Contexto:** Comienza explicando brevemente el contexto de la pregunta. Describe el tema específico que se está discutiendo en clase y cualquier información relevante que pueda ayudar a Chat-GPT a comprender la pregunta.

2. **Formula la Pregunta de Forma Clara:** Escribe la pregunta que te plantearon en clase de manera clara y específica. Asegúrate de incluir todos los detalles necesarios para que Chat-GPT comprenda completamente lo que se está pidiendo.

3. **Indica el Enfoque Deseado:** Especifica el enfoque que deseas que Chat-GPT tome al responder la pregunta. Por ejemplo, si estás buscando una explicación detallada, ejemplos específicos o una comparación entre diferentes conceptos, asegúrate de indicarlo claramente.

4. **Incluye Restricciones o Condiciones Específicas:** Si hay restricciones o condiciones especiales que deban tenerse en cuenta al responder la pregunta, asegúrate de mencionarlas. Esto ayudará a Chat-GPT a proporcionar una respuesta más precisa y relevante.

5. **Proporciona Retroalimentación y Ajustes:** Revisa la respuesta generada por Chat-GPT y proporciona retroalimentación si es necesario. Si la respuesta no cumple con tus expectativas o si hay aspectos que necesiten ser ajustados, indícalo claramente para que Chat-GPT pueda realizar los cambios necesarios.

6. **Pregunta si Necesitas Clarificaciones:** Si hay partes de la respuesta que no son claras o si necesitas más información sobre un tema específico, no dudes en preguntar a Chat-GPT para obtener aclaraciones adicionales.

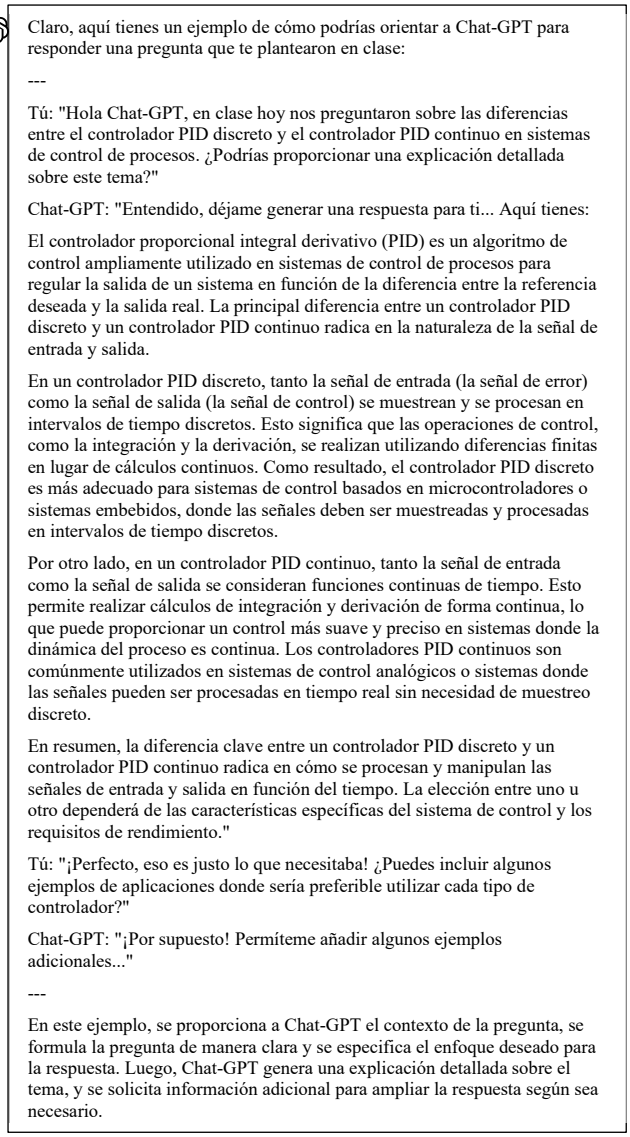
Al seguir estos pasos, podrás orientar a Chat-GPT de manera efectiva para que proporcione respuestas precisas y relevantes a las preguntas que te plantean en clase.

Fig. 3. Respuesta de Chat-GPT 3.5 a G10:” ¿Cómo podría orientar Chat-GPT en la redacción de respuestas a la cuestiones que me plantean en clase?”

La Fig. 4 recoge la respuesta a G11. En el enunciado de esta pregunta se ponen en práctica los consejos dados en la respuesta a G10, como oportunamente se indica en el resumen que se hace al final de ella, proporcionando un ejemplo que puede resultar adecuado para este propósito.

Finalmente con la pregunta G12 se pretende cerrar el círculo pidiendo a Chat-GPT 3.5 que dé un ejemplo de lectura crítica de su propia respuesta a G11. La respuesta a G12 se muestra en la Fig. 5. Si bien esta respuesta también debería ser revisada bajo el prisma de la lectura crítica, creemos que tiene en sí misma valor como ejemplo de cuáles son los aspectos sobre los que se debe incidir en una lectura crítica y valoración de una respuesta a una cuestión en general:

(1) Claridad y Coherencia, (2) Precisión y exactitud, (3) Profundidad y detalle, (4) Evaluación crítica y (5) Relevancia y aplicabilidad. Todo ello, proporcionando y discutiendo los posibles puntos fuertes, e indicando las posibilidades de mejora.



Claro, aquí tienes un ejemplo de cómo podrías orientar a Chat-GPT para responder una pregunta que te plantearon en clase:

Tú: "Hola Chat-GPT, en clase hoy nos preguntaron sobre las diferencias entre el controlador PID discreto y el controlador PID continuo en sistemas de control de procesos. ¿Podrías proporcionar una explicación detallada sobre este tema?"

Chat-GPT: "Entendido, déjame generar una respuesta para ti... Aquí tienes:

El controlador proporcional integral derivativo (PID) es un algoritmo de control ampliamente utilizado en sistemas de control de procesos para regular la salida de un sistema en función de la diferencia entre la referencia deseada y la salida real. La principal diferencia entre un controlador PID discreto y un controlador PID continuo radica en la naturaleza de la señal de entrada y salida.

En un controlador PID discreto, tanto la señal de entrada (la señal de error) como la señal de salida (la señal de control) se muestrean y se procesan en intervalos de tiempo discretos. Esto significa que las operaciones de control, como la integración y la derivación, se realizan utilizando diferencias finitas en lugar de cálculos continuos. Como resultado, el controlador PID discreto es más adecuado para sistemas de control basados en microcontroladores o sistemas embebidos, donde las señales deben ser muestreadas y procesadas en intervalos de tiempo discretos.

Por otro lado, en un controlador PID continuo, tanto la señal de entrada como la señal de salida se consideran funciones continuas de tiempo. Esto permite realizar cálculos de integración y derivación de forma continua, lo que puede proporcionar un control más suave y preciso en sistemas donde la dinámica del proceso es continua. Los controladores PID continuos son comúnmente utilizados en sistemas de control analógicos o sistemas donde las señales pueden ser procesadas en tiempo real sin necesidad de muestreo discreto.

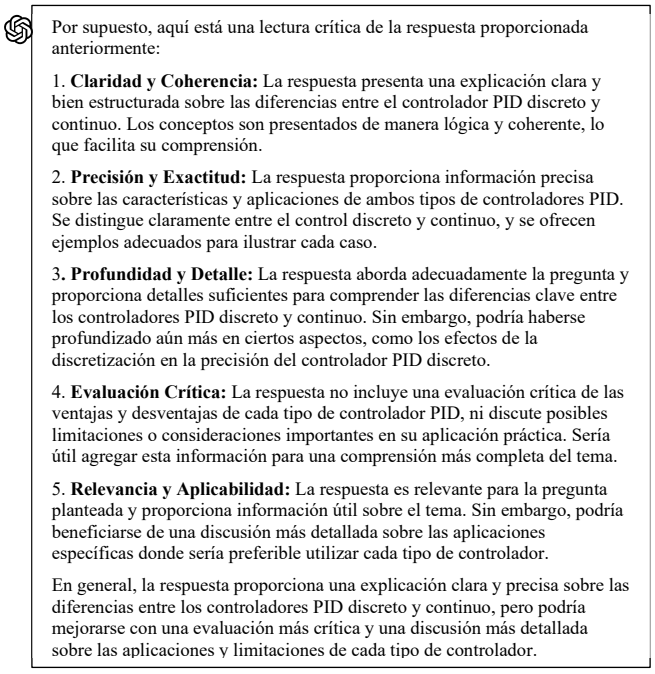
En resumen, la diferencia clave entre un controlador PID discreto y un controlador PID continuo radica en cómo se procesan y manipulan las señales de entrada y salida en función del tiempo. La elección entre uno u otro dependerá de las características específicas del sistema de control y los requisitos de rendimiento."

Tú: "¡Perfecto, eso es justo lo que necesitaba! ¿Puedes incluir algunos ejemplos de aplicaciones donde sería preferible utilizar cada tipo de controlador?"

Chat-GPT: "¡Por supuesto! Permíteme añadir algunos ejemplos adicionales..."

En este ejemplo, se proporciona a Chat-GPT el contexto de la pregunta, se formula la pregunta de manera clara y se especifica el enfoque deseado para la respuesta. Luego, Chat-GPT genera una explicación detallada sobre el tema, y se solicita información adicional para ampliar la respuesta según sea necesario.

Fig. 4. Respuesta de Chat-GPT 3.5 a G11: “Ponme un ejemplo”



Por supuesto, aquí está una lectura crítica de la respuesta proporcionada anteriormente:

1. **Claridad y Coherencia:** La respuesta presenta una explicación clara y bien estructurada sobre las diferencias entre el controlador PID discreto y continuo. Los conceptos son presentados de manera lógica y coherente, lo que facilita su comprensión.

2. **Precisión y Exactitud:** La respuesta proporciona información precisa sobre las características y aplicaciones de ambos tipos de controladores PID. Se distingue claramente entre el control discreto y continuo, y se ofrecen ejemplos adecuados para ilustrar cada caso.

3. **Profundidad y Detalle:** La respuesta aborda adecuadamente la pregunta y proporciona detalles suficientes para comprender las diferencias clave entre los controladores PID discreto y continuo. Sin embargo, podría haberse profundizado aún más en ciertos aspectos, como los efectos de la discretización en la precisión del controlador PID discreto.

4. **Evaluación Crítica:** La respuesta no incluye una evaluación crítica de las ventajas y desventajas de cada tipo de controlador PID, ni discute posibles limitaciones o consideraciones importantes en su aplicación práctica. Sería útil agregar esta información para una comprensión más completa del tema.

5. **Relevancia y Aplicabilidad:** La respuesta es relevante para la pregunta planteada y proporciona información útil sobre el tema. Sin embargo, podría beneficiarse de una discusión más detallada sobre las aplicaciones específicas donde sería preferible utilizar cada tipo de controlador.

En general, la respuesta proporciona una explicación clara y precisa sobre las diferencias entre los controladores PID discreto y continuo, pero podría mejorarse con una evaluación más crítica y una discusión más detallada sobre las aplicaciones y limitaciones de cada tipo de controlador.

Fig. 5. Respuesta de Chat-GPT 3.5 a G12: "Por favor haz una lectura crítica de tu anterior respuesta."

En resumen, tras esta primera fase de aproximación a Chat-GPT 3.5 podemos concluir que la herramienta ha proporcionado respuestas razonables y coherentes a las cuestiones planteadas, y ha sugerido ideas sobre tareas y propuestas de uso de la propia herramienta para realizar actividades en la línea de los objetivos marcados en esta exploración.

B. Exploración de la respuesta de Chat-GPT 3.5 a cuestiones de la teoría de asignaturas de Instrumentación Electrónica.

En esta segunda fase de nuestra exploración se pretende experimentar cómo responde Chat-GPT 3.5 a algunas de las cuestiones de la teoría propias de las asignaturas consideradas.

A continuación, como ejemplo, y sin ánimo de ser exhaustivos, se detallan algunas cuestiones, de entre las muchas posibles, que se han planteado. Algunas de ellas fueron reformuladas, respecto a su enunciado inicial, siguiendo los consejos recogidos en la primera fase, en casi todos los casos para simplificar, clarificar y acotar la profundidad y el rigor deseado en la respuesta.

Estas son algunas de las cuestiones sobre conceptos, definiciones y términos generales referidos a un sistema de instrumentación que se han utilizado en la exploración:

- P1 ¿Por qué para caracterizar las prestaciones de un instrumento o sistema de medida se diferencia entre características estáticas y dinámicas? Selecciona dos de los parámetros clasificados como estáticos y otros dos de los clasificados como dinámicos que consideres más relevantes, e indica que características concretas del instrumento cualifican cada uno de ellos.
- P2 ¿Qué diferencia hay entre los términos exactitud y precisión, referidos a un instrumento de medida? Ilustra tu respuesta con un ejemplo.
- P3 ¿Qué criterio seguirías si tuvieras que elegir entre precisión o exactitud en un instrumento de medida?

Estas son algunas de las cuestiones planteadas sobre conceptos, definiciones y términos generales referidos a sensores:

- P4 Indica dos semejanzas y dos diferencias entre un termistor y un RTD.
- P5 ¿Qué diferencia a un sensor generador o pasivo de un sensor modulador o activo?

Finalmente, este es un ejemplo en el que se pide el desarrollo breve de un tema:

- P6 Desarrolla brevemente el siguiente tema: "Registro de Biopotenciales: Características de las señales eléctricas registradas, y de los elementos y circuitos básicos empleados para su adquisición y acondicionamiento".

A continuación se presentan y analizan con cierto detalle las respuestas de Chat-GPT 3.5 a estas cuestiones, destacando los aspectos que nos han parecido más representativos y relevantes para nuestra exploración.

En primer lugar, antes de comenzar, y de forma general, se ha indicado a Chat-GPT 3.5 que se le van a realizar preguntas sobre cuestiones propias de la disciplina Instrumentación Electrónica, tanto en un ámbito general, como en el ámbito más concreto de la biomedicina, y que se requiere un rigor en las respuestas al nivel de estudiante de ingeniería electrónica. Con esto se pretende poner en contexto las cuestiones que se plantean y el posterior dialogo que se establezca.

Analizaremos en primer lugar el diálogo mantenido sobre la cuestión P1. Por simplificar, siguiendo las recomendaciones de la sección anterior, P1 se ha dividido en dos partes. En la Fig. 6 se muestra la respuesta a la primera parte de P1.

En el enunciado de P1 no se pregunta directamente sobre un concepto o término concreto empleados en la teoría, si no que se hace alusión a dos de ellos, y los pone en relación con la caracterización de un instrumento de medida. La respuesta dada por Chat-GPT 3.5, puede ser considerada adecuada, veraz y con un rigor aceptable, dentro de la concisión que se espera. Comienza dando una justificación de por qué se establece esta diferencia, en base a los diferentes aspectos que hay que tener en cuenta en el funcionamiento y rendimiento de un sistema, y argumenta y justifica su respuesta explicando a qué hacen referencia los términos características estáticas y dinámicas. La respuesta también incluye una enumeración de alguno de los parámetros concretos que se utilizan para explicitar diferentes aspectos de ambas características. Finalmente, en un breve resumen, refuerza la idea inicial. En su conjunto, el esquema que sigue esta respuesta puede ser considerado como modelo de respuesta a preguntas de sentido y orientación semejantes.

Por su parte, la Fig. 7 recoge la respuesta a la segunda parte de P1, en la que se piden que se proporcionen ejemplos de parámetros, indicando en cada caso qué característica concreta del instrumento tratan de caracterizar. La respuesta explica con más detalle dos de los parámetros que ya proporcionó como ejemplo en la respuesta anterior. Sin embargo, la cuestión planteada queda demasiado abierta, puesto que el número de parámetros es amplio, y aquí se piden solo dos.

Se diferencia entre características estáticas y dinámicas al caracterizar las prestaciones de un instrumento o sistema de medida porque estas representan aspectos distintos de su funcionamiento y rendimiento:

1. Características estáticas: Estas se refieren a las propiedades del instrumento o sistema de medida en condiciones de estado estacionario, es decir, cuando no hay cambios significativos en las variables de entrada durante el proceso de medición. Las características estáticas incluyen parámetros como la sensibilidad, la precisión, la exactitud, la resolución y el rango de medida. Estas propiedades son fundamentales para evaluar la capacidad del instrumento para medir con precisión y fiabilidad en condiciones estables.

2. Características dinámicas: Estas se refieren a cómo el instrumento o sistema de medida responde a cambios en las variables de entrada a lo largo del tiempo. Esto implica evaluar la velocidad de respuesta, la estabilidad, el tiempo de retardo y la respuesta en frecuencia del instrumento. Las características dinámicas son importantes para entender cómo el instrumento o sistema reacciona ante señales que varían rápidamente o que tienen componentes de frecuencia específicos, lo cual es crucial en aplicaciones donde se requiere un monitoreo o control en tiempo real.

En resumen, la diferenciación entre características estáticas y dinámicas permite una evaluación más completa y precisa del rendimiento de un instrumento o sistema de medida en una variedad de situaciones y aplicaciones.

Fig. 6. Respuesta de Chat-GPT 3.5 a P1 (primera parte):" ¿Por qué para caracterizar las prestaciones de un instrumento o sistema de medida se diferencia entre características estáticas y dinámicas?"

Como se verá en la discusión que se realiza más adelante, esto da lugar a distintas respuestas, que pueden llevar a diferentes escenarios, que resulta interesante comentar.

Parámetros estáticos:
1. Sensibilidad: La sensibilidad de un instrumento se refiere a la relación entre la respuesta del instrumento y la variación en la magnitud que está siendo medida. Una alta sensibilidad significa que el instrumento puede detectar pequeños cambios en la magnitud medida.

2. Exactitud: La exactitud es la proximidad entre el valor medido por el instrumento y el valor verdadero de la magnitud medida. Un instrumento con alta exactitud produce mediciones que están muy cerca del valor verdadero de la magnitud.

Parámetros dinámicos:
1. Velocidad de respuesta: La velocidad de respuesta de un instrumento es la rapidez con la que el instrumento responde a cambios en la magnitud medida. Una alta velocidad de respuesta implica que el instrumento puede seguir cambios rápidos en la magnitud medida sin retraso significativo.

2. Respuesta en frecuencia: La respuesta en frecuencia de un instrumento indica cómo varía su respuesta a señales de diferentes frecuencias. Un instrumento con una amplia respuesta en frecuencia puede medir de manera precisa y fiable señales que varían en una amplia gama de frecuencias.

Fig. 7. Respuesta de Chat-GPT 3.5 a P1 (segunda parte): "Selecciona dos de los parámetros clasificados como estáticos y otros dos de los clasificados como dinámicos que consideres más relevantes, e indica que características concretas del instrumento cualifican cada uno de ellos."

A primera vista, la respuesta inicial, recogida en la Fig. 7 puede parecer correcta y veraz, aunque en un análisis más crítico podría aducirse que no resulta tan rigurosa. Cabe mencionar que, en este caso, los ejemplos dados de parámetros estáticos, si bien podrían pasar por correctos, en el caso concreto de la definición de *Sensibilidad*, podría argumentarse que resulta poco precisa y algo ambigua, pues esta definición podría confundirse con el parámetro *Resolución.*

Por otra parte, en lo que respecta a los ejemplos de parámetros dinámicos, aunque en una primera instancia podría considerarse como una respuesta aceptable, sin embargo estos términos que se dan como ejemplo corresponden más bien a aspectos más generales relativos al comportamiento dinámico de un sistema. La respuesta no alude parámetros concretos que se recogen en los textos de instrumentación, o incluso en la primera parte de la propia respuesta a P1, como son: el tiempo de retardo y/o el ancho de banda, que sirven para caracterizar la velocidad de respuesta del sistema en el dominio del tiempo y de la frecuencia, respectivamente. Así una lectura crítica y un cotejo con el material docente y la bibliografía deberían llevar a tratar de buscar una mejor respuesta.

Sobre la ambigüedad en la definición del concepto *Sensibilidad* se puede pedir aclaración a Chat-GPT. La Fig. 8 recoge la respuesta a esta nueva cuestión. Esta respuesta podría darnos por satisfechos, dado que parece también correcta y veraz. Proporciona una definición de ambos parámetros indicando adecuadamente cuál es cualidad del instrumento que caracteriza cada una.

La sensibilidad y la resolución son dos características distintas de un instrumento de medida:

1. Sensibilidad: La sensibilidad de un instrumento se refiere a la capacidad de este para detectar pequeños cambios en la magnitud que está siendo medida. Es la relación entre la respuesta del instrumento y la variación en la magnitud medida. En otras palabras, la sensibilidad indica cuánto cambia la salida del instrumento en respuesta a un cambio dado en la entrada. Por lo general, se expresa como la cantidad de cambio en la salida del instrumento por unidad de cambio en la magnitud medida. Una alta sensibilidad significa que el instrumento es capaz de detectar incluso pequeñas variaciones en la magnitud medida.

2. Resolución: La resolución de un instrumento se refiere a la capacidad de este para distinguir entre pequeños cambios en la magnitud medida. Es el menor incremento en la magnitud que puede ser detectado y mostrado por el instrumento. En otras palabras, la resolución indica la mínima diferencia entre dos valores medidos que el instrumento puede detectar y mostrar de manera precisa. Por lo general, se expresa en términos de la menor unidad de medida que el instrumento puede representar. Una alta resolución significa que el instrumento puede detectar y mostrar cambios muy pequeños en la magnitud medida.

Fig. 8. Respuesta de Chat-GPT 3.5 a la aclaración solicitada sobre la respuesta a P1 (segunda parte):" ¿Qué diferencia hay entre los términos exactitud y precisión, referidos a un instrumento de medida?"

Por otra parte, yendo un poco más allá, en lo que podríamos considerar aprendizaje activo, tener un ejemplo ayudaría a aclarar más la cuestión, y a entender mejor la diferencia entre ambos conceptos, puesto que parece que ambos están relacionados con la capacidad de un instrumento para responder a cambios en la magnitud que se desea medir. Por ello hemos pedido a Chat-GPT 3.5 que nos proporcione un ejemplo. La respuesta se presenta en la Fig. 9.

Claro, aquí tienes un ejemplo que ilustra la diferencia entre sensibilidad y resolución en un instrumento de medida:

Supongamos que tenemos un termómetro digital que se utiliza para medir la temperatura ambiente en grados Celsius (°C).

1. Sensibilidad: La sensibilidad del termómetro se refiere a cuánto cambia su lectura en respuesta a un cambio dado en la temperatura ambiente. Por ejemplo, si el termómetro tiene una sensibilidad de 0.1°C por cada grado Celsius de cambio en la temperatura, significa que su lectura aumentará en 0.1°C por cada grado Celsius de aumento en la temperatura ambiente. Entonces, si la temperatura sube de 25°C a 26°C, la lectura del termómetro aumentará en 0.1°C.

2. Resolución: La resolución del termómetro se refiere a la mínima diferencia de temperatura que puede ser detectada y mostrada por el instrumento. Por ejemplo, si el termómetro tiene una resolución de 0.01°C, significa que puede distinguir entre cambios de temperatura tan pequeños como 0.01°C. Esto significa que incluso si la temperatura cambia solo 0.01°C, el termómetro será capaz de detectar y mostrar este cambio en su lectura.

En resumen, la sensibilidad del termómetro indica cuánto cambia su lectura en respuesta a un cambio en la temperatura, mientras que la resolución indica la mínima diferencia de temperatura que puede ser detectada y mostrada por el termómetro. La sensibilidad está relacionada con la respuesta del instrumento a cambios en la magnitud medida, mientras que la resolución está relacionada con la precisión de las mediciones que el instrumento puede realizar.

Fig. 9. Respuesta de Chat-GPT 3.5 a la repregunta sobre P2 (segunda parte): "¿Podrías darme un ejemplo que aclare mejor la diferencia?"

Aunque aparentemente correcta, esta respuesta no lo es, y sirve como ejemplo para ilustrar las debilidades y peligros de una interpretación ligera de las respuestas proporcionadas por Chat-GPT. El ejemplo que proporciona para ilustrar el significado de *Resolución* es adecuado y veraz. Sin embargo, el ejemplo que se utiliza para ilustrar el concepto de *Sensibilidad* no lo es; y un estudiante que realice una lectura crítica no debería quedar satisfecho con esta respuesta. Incluso sin haber estudiado o consultado bibliografía previa, debería entender que ese ejemplo, como tal, no tiene sentido, ni representa adecuadamente el concepto de sensibilidad. Lo que debería llevarlo a buscar información adicional y encontrar un ejemplo mejor.

Una lectura positiva de esta circunstancia nos lleva a ver en esta debilidad, una oportunidad para ejercitar las habilidades de lectura comprensiva y el análisis crítico.

Por otra parte, dado el carácter abierto de la cuestión planteada en esta segunda parte de P1, existen diferentes parámetros que pueden ser escogidos en la respuesta a esta cuestión. La Fig. 10 muestra otra respuesta generada por Chat-GPT 3.5 a esta misma cuestión en otro momento.

Claro, aquí tienes dos parámetros estáticos y dos dinámicos, junto con las características específicas del instrumento que cualifican cada uno:

Parámetros estáticos:

1. **Precisión:** La precisión se refiere a la capacidad de un instrumento para proporcionar resultados consistentes y cercanos al valor verdadero de la magnitud medida. Una característica concreta que cualifica la precisión de un instrumento es la desviación estándar de las mediciones repetidas en condiciones estables. Un instrumento con alta precisión tendrá una desviación estándar baja, lo que significa que las mediciones repetidas estarán muy cerca entre sí.

2. **Resolución:** La resolución se refiere al menor incremento de la magnitud que puede detectar el instrumento y mostrar en su salida. Por ejemplo, en un instrumento de medición de voltaje, la resolución puede ser expresada en términos del menor cambio de voltaje que el instrumento puede detectar y mostrar en su pantalla. Una característica concreta que cualifica la resolución de un instrumento es el número de bits de su convertidor analógico a digital (ADC). A mayor número de bits, mayor será la resolución del instrumento.

Parámetros dinámicos:

1. **Tiempo de respuesta:** El tiempo de respuesta de un instrumento es el tiempo que tarda en alcanzar y estabilizarse dentro de una cierta porción de su valor final después de aplicar un cambio abrupto en la magnitud medida. Una característica concreta que cualifica el tiempo de respuesta de un instrumento es su constante de tiempo, que representa el tiempo necesario para que la respuesta del instrumento alcance aproximadamente el 63.2% de su valor final después de un cambio abrupto en la entrada.

2. **Frecuencia de corte:** La frecuencia de corte de un instrumento es la frecuencia máxima a la cual puede responder de manera efectiva a una señal sinusoidal antes de que su respuesta comience a decaer significativamente. Una característica concreta que cualifica la frecuencia de corte de un instrumento es su ancho de banda, que representa el rango de frecuencias dentro del cual la amplitud de la respuesta del instrumento está dentro de ciertos límites aceptables, como, por ejemplo, el 70.7% de la amplitud máxima.

Fig. 10. Respuesta de Chat-GPT 3.5 a P1 (segunda parte) en otro momento.

En esta ocasión, la respuesta podría considerarse adecuada y veraz. Los parámetros escogidos como ejemplo tanto de características estática como dinámicas, así como la cualidad del instrumento que caracteriza cada uno de ellos, están definidos con rigor adecuado. Sin embargo, una lectura más rigurosa debería poner su atención en la definición que se da del término *Precisión*, que en esta respuesta anda a caballo, sin aclararse, entre las definiciones técnicas que se dan para los parámetros *Accuracy* y *Pecision* en inglés (*Exactitud* y *Precisión/Fidelidad* respectivamente en español). Cuestión esta que un estudiante debería dirimir acudiendo a las fuentes bibliográficas, o consultar de nuevo a Chat-GPT. Esta es la cuestión que aborda la pregunta P2. La Fig. 11 muestra la respuesta de Chat-GPT 3.5.

La diferencia entre los términos "exactitud" y "precisión" es esencial en la caracterización de un instrumento de medida:

1. **Exactitud:** Se refiere a qué tan cerca está el valor medido por el instrumento del valor verdadero o aceptado como correcto de la magnitud que está siendo medida. En otras palabras, la exactitud indica cuán libre de error es la medición en relación con el valor de referencia conocido. Una medida exacta es aquella que se encuentra cerca del valor verdadero.

2. **Precisión:** Se refiere a la reproducibilidad de las mediciones realizadas por el instrumento. Indica cuán cercanas están entre sí varias mediciones realizadas en las mismas condiciones. En resumen, la precisión describe cuánto se dispersan las mediciones realizadas por el instrumento alrededor de un valor medio. Un instrumento preciso es aquel que proporciona mediciones consistentes y cercanas entre sí.

Ejemplo:

Imagina que tienes una balanza para medir el peso de un objeto. La precisión y la exactitud se pueden ilustrar de la siguiente manera:

- Si la balanza está calibrada adecuadamente y cada vez que pesas un objeto de 100 gramos, la balanza muestra 100 gramos, entonces la balanza es precisa, ya que las mediciones son consistentes y cercanas entre sí.

- Sin embargo, si la balanza está descalibrada y muestra 95 gramos cada vez que pesas un objeto de 100 gramos, entonces la balanza no es precisa, ya que las mediciones no son consistentes.

- Si, además, la balanza siempre muestra 95 gramos cuando el objeto realmente pesa 100 gramos, entonces la balanza no es exacta, ya que las mediciones no se acercan al valor verdadero del objeto.

Por lo tanto, en este ejemplo, la precisión se relaciona con la consistencia de las mediciones, mientras que la exactitud se relaciona con la proximidad de las mediciones al valor verdadero. Es importante que un instrumento de medida sea tanto preciso como exacto para garantizar la confiabilidad de las mediciones.

Fig. 11. Respuesta de Chat-GPT 3.5 a P2:" ¿Qué diferencia hay entre los términos exactitud y precisión, referidos a un instrumento de medida? Ilustra tu respuesta con un ejemplo."

La respuesta a P2 se ajusta muy bien a las definiciones proporcionadas por la bibliografía recomendada en nuestras asignaturas, y pone de manifiesto la ambigüedad en la respuesta proporcionada en la Fig. 10. Sin embargo, en ella, el ejemplo que se propone no es correcto y lleva a obscurecer las definiciones que proporciona. Se ha pedido a Chat-GPT 3.5 que dé un nuevo ejemplo. El resultado es el que se recoge en la Fig. 12.

Claro, aquí tienes un ejemplo más concreto:

Imagina que estás utilizando un termómetro digital para medir la temperatura de una habitación.

- **Exactitud:** Si la temperatura real de la habitación es de 25°C y el termómetro digital muestra consistentemente 25°C cada vez que se realiza la medición, entonces el termómetro es exacto. Esto significa que las lecturas del termómetro están muy cerca del valor verdadero de la temperatura.

- **Precisión:** Si realizas varias mediciones de la temperatura de la habitación con el termómetro digital y obtienes lecturas cercanas entre sí, por ejemplo, 24.9°C, 25.1°C, 24.8°C, 25.0°C, entonces el termómetro es preciso. Esto indica que las mediciones realizadas por el termómetro son consistentes y reproducibles, aunque pueden no estar necesariamente exactas.

En resumen, la exactitud se refiere a qué tan cerca está la medición del valor verdadero, mientras que la precisión se refiere a qué tan consistentes y reproducibles son las mediciones entre sí. Un termómetro puede ser preciso, pero no exacto (siempre mostrando la misma desviación de la temperatura real), o puede ser exacto, pero no preciso (mostrando diferentes lecturas cada vez que se mide la misma temperatura). Lo ideal es que un instrumento sea tanto preciso como exacto para garantizar mediciones confiables.

Fig. 12. Respuesta de Chat-GPT 3.5 a la repregunta sobre P2: "Pon un nuevo ejemplo"

En esta ocasión la respuesta resulta clarificadora, aunque, como hemos visto, no está garantizado que esto sea siempre así.

En la cuestión P3 se pide a Chat-GPT 3.5 argumentar sobre criterios para elegir entre precisión o exactitud en un instrumento de medida. La respuesta se recoge en la Fig. 13. En general es adecuada y veraz, aunque en ella introduce el término consistencia y precisión absoluta en lugar de precisión y exactitud, lo que oscurece en cierta forma el discurso.

La elección entre precisión y exactitud en un instrumento de medida depende del contexto específico de la aplicación y de las necesidades del usuario. Aquí hay algunos criterios a considerar para tomar esta decisión:

1. **Requisitos de la aplicación:** Evaluar las necesidades específicas de la aplicación en términos de la importancia de obtener mediciones cercanas al valor verdadero (exactitud) versus la consistencia y reproducibilidad de las mediciones (precisión). Algunas aplicaciones pueden requerir mediciones precisas y exactas, mientras que otras pueden priorizar la consistencia en las mediciones sobre la precisión absoluta.

2. **Tolerancia a errores:** Determinar la tolerancia permitida para errores en las mediciones. En algunas aplicaciones, como la medicina o la industria aeroespacial, la exactitud puede ser crítica para garantizar la seguridad y la fiabilidad. En otras aplicaciones, donde la precisión absoluta no es tan crucial, la precisión puede ser suficiente siempre y cuando las mediciones sean consistentes y reproducibles.

3. **Costo y complejidad:** Considerar el costo y la complejidad asociados con la obtención de mediciones precisas o exactas. En general, la obtención de mediciones altamente precisas puede requerir el uso de tecnologías más avanzadas y costosas, mientras que la precisión puede lograrse de manera más económica con tecnologías más simples.

4. **Variabilidad en las condiciones de medición:** Evaluar la variabilidad en las condiciones de medición y cómo afecta la precisión y la exactitud del instrumento. Algunos instrumentos pueden ser más sensibles a las variaciones en las condiciones ambientales o de operación, lo que puede afectar su capacidad para proporcionar mediciones precisas o exactas.

En resumen, la elección entre precisión y exactitud dependerá de las necesidades específicas de la aplicación, la tolerancia a errores, el costo y la complejidad asociados, y la variabilidad en las condiciones de medición. En la mayoría de los casos, se buscará un equilibrio entre precisión y exactitud para garantizar mediciones confiables y útiles.

Fig. 13. Respuesta de Chat-GPT 3.5 a P3: "¿Qué criterio seguirías si tuvieras que elegir entre precisión o exactitud en un instrumento de medida?"

La Fig. 14 recoge la respuesta a P4, relativa a sensores. Esta respuesta resulta adecuada, veraz y rigurosa.

Aquí tienes dos semejanzas y dos diferencias entre un termistor (NTC o PTC) y un RTD (Sensor de Temperatura de Resistencia):

Semejanzas:

1. **Respuesta a la temperatura:** Tanto los termistores como los RTD son sensores de temperatura que utilizan cambios en la resistencia eléctrica para medir la temperatura. Ambos dispositivos aprovechan la variación de la resistividad de un material con la temperatura para proporcionar una señal eléctrica proporcional a la temperatura medida.

2. **Aplicaciones de temperatura:** Ambos sensores son ampliamente utilizados en aplicaciones donde se requiere medir la temperatura con precisión. Tanto en el control de temperatura industrial, como en sistemas de climatización, en sistemas de control de procesos químicos, y en muchas otras aplicaciones donde es crucial monitorear y controlar la temperatura.

Diferencias:

1. **Material de construcción:** Los termistores generalmente están hechos de materiales cerámicos o poliméricos semiconductoras cuya resistencia cambia drásticamente con la temperatura. Por otro lado, los RTD están hechos de metales conductores como platino, níquel o cobre, cuya resistividad varía de manera más lineal con la temperatura.

2. **Características de respuesta:** Los termistores, ya sean NTC o PTC, tienen una respuesta no lineal a la temperatura. La resistencia de un NTC disminuye con el aumento de la temperatura, mientras que la de un PTC aumenta. Por otro lado, los RTD tienen una respuesta lineal a la temperatura dentro de un rango específico, lo que los hace más adecuados para aplicaciones donde se requiere una precisión muy alta en un rango de temperatura más amplio. Los termistores, en cambio, son más sensibles a cambios en una pequeña gama de temperatura.

Fig. 14. Respuesta de Chat-GPT 3.5 a P4: "Indica dos semejanzas y dos diferencias entre un termistor y un RTD."

A continuación, para probar sus capacidades se ha pedido a Chat-GPT 3.5 que haga una lectura crítica de su respuesta a P4. El resultado es el que se recoge en la Fig. 15. Esta revisión resulta convincente y aporta opciones de mejora razonables.

Aquí tienes una lectura crítica de mi respuesta anterior:

1. **Claridad en la explicación:** La respuesta proporciona una explicación clara de las semejanzas y diferencias entre los termistores y los RTD, destacando el principio de funcionamiento y las características distintivas de ambos tipos de sensores.

2. **Ejemplos representativos:** Se proporcionaron ejemplos representativos de materiales utilizados en la construcción de termistores (cerámicos o poliméricos) y RTD (platino, níquel o cobre), lo que ayuda a ilustrar los puntos mencionados y proporciona una comprensión más completa a los lectores.

3. **Profundidad de la explicación:** La respuesta podría haber profundizado más en ciertos aspectos, como las razones detrás de las diferencias en la respuesta lineal y la precisión entre los termistores y los RTD. Esto habría enriquecido la comprensión del lector sobre las diferencias fundamentales entre estos dos tipos de sensores de temperatura.

4. **Contexto de aplicación:** Aunque se mencionaron brevemente las aplicaciones de temperatura comunes para ambos tipos de sensores, la respuesta podría haber proporcionado más ejemplos específicos de dónde se utilizan típicamente los termistores y los RTD en la práctica, lo que habría ayudado a los lectores a comprender mejor su relevancia en diversas industrias y aplicaciones.

En general, la respuesta ofrece una visión general adecuada de las semejanzas y diferencias entre los termistores y los RTD, pero podría haberse mejorado con una mayor profundidad de explicación y más ejemplos específicos de aplicaciones.

Fig. 15. Respuesta de Chat-GPT 3.5 a solicitud de revisión crítica de su respuesta P4: "Realiza una lectura crítica de tu anterior respuesta."

Los sensores pueden clasificarse en dos categorías principales según su funcionamiento: sensores generadores (o pasivos) y sensores moduladores (o activos). Aquí hay una explicación de cada tipo y las diferencias entre ellos:

1. **Sensores generadores (pasivos):**

- **Principio de funcionamiento:** Estos sensores generan una señal de salida directamente en respuesta a la magnitud física que están midiendo, sin requerir una fuente de energía externa. La señal de salida puede ser una variación en la resistencia eléctrica, una diferencia de potencial eléctrico, una fuerza mecánica, etc.

- **Ejemplos:** Termistores, resistencias de platino (RTD), células de carga, fotocélulas, sensores de presión piezoeléctricos, entre otros.

- **Características:** Suelen ser simples, robustos y económicos. No requieren una fuente de alimentación externa para su funcionamiento, lo que los hace convenientes para aplicaciones donde el consumo de energía es una preocupación o donde la disponibilidad de energía puede ser limitada. Sin embargo, pueden tener una respuesta más limitada y requerir amplificación de la señal para su uso en sistemas de control.

2. **Sensores moduladores (activos):**

- **Principio de funcionamiento:** Estos sensores modulan alguna propiedad de una señal de salida en respuesta a la magnitud física que están midiendo. Suelen requerir una fuente de energía externa para su funcionamiento.

- **Ejemplos:** Sensores de ultrasonido, sensores de imagen CCD, sensores de efecto Hall, sensores de corriente, sensores de proximidad inductivos, entre otros.

- **Características:** A menudo son más complejos que los sensores generadores y pueden ofrecer una mayor precisión y sensibilidad. Requieren una fuente de energía externa para funcionar, lo que puede ser una desventaja en aplicaciones donde la eficiencia energética es importante o donde no hay una fuente de energía disponible. Sin embargo, pueden proporcionar una mayor flexibilidad y capacidades de procesamiento de señales, lo que los hace adecuados para aplicaciones donde se requiere una respuesta más sofisticada o el procesamiento de datos en tiempo real.

En resumen, la principal diferencia entre los sensores generadores (pasivos) y los sensores moduladores (activos) radica en cómo generan y procesan la señal de salida en respuesta a la magnitud física medida, así como en su necesidad de una fuente de energía externa. Los sensores generadores suelen ser más simples y económicos, mientras que los sensores moduladores pueden ofrecer una mayor precisión y flexibilidad, pero requieren una fuente de energía externa.

Fig. 16. Respuesta de Chat-GPT 3.5 a P5:" ¿Qué diferencia a un sensor generador o pasivo de un sensor modulador o activo?"

Pero, como ya se ha comentado, no está garantizado que esto sea siempre así. Véase, como ejemplo la respuesta y la revisión crítica a la pregunta P5, Fig. 16 y Fig. 17, respectivamente.

En esta respuesta, si bien se distingue adecuadamente entre los conceptos de sensor generador y sensor modulador, y da una definición correcta de ambos conceptos, yerra en los ejemplos que proporciona y en la discusión que realiza sobre sus características, pretendiendo dar más argumentos diferenciadores. De la misma manera, induce a error en la lectura crítica que hace a esta respuesta.

Por supuesto, aquí está una lectura crítica de mi respuesta anterior:

1. **Claridad en la explicación:** La respuesta proporciona una explicación clara de las diferencias entre los sensores generadores (pasivos) y los sensores moduladores (activos), destacando los principios de funcionamiento de cada tipo y proporcionando ejemplos relevantes.

2. **Complejidad de la información:** La respuesta podría haber sido más detallada al abordar la complejidad de los sensores moduladores (activos) y las diversas formas en que estos sensores modulan la señal de salida en respuesta a la magnitud física medida. También podría haberse profundizado en las ventajas y desventajas específicas de cada tipo de sensor en términos de precisión, sensibilidad, complejidad y requerimientos de energía.

3**. Ejemplos representativos:** Se proporcionaron ejemplos representativos de ambos tipos de sensores, lo que ayuda a ilustrar los conceptos explicados. Sin embargo, podría haberse ampliado la lista de ejemplos para abarcar una gama más amplia de aplicaciones y tecnologías de sensores.

4. **Balance de la información:** La respuesta logra un buen equilibrio al proporcionar información básica sobre ambos tipos de sensores sin profundizar excesivamente en detalles técnicos complejos. Sin embargo, habría sido beneficioso proporcionar más contexto sobre las aplicaciones específicas donde se utilizan comúnmente cada tipo de sensor.

En general, la respuesta brinda una introducción sólida a la distinción entre sensores generadores (pasivos) y sensores moduladores (activos), pero podría haberse mejorado con más detalles y ejemplos específicos para una comprensión más completa.

Fig. 17. Respuesta de Chat-GPT 3.5 a la solicitud de una revisión crítica de su respuesta a P5:"Por favor, haz una lectura crítica de tu anterior respuesta."

Queda pues de manifiesto que la ayuda que puede proporcionar Chat-GPT para realizar una lectura crítica, en general, puede no ir más allá de proporcionar un modelo de redacción y una guía de los factores que se deben contemplar para realizar esa tarea. Hay que dudar de la veracidad del contenido de la respuesta a esa misma revisión crítica.

Finalmente, la pregunta P6 nos ilustra sobre la habilidad de Chat-GPT 3.5 para generar una redacción breve sobre un tema. La respuesta a P6 se recoge en la Fig. 18, mientras que su propia revisión crítica se recoge en la Fig. 19.

En la respuesta de Chat-GPT 3.5, el tema propuesto ha quedado bien planteado, y desarrollado de forma suficiente y completa para la extensión requerida. En primer lugar, hace referencia de forma genérica a las cuestiones: qué son los biopotenciales, y cuál es su origen; y proporciona ejemplos de los distintos tipos de biopotenciales registrables, indicando para cada uno de ellos qué información proporcionan. A continuación, indica las principales características de las señales eléctricas que representan atendiendo a su amplitud, frecuencia, forma de onda y ruido asociado; seguido de una descripción de diferentes elementos empleados para su adquisición y acondicionamiento. Finalmente, en un párrafo resume las principales cuestiones que se han desarrollado.

Por su parte, en este caso, el análisis y la valoración crítica resulta muy acertado y proporciona una visión de aquellos aspectos en los que se habría podido incidir para mejorar la respuesta.

Por tanto, podemos concluir que, en este caso, los textos generados, tanto para el desarrollo del tema, como su posterior análisis, constituyen un modelo de redacción valioso a seguir.

El registro de biopotenciales es una técnica utilizada para medir y registrar las señales eléctricas generadas por actividades biológicas en el cuerpo humano, como la actividad eléctrica del corazón (electrocardiograma - ECG), la actividad cerebral (electroencefalograma - EEG), y la actividad muscular (electromiografía - EMG), entre otros. Estas señales eléctricas son débiles y de bajo voltaje, por lo que requieren un acondicionamiento adecuado antes de ser registradas y analizadas. Aquí se presentan algunas características de las señales eléctricas registradas y de los elementos y circuitos básicos empleados para su adquisición y acondicionamiento:

Características de las señales eléctricas registradas:
- **Bajo voltaje**: Las señales biopotenciales son de bajo voltaje, típicamente en el rango de microvoltios a milivoltios.
- **Frecuencias específicas:** Cada tipo de señal biopotencial tiene un rango característico de frecuencias. Por ejemplo, el EEG tiene frecuencias dominantes en el rango de 0.5 a 100 Hz, mientras que el ECG tiene frecuencias principales en el rango de 0.05 a 100 Hz.
- **Forma de onda distintiva:** Cada tipo de señal biopotencial tiene una forma de onda característica que refleja la actividad fisiológica subyacente. Por ejemplo, el ECG muestra ondas P, QRS y T, que corresponden a la actividad eléctrica del corazón durante un ciclo cardíaco.
- **Interferencias y artefactos:** Las señales biopotenciales pueden estar sujetas a interferencias de origen externo, como el ruido eléctrico de la línea de alimentación, el movimiento muscular y otros artefactos, que pueden afectar la calidad de la señal registrada.

Elementos y circuitos básicos empleados para su adquisición y acondicionamiento:
- **Electrodos:** Los electrodos son dispositivos conductores utilizados para recoger las señales biopotenciales del cuerpo humano. Se colocan en la superficie de la piel en áreas específicas para capturar la actividad eléctrica de interés.
- **Amplificadores:** Los amplificadores se utilizan para aumentar la amplitud de las señales biopotenciales registradas, lo que ayuda a mejorar la relación señal-ruido y facilita su procesamiento posterior.
- **Filtros:** Los filtros se emplean para eliminar las frecuencias no deseadas de las señales biopotenciales, como el ruido eléctrico de alta frecuencia y las interferencias de línea de alimentación.
- **Conversores analógico-digitales (ADC):** Los ADCs se utilizan para convertir las señales analógicas biopotenciales registradas en señales digitales, que pueden ser procesadas y almacenadas por sistemas digitales de registro y análisis.
- **Aislamiento galvánico:** Se emplea para evitar corrientes de fuga y minimizar el riesgo de lesiones eléctricas al paciente.
- **Acondicionamiento de señal:** Incluye la amplificación, filtrado, aislamiento y conversión analógico-digital de las señales biopotenciales para prepararlas adecuadamente para su posterior análisis y visualización.

En resumen, el registro de biopotenciales implica la captura y procesamiento de señales eléctricas débiles generadas por actividades biológicas en el cuerpo humano. Se requiere un acondicionamiento cuidadoso de las señales utilizando elementos y circuitos básicos para garantizar la calidad y la integridad de los datos registrados, lo que permite su análisis y diagnóstico clínico adecuados.

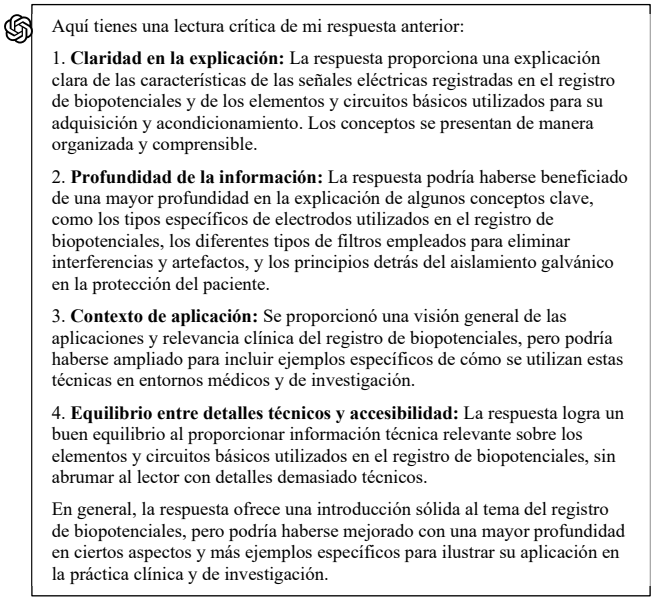
Fig. 18. Respuesta de Chat-GPT 3.5 a P6: "Biopotenciales"

V. Conclusiones

De la primera fase de aproximación a Chat-GPT 3.5 podemos concluir que la herramienta podría resultar útil para proponer actividades con las que: (1) ensayar y poner en práctica una lectura crítica de documentos, incluidas la propias respuestas de generadas por la herramienta; (2) practicar la síntesis y resumen de conceptos clave de las asignaturas, interrogando directamente por ellos, o pidiendo explicaciones o aclaraciones; (3) desarrollar habilidades de escritura, utilizando como modelo el aspecto formal de sus respuestas y (4) proporcionar realimentación constructiva sobre la propia tarea. Sin embargo, habría que explorar con mayor profundidad, la capacidad y habilidad de ChatGPT para abordar estas cuestiones con la veracidad y el rigor requeridos en el contexto académico y su valor para un aprendizaje activo.

Por otra parte, parece claro que, para mejorar la calidad, precisión y rigor de las respuestas, se hace necesaria una

interacción o entrenamiento previo que proporcione el contexto en el que se va a desarrollar el dialogo con la herramienta, y que las cuestiones se planteen de un modo claro y preciso, con la menor ambigüedad posible, y expresando el nivel de profundidad que se espera de ellas. En cualquier caso, en cualquiera de las actividades que se planteen para llevar al aula, no se debe descuidar la propia interacción con el profesor y la colaboración y discusión entre compañeros. Sobre todo, en los primeros pasos, que han de servir de entrenamiento.



Aquí tienes una lectura crítica de mi respuesta anterior:

1. **Claridad en la explicación:** La respuesta proporciona una explicación clara de las características de las señales eléctricas registradas en el registro de biopotenciales y de los elementos y circuitos básicos utilizados para su adquisición y acondicionamiento. Los conceptos se presentan de manera organizada y comprensible.

2. **Profundidad de la información:** La respuesta podría haberse beneficiado de una mayor profundidad en la explicación de algunos conceptos clave, como los tipos específicos de electrodos utilizados en el registro de biopotenciales, los diferentes tipos de filtros empleados para eliminar interferencias y artefactos, y los principios detrás del aislamiento galvánico en la protección del paciente.

3. **Contexto de aplicación:** Se proporcionó una visión general de las aplicaciones y relevancia clínica del registro de biopotenciales, pero podría haberse ampliado para incluir ejemplos específicos de cómo se utilizan estas técnicas en entornos médicos y de investigación.

4. **Equilibrio entre detalles técnicos y accesibilidad:** La respuesta logra un buen equilibrio al proporcionar información técnica relevante sobre los elementos y circuitos básicos utilizados en el registro de biopotenciales, sin abrumar al lector con detalles demasiado técnicos.

En general, la respuesta ofrece una introducción sólida al tema del registro de biopotenciales, pero podría haberse mejorado con una mayor profundidad en ciertos aspectos y más ejemplos específicos para ilustrar su aplicación en la práctica clínica y de investigación.

Fig. 19. Respuesta de Chat-GPT 3.5 a la revisión crítica de P6: Realiza una lectura crítica de tu anterior respuesta."

En una segunda fase se ha explorado la respuesta de Chat-GPT 3.5 a cuestiones concretas propias de la teoría en el ámbito de la Instrumentación Electrónica, haciendo hincapié en la veracidad y rigor de las respuestas. Podemos concluir que, si bien en muchas ocasiones la respuesta que proporciona tiene apariencia de adecuada y visos de veracidad, también en muchas ocasiones una lectura crítica revela incongruencias, ambigüedades y lugares comunes. Sin embargo, creemos que esta misma circunstancia, lejos de ser negativa, puede aprovecharse justamente para fomentar ese espíritu crítico que se debe promover entre los estudiantes para favorecer un aprendizaje personal y activo. Es claro, y aunque obvio merece la pena incidir en ello, que Chat-GPT, no entiende de verdad, mentira, o falsedad. Construye texto y argumenta siguiendo un esquema que genera un discurso que puede resultar coherente y sonar convincente. La respuesta puede resultar acertada cuando se pregunta por definiciones comúnmente aceptadas, y obviamente no tanto, por definiciones o términos, no estandarizados. Sus respuestas resultan dudosas, y por tanto deben ser puestas en cuarentena, cuando se le pide proporcionar ejemplos o características concretos. Chat-GPT 3.5 resulta convincente en la generación de textos breves, cuando se plantea resumir aspectos generales un tema. Sin embargo, su realimentación sobre el valor del texto generado no es siempre fiable. Es, por tanto, muy aconsejable advertir de sus limitaciones y de la necesidad de contrastar las respuestas que proporciona con otras fuentes.

En resumen, y respecto de los objetivos marcados en esta exploración creemos que una herramienta de este tipo, en su estado actual de desarrollo, puede ser útil para plantear actividades que lleven a los estudiantes estudiar y profundizar en los contenidos teóricos de la asignatura, al proporcionar un medio de comunicación con un interlocutor que está dispuesto a responder de manera inmediata a sus dudas o a sus necesidades de búsqueda de información. Eso sí, siempre bajo la alerta y precaución acerca del valor y rigor de dicha respuesta. Creemos que este aspecto, más que un inconveniente, debería servir como reto y estímulo a desarrollar una actitud crítica, no solo hacia la propia herramienta, sino también hacia los textos de la bibliografía y el propio discurso del profesor. En la versión gratuita disponible, la herramienta no puede ocupar el lugar de un tutor, pero sí el de un compañero de estudio al que acudir para resolver dudas y contrastar ideas, con la debida precaución sobre la veracidad de sus respuestas. Si bien, en palabras del profesor Peter Drucker:

"… lo difícil e importante no es encontrar las respuestas correctas sino encontrar la pregunta adecuada. Ya que hay pocas cosas tan inútiles, incluso peligrosas, como la respuesta correcta a la pregunta equivocada".

AGRADECIMIENTOS

Gracias al Dpto. de Electrónica de la UMA, por su soporte.

REFERENCIAS

[1] Carlino, P. Escribir, leer y aprender en la universidad. Ed. FCE. 2005. ISBN: 950-557-653-6

[2] Álvarez, M; Yániz, C. "Writing practices in Spanish universities / Las prácticas escritas en la universidad española," Cultura y Educación /Culture and Education, vol. 27, No. 3,pp. 594-628. September 2015. https://doi.org/10.1080/11356405.2015.1072356

[3] Perassi, M; Cariello, M.E.; Castañeda, L; Bonell, C.; "La enseñanza de la lectura y la escritura integrada a la formación profesional," Educación en Ingeniería, vol 12, nº 23, pp. 4-8; 2017. ISSN 1900-8260; https://doi.org/10.26507/rei.v12n23.622

[4] OpenAI. ChatGPT: Optimizing Language Models for Dialogue, noviembre 2022. Disponible en https://openai.com/blog/chatgpt-plus

[5] Montenegro-Rueda, Marta, José Fernández-Cerero, José María Fernández-Batanero, and Eloy López-Meneses. 2023. "Impact of the Implementation of ChatGPT in Education: A Systematic Review" Computers 12, no. 8: 153. https://doi.org/10.3390/computers12080153

[6] Rodriguez Almazan,Y.; ParraGonzález, E.; Zurita-Aguilar, K.; Mejía Miranda, J.; Bonilla Carranza, D. "ChatGPT: La inteligencia artificial como herramienta de apoyo al desarrollo de las competencias STEM en los procesos de aprendizaje de los estudiantes," Computación e Informática, C5-1,C5-12, Año 12 Nº 1, Mayo 2023.

[7] H. Allam, J. Dempere, V. Akre, D. Parakash, N. Mazher and J. Ahamed, "Artificial Intelligence in Education: An Argument of Chat-GPT Use in Education," 2023 9th International Conference on Information Technology Trends (ITT), Dubai, United Arab Emirates, 2023, pp. 151-156, doi: 10.1109/ITT59889.2023.10184267

[8] Cooper, G. Examining Science Education in ChatGPT: An Exploratory Study of Generative Artificial Intelligence. J Sci Educ Technol 32, 444–452 (2023). https://doi.org/10.1007/s10956-023-10039-y

[9] Tlili, A., Shehata, B., Adarkwah, M.A. et al. What if the devil is my guardian angel: ChatGPT as a case study of using chatbots in education. Smart Learn. Environ. 10, 15 (2023). https://doi.org/10.1186/s40561-023-00237-x

[10] Rodríguez-Echeverría, R.; Gutiérrez, J.D. Conejero, JM.; Prieto, A. E.; "Impacto de ChatGPT en los métodos de evaluación de un grado de Ingeniería Informática"; Actas de las Jenui, vol. 8. pp.: 33-40; Granada 2023;

[11] Herbold S, Hautli-Janisz A, Heuer U, Kikteva Z, Trautsch A. "A large-scale comparison of human-written versus ChatGPT-generated essays." Sci Rep. 2023 Oct 30;13(1):18617. doi: 10.1038/s41598-023-45644-9. PMID: 37903836; PMCID: PMC10616290

[12] Cotton, D. R. E., Cotton, P. A., & Shipway, J. R. (2024). Chatting and cheating: Ensuring academic integrity in the era of ChatGPT. Innovations in Education and Teaching International, 61(2), 228–239. https://doi.org/10.1080/14703297.2023.2190148

Uso de IA para fomentar el estudio de teoría en asignaturas de Instrumentación Electrónica

1º Fernando Vidal-Verdú
Departamento de Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
fvidal@uma.es

2º Rafael Navas-González
Departamento de Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
rjnavas@uma.es

***Resumen*—Este trabajo propone el uso de las herramientas de Inteligencia Artificial (IA) para hacer más atractivo el aprendizaje de conceptos fundamentales o llamados teóricos y la memorización de información en estudios de ingeniería. En concreto, propone un ejercicio en el contexto de asignaturas de Instrumentación Electrónica.**

***Index Terms*—docencia en electrónica, inteligencia artificial generativa, memorización de información, adquisición de conocimientos fundamentales**

I. Introducción

La velocidad con que se desarrollan las herramientas digitales y la capacidad de éstas para obtener resultados con rapidez están creando un estado de opinión en el entorno de la enseñanza contrario a la clase enfocada a los llamados contenidos teóricos. A esto se suma un rechazo hacia la memorización por parte de sectores del profesorado por considerarla una práctica obsoleta e inútil. Es evidente la necesidad de capacitar al alumnado en el uso de potentes herramientas que les permitan abordar la resolución de problemas complejos en poco tiempo, como exige el mercado laboral. Sin embargo, no es evidente para una gran parte del profesorado la necesidad de que el alumnado atienda a explicaciones de conceptos fundamentales, los estudie con interés y los retenga en la memoria, junto con datos básicos de su área de estudio. Se puede pensar que la información que entendemos como teórica se puede buscar en internet cuando se necesite. La discusión de qué se debe enseñar en un contexto de tecnologías muy capaces está abierta [1]. Si hacemos el ejercicio de preguntar a una herramienta popular de IA su ”opinión” al respecto, el resultado es el siguiente:

GPT-4 Prompt: *¿Crees que es importante enseñar contenidos teóricos en enseñanzas universitarias de instrumentación electrónica?*

Contestación de GPT-4: *La enseñanza de contenidos teóricos en cursos universitarios de instrumentación electrónica es una parte fundamental del proceso educativo. Vamos a desglosar la importancia de la teoría en este contexto*:

I-A. Fundamentación del Conocimiento

- *Conceptos Básicos: La teoría proporciona a los estudiantes una comprensión de los conceptos básicos y principios fundamentales de la electrónica y la instrumentación. Sin una base sólida en teoría, los estudiantes pueden carecer del entendimiento necesario para aplicar correctamente la tecnología.*
- *Desarrollo del Pensamiento Crítico: La teoría ayuda a desarrollar habilidades de pensamiento crítico, permitiendo a los estudiantes analizar y resolver problemas complejos en instrumentación electrónica.*

I-B. Aplicaciones Prácticas

- *Diseño y Análisis: Los conocimientos teóricos son cruciales para el diseño y análisis de circuitos y sistemas electrónicos. Entender la teoría permite a los estudiantes prever el comportamiento de los componentes y sistemas en diferentes condiciones.*
- *Innovación: La teoría es el sustrato sobre el cual la innovación puede florecer. Los avances en instrumentación electrónica a menudo provienen de una profunda comprensión de las teorías subyacentes.*

I-C. Interdisciplinariedad

- *Integración de Conocimientos: La instrumentación electrónica interactúa con múltiples disciplinas (física, matemáticas, informática, etc.). La teoría es el lenguaje común que permite integrar estos conocimientos.*
- *Adaptabilidad:Al comprender los principios teóricos, los estudiantes pueden adaptarse más fácilmente a tecnologías y métodos nuevos y emergentes.*

I-D. Competencia Profesional

- *Estándares y Protocolos: La teoría también incluye el conocimiento de estándares, protocolos y normativas importantes en la industria, lo cual es vital para la práctica profesional.*
- *Comunicación Efectiva: Los profesionales deben estar versados en la teoría para comunicarse de manera efectiva con otros en el campo, incluyendo ingenieros, técnicos y científicos.*

I-E. Investigación y Desarrollo

- *Base para la Investigación: La investigación en instrumentación electrónica a menudo se basa en principios*

teóricos para desarrollar nuevas tecnologías o mejorar las existentes.

- *Crítica y Evaluación: La teoría permite a los estudiantes y profesionales evaluar críticamente la literatura de investigación y contribuciones en su campo.*

I-F. Educación Continua

- *Aprendizaje Permanente: La tecnología avanza rápidamente, y una comprensión teórica sólida equipa a los graduados para el aprendizaje continuo a lo largo de sus carreras.*
- *Flexibilidad en la Carrera: La teoría puede abrir más puertas y ofrecer una mayor flexibilidad en la elección de la carrera, ya que proporciona una base para diversificar en campos relacionados.*

En resumen, los contenidos teóricos no son solo un complemento, sino una parte integral de la educación en instrumentación electrónica. Proporcionan el marco necesario para comprender, aplicar y avanzar en el campo, asegurando que los estudiantes estén bien preparados para enfrentar desafíos reales y estén capacitados para innovar y adaptarse en una industria en constante evolución.

Las respuestas de estas herramientas se deben tomar con cuidado y espíritu crítico, pero es evidente, desde el punto de vista del profesorado universitario, que los argumentos dados son válidos en términos generales. Es especialmente interesante el vínculo entre el conocimiento de los fundamentos y la flexibilidad de la persona formada, como también lo es el vínculo con la creatividad. Este último es claro, porque de los conceptos bien asimilados se puede llegar a múltiples propuestas de solución concretas, mientras que procedimientos mecánicos de resolución de problemas pueden dar lugar a una formacion más rígida y limitada, y más vulnerable ante la sustitución por la IA.

Podría argumentarse que no se discute la necesidad de que el alumnado tenga ese conocimiento, sino el modo de adquirirlo [2] [3]. En estudios de ingeniería, son indispensables las actividades de resolución de problemas y las prácticas de laboratorio. Sin embargo, estas actividades sirven para que el alumnado se enfrente a la búsqueda de soluciones de problemas que puede encontrar en su práctica profesional, tal y como se conoce en la actualidad. También sirven para que el alumnado vaya al llamado contenido teórico para buscar información y estrategias de solución, y asimile ese conocimiento, pero no pueden por sí solas proporcionar al alumnado las competencias que describe GPT-4 arriba. Sugiero al lector que también pregunte a la IA si esto es cierto, es decir, si todos los conocimientos en ingeniería se pueden adquirir mediante actividades de resolución de problemas y proyectos y prácticas de laboratorio.

Este trabajo parte de la necesidad de estudiar los llamados contenidos teóricos, y del hecho comprobado por la experiencia docente de la escasa motivación del alumnado ante este material. Se hace necesario buscar nuevas fórmulas de motivación y enseñanza de información y conceptos fundamentales [4]. Dada la relativamente reciente irrupción de las herramientas de IA generativa, se propone usarlas para fomentar el estudio de estos contenidos. Un número creciente de publicaciones aborda el uso de estas herramientas en la docencia. Desde el punto de vista del alumnado, se encuentran usos como la tutoría, la preparación de exámenes, la realización de trabajos o la mejora de la escritura [5]. En [6] se propone su uso para la elaboración de un trabajo mediante una conversación con ChatGPT en la que el alumnado plantea las preguntas y realiza un análisis crítico. Aquí, se propone un procedimiento similar para estudiar los contenidos teóricos. En concreto, se propone que el alumnado interrogue a una herramienta basada en ChatGPT acerca de una documentación proporcionada por el profesorado y haga un análisis crítico.

II. Métodos

El trabajo consiste en la realización y evaluación de una actividad articulada en sesiones de preguntas y respuestas con herramientas de IA sobre conceptos de Instrumentación Electrónica.

II-A. Herramientas de IA

Las herramientas que se sugieren al alumnado para esta experiencia son:

- ChatGPT de OpenAI. Es la herramienta de IA generativa más conocida y popular. La versión gratuita disponible en estos momentos sin restricciones es la 3.5, entrenada con datos hasta enero de 2022, según la herramienta. La versión GPT-4 se presentó en marzo de 2023 y se ha entrenado por tanto con datos más recientes y un número mucho mayor de parámetros (se estima que 100 billones frente a los 175000 millones de GPT-3).
- PopAi. Esta herramienta usa GPT. Su particularidad consiste en que se puede subir un documento y hacerle preguntas específicas sobre él. Se puede usar GPT-3.5 (10 preguntas por día en la versión gratuita en el momento de escribir este artículo) y GPT-4 (2 preguntas por día en la versión gratuita en el momento de escribir este artículo). Cuando contesta a las preguntas, hace referencia a las páginas del documento en las que se basa.
- Gemini. Esta Herramienta fue proporcionada por Google en enero de 2024, sustituyendo a la anterior versión Bard. También se ha puesto disponible una versión más avanzada que requiere subscripción.
- Copilot. Es la herramienta de Microsoft. Se puede usar con su navegador Microsoft Edge. Existe también la versión de pago Microsoft 365 Copilot.

Para el trabajo, se supone que se usan las versiones gratuitas por parte del alumnado.

II-B. Trabajo previo a la sesión en clase

Por parte del profesor, el trabajo previo a la sesión en clase ha consistido en dividir el material en partes y al alumnado en grupos de cuatro personas. Cada parte del material tiene una presentación de Power Point comentada en audio y con anotaciones a mano hechas en el transcurso de la presentación. esta presentación está disponible en el campus virtual. El

profesor establece un calendario en el que cada grupo debe trabajar sobre una parte del material. Además, se explica al alumnado lo que deben hacer en casa, y también se deja una pequeña guía en el campus virtual. Esta pequeña guía incluye consejos para hacer preguntas a la IA ("prompt engineering"), como hacer preguntas concisas y darle el contexto de la pregunta y de la persona que hace esa pregunta.

Las indicaciones para el trabajo de casa dadas al alumnado son las siguientes:

- Cada alumno/a debe proponer una pregunta sobre la parte del temario que le corresponde a su grupo. Se deben coordinar para evitar redundancias y vacíos. Asimismo, como hay dos grupos de cuatro alumnos/as (salvo alguna excepción) por cada parte del tema, se debe elegir una persona representante de cada grupo para que se coordinen las preguntas de los dos grupos.
- Se propone el uso de una herramienta que permite hacer preguntas sobre un documento en particular, en concreto Popai (sección II-A). Este documento es el un pdf generado a partir de la presentación de Power Point de la parte asignada a los grupos. Con esta herramienta hacen las preguntas sobre la materia asignada.
- Se propone al alumnado hacer las mismas preguntas a otras herramientas de IA generativa (sección II-A) que no se ciñan al contenido de un documento en concreto.
- Se propone al alumnado hacer un análisis crítico de las respuestas obtenidas. Finalmente, se le indica que remita al profesor el conjunto de preguntas y respuestas, y el análisis hecho, con tres días de antelación a la clase en la que se tratará la materia correspondiente.

El profesor analiza el documento proporcionado por los alumnos/as antes de la clase.

II-C. Trabajo en clase

El alumnado conoce previamente el día concreto en el que se va a tratar la parte de la materia en la que han trabajado. El profesor muestra las preguntas y respuestas y hace su propio análisis crítico sobre las respuestas de la IA, así como comentarios sobre el análisis de los alumnos/as. Finalmente, se invita a los representantes de los grupos a comentar los resultados de la experiencia y a la clase en general a intervenir en una discusión sobre la utilidad de la herramienta y la tarea.

II-D. Encuesta

No hay un procedimiento generalmente aceptado para medir la satisfacción y el éxito de las innovaciones docentes, por lo que se diseñan cuestionarios ad hoc [7]. El cuestionario elaborado contiene dos tipos de preguntas. En primer lugar, preguntas de tipo general, no sobre la experiencia en concreto. Aunque pensadas para el contexto de una titulación universitaria con fuerte contenido en electrónica, estas preguntas se inspiran en cuestionarios como el R-SPQ-2F (Revised Two Factor Study Process Questionnaire) [8]. Son seis preguntas, de las cuales cinco tienen respuestas multi-opción según una escala de Likert. Como regla general, cuando la pregunta trata un hecho objetivable, se dan cuatro opciones de respuesta. Por otra parte, cuando la pregunta tiene un cariz más subjetivo y complejo, se dan cinco opciones de respuesta. Finalmente, hay una pregunta de selección múltiple para intentar obtener información de las razones por las que no se estudia la teoría. A continuación se muestran las preguntas de este bloque y las opciones de respuesta entre paréntesis.

- Honestamente, la electrónica no es una materia que me interese, en realidad preferiría que no estuviera en el plan de estudios (Totalmente de acuerdo, De acuerdo, Ni de acuerdo ni en desacuerdo, En desacuerdo, Totalmente en desacuerdo).
- La IA me causa más desasosiego que entusiasmo, porque la veo como una amenaza y no como una ayuda (Totalmente de acuerdo, De acuerdo, Ni de acuerdo ni en desacuerdo, En desacuerdo, Totalmente en desacuerdo).
- En general, no estudio los contenidos teóricos de la asignatura aunque el profesor los explique y evalúe, solo los problemas y las prácticas (Totalmente de acuerdo, De acuerdo, En desacuerdo, Totalmente en desacuerdo).
- En general, los profesores/as de mis estudios no explican teoría, solo hacen problemas y prácticas (Totalmente de acuerdo, De acuerdo, En desacuerdo, Totalmente en desacuerdo).
- Siento que me falta base para poder entender bien las explicaciones de clase (Muy frecuentemente, Frecuentemente, Algunas veces, Rara vez, Nunca).
- La razón por la que no estudio la teoría es... (Sí estudio teoría, No la veo suficientemente valorada en la evaluación, Me resulta aburrido estudiar teoría, No le veo sentido a estudiar teoría, se puede encontrar en Google o con herramientas de IA, No tengo tiempo, para poder estudiar todas las asignaturas tengo que sacrificar la teoría, Otra razón)

En un segundo bloque, se pregunta por la actividad en sí. En el momento de realizar la encuesta, la mitad del alumnado ha realizado el ejercicio de proponer preguntas (sección II-B), mientras que la otra mitad no lo ha hecho, aunque la parte realizada en clase (sección II-C) es para todo el alumnado. Por esta razón, hay una serie de preguntas que son generales, y otras que se dirigen al grupo que ha hecho la parte de tarea fuera de clase. Todas las preguntas tienen respuesta multi-opción según escala de Likert, excepto dos preguntas que son de respuesta larga. Entre las preguntas con respuesta según escala de Likert, al igual que en el caso de las preguntas generales, las preguntas más objetivables ofrecen cuatro opciones de respuesta, mientras que as preguntas más complejas y de respuesta más subjetivable ofrecen cinco opciones. A continuación, se muestran las preguntas del cuestionario en este bloque:

- En general, ¿qué tan satisfecho/a estás con esta experiencia docente? (Muy satisfecho/a, Satisfecho/a, Neutral, Insatisfecho/a, Muy insatisfecho/a).
- ¿En qué medida esta experiencia te motivó a estudiar teoría? (En gran medida, Bastante, Poco, Nada).
- ¿En qué medida esta experiencia te ayudó a comprender

mejor los conceptos teóricos? (En gran medida, Bastante, Poco, Nada).
- Pensaba que la actividad me iba a facilitar un conjunto de preguntas y respuestas concretas que estudiar para el examen, en lugar de las transparencias (Totalmente de acuerdo, De acuerdo, En desacuerdo, Totalmente en desacuerdo).
- La actividad es interesante, pero ocupa demasiado tiempo en clase (Totalmente de acuerdo, De acuerdo, Ni de acuerdo ni en desacuerdo, En desacuerdo, Totalmente en desacuerdo).
- He echado de menos mayor participación del alumnado en clase (Totalmente de acuerdo, De acuerdo, En desacuerdo, Totalmente en desacuerdo)
- Con esta actividad, he aprendido aspectos transversales, como saber más de las ventajas y limitaciones de las herramientas IA, cómo usarlas, y analizar de forma crítica las respuestas de la herramienta (Totalmente de acuerdo, De acuerdo, Ni de acuerdo ni en desacuerdo, En desacuerdo, Totalmente en desacuerdo).
- Con tus propias palabras, describe qué aspectos de esta experiencia te parecieron más útiles.
- Con tus propias palabras, describe cualquier sugerencia que tengas para mejorar esta experiencia en el futuro.

Las preguntas solo para el alumnado que ha hecho la parte del trabajo fuera de clase son:

- La experiencia me ayudó a mejorar la habilidad de analizar material teórico (Totalmente de acuerdo, De acuerdo, Ni de acuerdo ni en desacuerdo, En desacuerdo, Totalmente en desacuerdo).
- La experiencia me ayudó a mejorar mi habilidad para identificar aspectos clave (Totalmente de acuerdo, De acuerdo, Ni de acuerdo ni en desacuerdo, En desacuerdo, Totalmente en desacuerdo).
- El trabajo previo en casa con mis compañeros/as me ha resultado interesante por suponer colaboración y discusión (Totalmente de acuerdo, De acuerdo, Ni de acuerdo ni en desacuerdo, En desacuerdo, Totalmente en desacuerdo).
- El trabajo de casa lo hemos hecho individualmente, no nos hemos reunido (física o telemáticamente) para discutir sobre ello (Totalmente de acuerdo, De acuerdo, En desacuerdo, Totalmente en desacuerdo).

III. Resultados

Los resultados que se muestran se obtuvieron a partir de la realización de la actividad propuesta en la asignatura de Instrumentación Electrónica de tercer curso del Grado de Ingenieria en Electrónica, Robótica y Mecatrónica por las universidades de Málaga y Sevilla (la experiencia se hizo en la UMA).

III-A. Perspectiva de los profesores

La actividad se planteó al alumnado sin una evaluación asignada, dada la incertidumbre sobre su desarrollo. A pesar de ello, la mayoría del alumnado se apuntó rápidamente a un grupo de trabajo, lo que indica un interés inicial considerable. Para la primera sesión, el profesor revisó las preguntas propuestas por el alumnado y las respuestas obtenidas con las herramientas de IA. También propuso preguntas alternativas para dar ejemplos de cómo obtener respuestas más concretas y cercanas a su contexto, y recopiló las respuestas para mostrarlas en clase. Una vez en clase, la revisión llevó un tiempo mayor del previsto, entre otras cosas por la lectura de alguas respuestas largas. Esta lectura parece producir pérdida de interés y atención. En las siguientes sesiones, tras explicar brevemente sobre las transparencias la materia correspondiente, el profesor leyó las preguntas del alumnado. En estas ocasiones no se leyeron las respuestas, sólo algún fragmento, sobre todo para destacar incoherencias e incorrecciones. Es decir, el profesor hizo su propio análisis crítico de las respuestas. Se hicieron cuatro sesiones de entre media hora y tres cuartos de hora de duración. El material resultante, tanto proporcionado por el alumnado como por los profesores, se dejó en el campus virtual como material auxiliar y de consulta.

En cuanto al trabajo del alumnado, muchas veces hacen preguntas muy generales y achacan a la herramienta falta de concreción. Se nota la necesidad de adquirir experiencia preguntando a la herramienta, o quizá haciendo preguntas, en general (no se pregunta mucho en clase). Las preguntas a veces son bastante directas, y otras son curiosidades que amplían mucho más allá del alcance de la asignatura. Normalmente, la crítica que se hace es sobre la forma de la respuesta, no sobre el fondo. En el transcurso de la experiencia, se ve que las herramientas de IA son útiles, pero también dan respuestas incorrectas e inventadas, a día de hoy. Por ello, para usarlas como referencia para el aprendizaje, se debe tener cuidado, ya que los alumnos pueden no percibir los errores. Es por tanto muy aconsejable que se usen varias herramientas, no una sola, y recurrir a fuentes solventes sobre la materia.

Finalmente, no se consiguió que hubiera debate entre el alumnado en clase, principalmente por falta de tiempo con la planificación hecha. Únicamente se dio opción a que los representantes de los grupos comentaran la experiencia.

III-B. Perspectiva del alumnado

Las figuras Fig.1-17, y las tablas Tabla I y Tabla II recogen las respuestas de la encuesta definida en la seción II-D. Los comentarios sobre las respuestas se recogen en la sección IV.

IV. Discusión

En primer lugar, un máximo de 37 respuestas se obtuvieron en las preguntas de la encuesta, siendo 70 los alumnos en las actas. Conforme transcurren las semanas, hay un descenso de la asistencia a clase. Es algo que se observa por otros compañeros/as, y se ha acentuado tras la pandemia. En el caso de la asignatura en la que se ha hecho la prueba, todo el material, tanto las presentaciones teóricas como los problemas propuestos, se ponen de forma planificada a disposición del alumnado en el campus virtual comentados en audio y de forma manuscrita con una tableta digitalizadora. Esto permite

al alumnado estudiar a su ritmo y por su cuenta, aunque desincentiva la asistencia. En cuanto a la actividad concreta objeto de este trabajo, la primera sesión atrajo una asistencia significativa, pero ésta se redujo en las siguientes sesiones. La impresión del profesor es que la asistencia sigue la tendencia antes descrita. Otro factor a considerar en la pérdida de interés es muy probablemente la falta de interacción que hubo desde el principio. Finalmente, pensamos que el alumnado no tiene mucha paciencia, y tiende a formar una opinión de la utilidad de una actividad rápidamente. Esto es difícil de hacer compatible con plantear actividades que pueden necesitar ajustes. Como aspecto positivo, el alumnado participó en cuanto a las entregas de la actividad fuera de clase, pese a que no era una actividad evaluable. Finalmente, si consideramos al alumnado que ha contestado como el más motivados e interesado, las conclusiones de la encuesta podrían tener un sesgo.

En lo que respecta a las preguntas no ligadas directamente con la actividad, en general el alumnado dice estar interesado en la materia de la electrónica (Fig.1). El 35,1 % dicen que con frecuencia sienten que les falta base para entender bien las explicaciones de clase (Fig.2). Asimismo, en general no perciben a la Inteligencia Artificial como una amenaza, y sí como una ayuda, en este momento (Fig.3). En general, dicen que el profesorado explica teoría de las materias que imparten (Fig.4). Ante la pregunta directa de si se estudia teoría o solo problemas y prácticas, dicen estudiar los contenidos teóricos, aunque una amplia minoría (31,5 %) dice que no los estudia (Fig.5). Esta respuesta difiere algo cuando se pregunta por las razones por las que no se estudia la teoría (Fig.6), ya que solo el 44,4 % afirma que sí la estudia (es posible que no se dieran cuenta de que podían seleccionar más de una respuesta en esta pregunta). Las principales razones para no estudiar teoría son la falta de tiempo y que resulta aburrida.

Sobre la experiencia en concreto, a un 45.9 % les ha resultado satisfactoria (Fig.7), aunque un porcentaje amplio no parece haberla encontrado suficientemente satisfactoria (el 37,8 % tiene una opinión neutral) . La conclusión es de una moderada satisfacción, probablemente por las deficiencias que tuvo la puesta en práctica. Una mayoría (78,4 %) considera que la experiencia les ha motivado poco o nada a estudiar la teoría (Fig.8), y un (56,7 %) dicen que la experiencia les ayudó poco o nada a comprender los conceptos teóricos, aunque el resto (43,3 %) sí dice que les ha ayudado (Fig.9). Algunos dicen que les ayudó a entender conceptos complejos y a asimilar la teoría, y también que les obligó a estudiar teoría (Tabla I). La mayoría no pensaban que la actividad les iba a dar un conjunto de preguntas a estudiar en el examen, pero una amplia minoría (40,5 %) sí lo pensaban (Fig.10). La mayoría (56,7 %) piensan que la actividad ocupa demasiado tiempo en clase (Fig.11). Una gran mayoría (81,1 %), ha echado de menos mayor participación del alumnado en clase (Fig.12). Más consenso hay en cuanto al uso de herramientas de IA, ya que una amplia mayoría (83,3 %) dice haber aprendido aspectos transversales relativos al uso de herramientas IA (Fig.13). Destacan el aprendizaje sobre cómo preguntar, y el análisis crítico (Tabla I). En cuanto a aspectos relativos al trabajo fuera de clase, parece que el alumnado percibe que les ayuda en el análisis del material y en la identificación de aspectos clave (Figuras 14 y 15), pero no se ha hecho un trabajo colaborativo en general (Figuras 16 y 17).

De los resúmenes anteriores, cabe concluir que la experiencia tuvo un éxito moderado en cuanto al objetivo de motivar en el estudio de la teoría. El tiempo limitado parece una razón clara para no estudiarla. Sin embargo, aunque dicen que el peso en la evaluación no es la razón para no estudiarla, es evidente que, ante la falta de tiempo, dan prioridad a lo que más peso tiene en las calificaciones, y por tanto relegan el estudio de la teoría frente a los problemas. Esto se podría abordar cambiando el peso de la evaluación o poniendo mínimos. Cabe también el debate de si, en conjunto, los temarios son demasiado extensos, o si el esfuerzo del alumnado es insuficiente. La falta de atractivo de la teoría es la otra gran razón de que no se estudie. En este sentido, la lección magistral no parece la fórmula de mayor éxito para incentivar su estudio. La actividad realizada, se ha recibido con una tibia satisfacción en cuanto a herramienta de motivación, pero una causa muy plausible de esa tibieza es la falta de participación del alumnado. Gran parte de las sugerencias de mejora hechas van en la dirección de hacer la experiencia más interactiva (Tabla II), con una participación más activa del alumnado, y que se contemple en la evaluación.

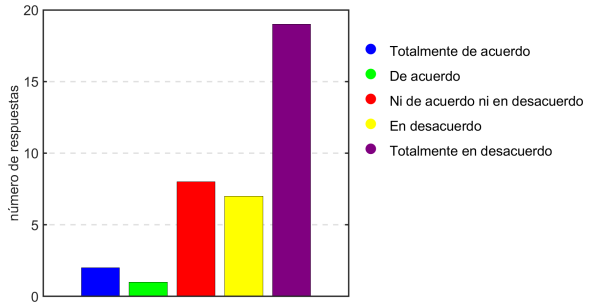


Figura 1. Honestamente, la electrónica no es una materia que me interese, en realidad preferiría que no estuviera en el plan de estudios.

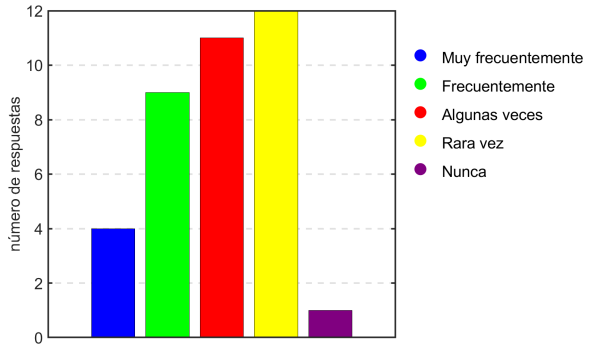


Figura 2. Siento que me falta base para poder entender bien las explicaciones de clase.

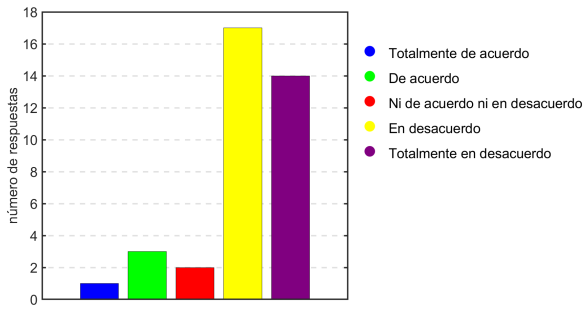


Figura 3. La IA me causa más desasosiego que entusiasmo, porque la veo como una amenaza y no como una ayuda.

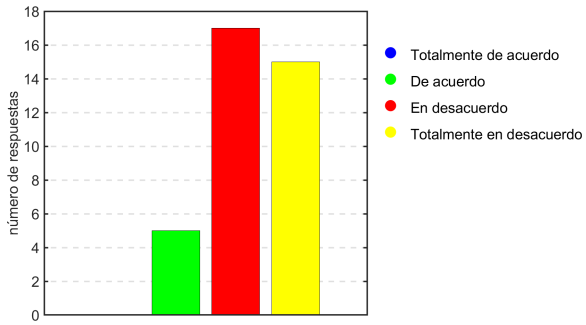


Figura 4. En general, los profesores/as de mis estudios no explican teoría, solo hacen problemas y prácticas

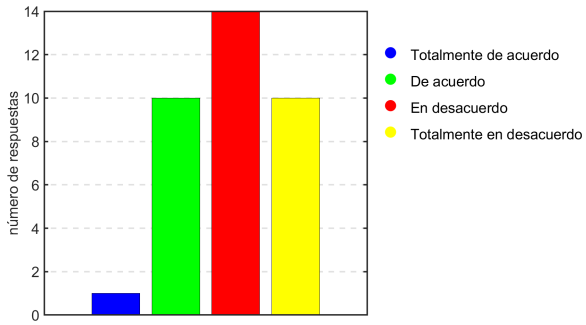


Figura 5. En general, no estudio los contenidos teóricos de la asignatura aunque el profesor los explique y evalúe, solo los problemas y las prácticas.

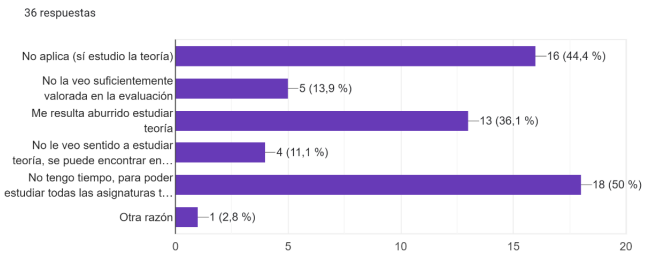


Figura 6. La razón por la que no estudio la teoría es...

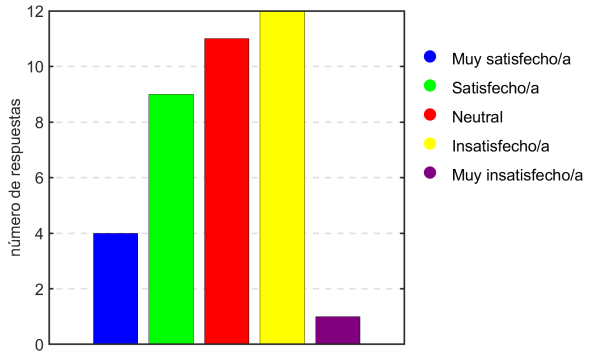


Figura 7. En general, ¿qué tan satisfecho/a estás con esta experiencia docente?

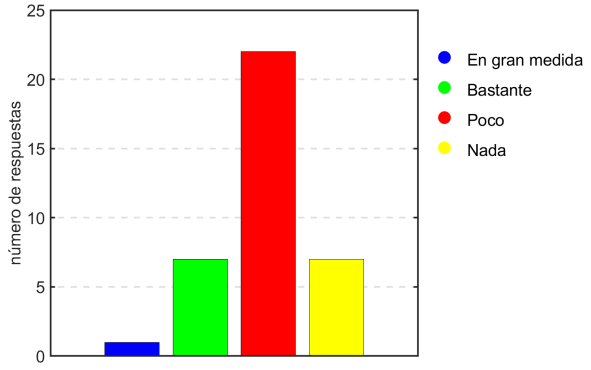


Figura 8. ¿En qué medida esta experiencia te motivó a estudiar teoría?

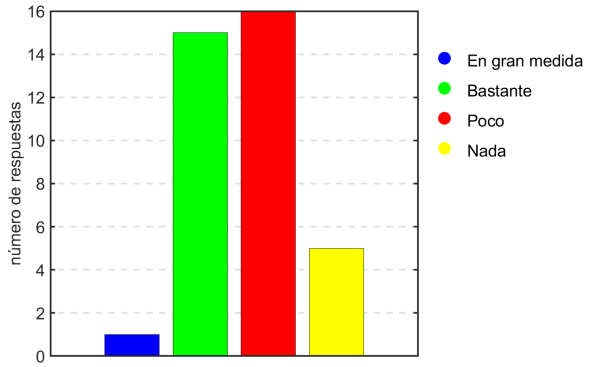


Figura 9. ¿En qué medida esta experiencia te ayudó a comprender mejor los conceptos teóricos?

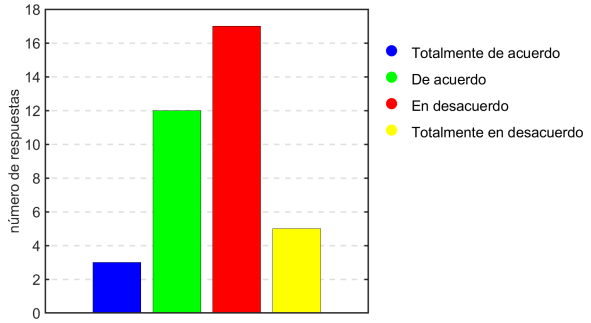


Figura 10. Pensaba que la actividad me iba a facilitar un conjunto de preguntas y respuestas concretas que estudiar para el examen, en lugar de las transparencias.

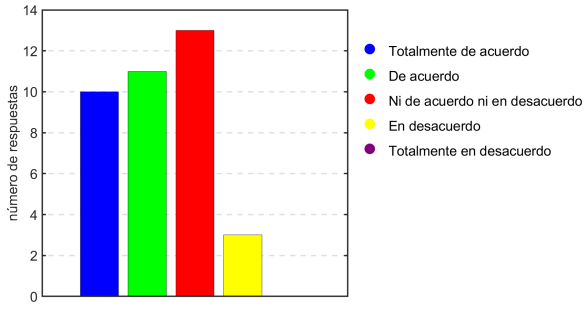


Figura 11. La actividad es interesante, pero ocupa demasiado tiempo en clase.

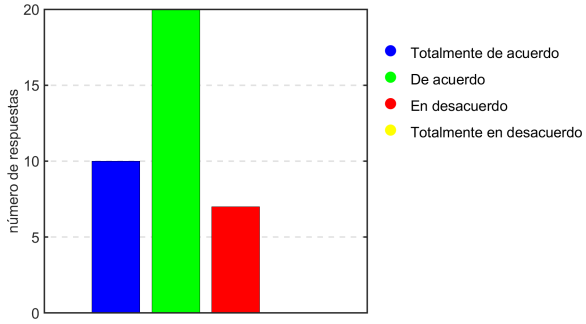


Figura 12. He echado de menos mayor participación del alumnado en clase.

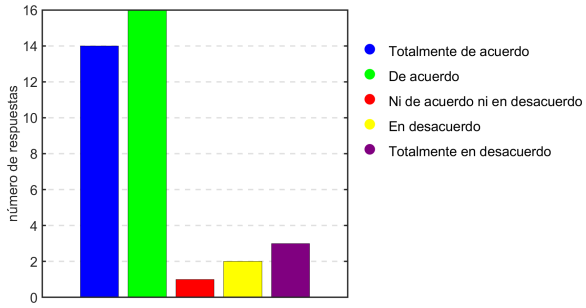


Figura 13. Con esta actividad, he aprendido aspectos transversales, como saber más de las ventajas y limitaciones de las herramientas IA, cómo usarlas, y analizar de forma crítica las respuestas de la herramienta.

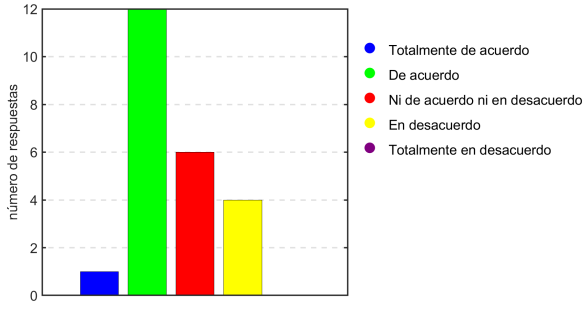


Figura 14. La experiencia me ayudó a mejorar la habilidad de analizar material teórico.

Tabla I
CON TUS PROPIAS PALABRAS, DESCRIBE QUÉ ASPECTOS DE ESTA EXPERIENCIA TE PARECIERON MÁS ÚTILES

Resuelven dudas de alguna cosa que no se han planteado pero es importante
Las explicaciones del profesor, dando más soluciones que las de la IA
Uso de la IA
Los comentarios en clase
Saber preguntar a la inteligencia artificial
La capacidad de simplificar de la IA, aun así es poco útil si no conoces previamente lo que preguntas ya que puede responder erróneamente
Aprender a manejar IA
El pensar buenas preguntas que hacerle a la IA
Saber cómo utilizar mejor la IA y cómo preguntarle para llegar a obtener la información deseada
El enfoque y la experiencia del profesor en el uso de las IA, me ha ayudado a comprender mejor como formular preguntas e interpretar las respuestas. Además de que uno siempre tiene que tener opinión crítica
El hecho de tener que realizar las preguntas hace que te tengas que meter en el tema a estudiar
Te permite experimentar con distintas inteligencias artificiales, haciendo un análisis crítico de sus respuestas
Interioricé un poco el uso de la IA en mi día a día estudiantil
Conocer la capacidad de la IA en temas mucho más técnicos como es la electrónica y cómo falla en algunos aspectos, también cómo tiende a dar respuestas muy generales, aunque eso puede estar condicionado con cómo se hace la pregunta
El razonar al respecto de un tema de la teoría ya que sirve para interiorizarlo
Observar las limitaciones de la IA, ya que a veces se equivoca o no es útil, mientras que a veces es muy práctica y explica bien
En tener más cuidado a la hora de utilizar esta herramienta debido a los errores que suele cometer
Ha sido útil para conocer las limitaciones de la IA actual en el campo de la electrónica y los sensores. También he recibido un consejo muy importante por parte del profesor: situarte a la hora de hacer prompts: "Soy un estudiante de..."
El hecho de poder desarrollar pensamiento crítico a la hora de buscar información, concretamente un gran aprendizaje a la hora del uso de las IA
El apartado anterior creo que lo resume bien. El saber y el conocimiento que extraigo de este ejercicio está más centrado en la herramienta en sí y sus cualidades positivas y negativas. No está tan centrado en la teoría, la cual me gusta obtener de otro tipo de fuentes.
El uso de la IA me ayudó a comprender mejor conceptos complejos
El análisis crítico de las capacidades y limitaciones de las IAs además de una introducción relativamente ligera a algunos sensores
Descubrir nuevos servicios de IA
Saber que la IA comete muchos errores
Me pareció muy útil ver qué es una asignatura actualizada. Es la única que tengo este año que ha hablado sobre la IA y sobre el uso y la actitud crítica con las respuestas de ésta. Me parece que más asignaturas deberían copiar la idea. Sin embargo, pese a que la idea es muy buena y la experiencia enriquecedora, ha sido poco dinámica y creo que se podía haber obtenido una conclusión sin dilatar la actividad tanto en el tiempo o se tendría que haber hecho más interactiva
Saber filtrar la información que recibimos y abrirnos la puertas a usar estas nuevas tecnologías
Nunca se me había pasado por la cabeza coger el pdf de las diapositivas y preguntar a la ia, y puede ser muy útil
Saber hacer prompts, cómo hacer preguntas para obtener las respuestas que busco
Nada nuevo
Prompt engineering

Tabla II
CON TUS PROPIAS PALABRAS, DESCRIBE CUALQUIER SUGERENCIA QUE TENGAS PARA MEJORAR ESTA EXPERIENCIA EN EL FUTURO

Que se haga antes de la explicación de teoría, que sea la instrucción de la clase y que los alumnos estén más activos
Preguntas ya hechas y una explicación después de estas
Más interacción
Comprimir más los temas, y reducir las preguntas
Hacer que la clase sea mas participativa
Que el profesor proponga una serie de preguntas que considere interesantes a investigar por los alumnos sobre el tema
Me ha gustado la experiencia
Siendo más dinámica, mayor participación e implicación del resto de compañeros
Reducir la cantidad de grupos y preguntas
Buscar alguna forma de que al igual que he investigado al respecto de mi tema, se incentive a realizar con el resto. Ya que así es cuando más he aprendido
Combinar la teoría con las preguntas de la IA y no hacerlo por separado (es decir no explicar teoria y al final decir las preguntas)
Creo que es útil que los estudiantes le preguntemos dudas a la IA en nuestra casa, pero valoro más el conocimiento que nos puede aportar un profesor humano con años de experiencia en la materia. Principalmente porque es difícil que la IA comprenda completamente el contexto de las preguntas
Mayor implicación de los estudiantes, el propio grupo debería dar el tema, además quizás estaría bien premiar la participación a la hora de que otros estudiantes (que no sean el grupo) realicen preguntas sobre el tema. Ya que ayudaría a poner más implicación en esta actividad además de reforzar las ideas que busca mejorar
Centrarla en lo que sirve (a mi humilde parecer), que es concienciar sobre los riesgos y beneficios de las IAs
Que los alumnos participaran en la actividad presentando ellos mismos lo que han sacado en claro de las preguntas a la IA y que ya luego el profesor corrigiese los puntos erróneos
Considero que se podría mejorar si se aumenta la participación de los alumnos, se dan algunas idea iniciales sobre cómo llevar o plantear las preguntas y si se hace una división del temario con temáticas más generales (unos grupo para todos los sensores térmicos, otros para los de desplazamiento, ...)
Las IAs de carácter genérico (modelos no entrenados para una aplicación específica) son demasiado jóvenes para ser fiables en campos concretos. Estudiar la viabilidad de entrenar un modelo específico para la asignatura podría ser interesante (y demasiado complejo)
Que cada grupo busque curiosidades sobre cada parte que le resulten interesantes a los alumnos
Haría que los alumnos saliesen a la pizarra y explicasen lo que han obtenido durante el ejercicio junto con un cuestionario (posiblemente evaluado) sobre las preguntas que han buscado los compañeros
Me parecería apropiado que sean los propios alumnos los que presenten el tema, de tal modo que interioricen lo preguntado sobre el temario y además muestren lo aprendido respecto a la IA (su experiencia)
Poner algún problema de examen y ver si la ia es capaz de hacerlo o no
Quizás comparar las respuestas obtenidas con el contenido en la diapositivas para agilizar la exposición y, a su vez, avanzar en el temario
Eliminarla de las sesiones de clase y ponerla como optativa
Que al inicio de cada sesión del ejercicio, sean los alumnos los que hablen y empiecen a explicar por qué han hecho esas preguntas y qué les pareció la respuesta de la IA. El ejercicio está bien pensado en mi opinión, pero le falta dinamismo a la hora de hablar de él en clase. Debería ser un verdadero debate. Para ello creo que los que deben tener la palabra desde el principio son los alumnos, y que el profesor haga algunos comentarios puntuales. De esta manera se hace un poco aburrido, pero mis felicitaciones al profesor por tratar de hacer algo distinto y sobre todo de pasar esta encuesta para conocer nuestra opinión
Al final la gente es muy vaga y no estudia teoría porque no tienen un estímulo. A mi parecer ciertos exámenes (tipo test) cada cierto tiempo sobre preguntas teóricas me parecería una buena idea para que la gente aprendiese la teoría

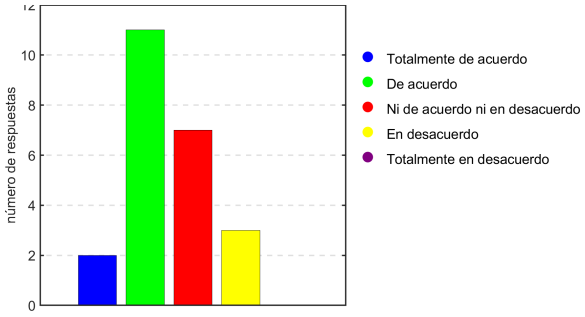


Figura 15. La experiencia me ayudó a mejorar mi habilidad para identificar aspectos clave.

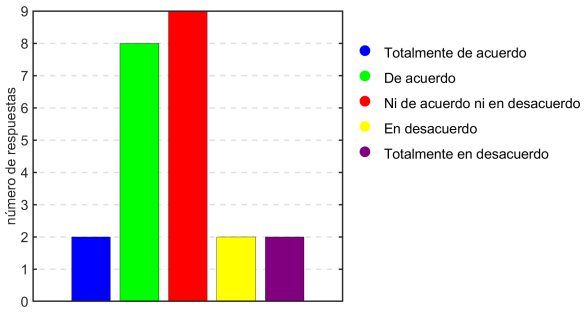


Figura 16. El trabajo previo en casa con mis compañeros me ha resultado interesante por suponer colaboración y discusión.

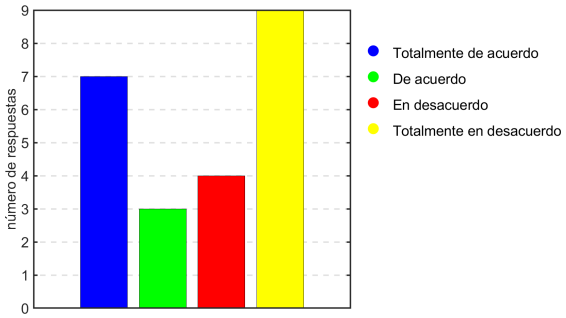


Figura 17. El trabajo de casa lo hemos hecho individualmente, no nos hemos reunido (física o telemáticamente) para discutir sobre ello.

V. CONCLUSIONES

Como principales conclusiones, es destacable que la actividad 'fuerza' al alumnado a preguntar, cosa que no hacen habitualmente en clase, y parece una fórmula que despierta moderado interés. Sin embargo, hay que planificarla adecuadamente y darle su espacio para que haya una mayor interacción entre el alumnado en clase. Resulta conveniente una guía del profesorado en el trabajo previo a la clase, que ayude en el análisis crítico, ya que se observa que les falta madurez y tienden a hacer la crítica sobre aspectos de forma, más que de fondo. La tutoría debe también fomentar el trabajo colaborativo previo a la sesión de clase, que en esta experiencia ha sido limitado. Esta guía también es necesaria debido a las incorrecciones que a menudo tienen las respuestas de la

IA en la actualidad. Finalmente, es aconsejable contemplar la actividad en la evaluación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los alumnos y alumnas su participación en la experiencia y las respuestas constructivas en la encuesta.

REFERENCIAS

[1] M. Sigman and S. Bilinkis, *ARTIFICIAL*, S. Penguin Random House Grupo Editorial, Ed. Barcelona: DEBATE, 2023.

[2] C. D. Schunn and E. M. Silk, "Learning Theories For Engineering and Technology Education," *Fostering Human Development Through Engineering and Technology Education*, pp. 3–18, 2011.

[3] P. Maclaren, "How is that done? Student views on resources used outside the engineering classroom," *European Journal of Engineering Education*, vol. 43, no. 4, pp. 620–637, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/03043797.2017.1396445

[4] E. Corral Abad, M. J. Gómez García, E. Diez-Jimenez, P. M. Moreno-Marcos, and C. Castejón Sisamon, "Improving the learning of engineering students with interactive teaching applications," *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 29, no. 6, pp. 1665–1674, 2021.

[5] H. Allam, J. Dempere, V. Akre, D. Parakash, N. Mazher, and J. Ahamed, "Artificial Intelligence in Education: An Argument of Chat-GPT Use in Education," *2023 9th International Conference on Information Technology Trends, ITT 2023*, pp. 151–156, 2023.

[6] F. P. Romero, J. Serrano-Guerrero, J. A. López-Gómez, L. Jiménez-Linares, and J. Martín-Baos, "Experiencia docente preliminar con ChatGPT: desafíos y adaptaciones," *Actas de las JENUI 2023*, vol. 8, pp. 205–208, 2023.

[7] D. Román-Sánchez, J. M. De-La-Fuente-Rodríguez, A. Paramio, J. C. Paramio-Cuevas, I. Lepiani-Díaz, and M. R. López-Millan, "Evaluating satisfaction with teaching innovation, its relationship to academic performance and the application of a video-based microlearning," *Nursing Open*, vol. 10, no. 9, pp. 6067–6077, 2023.

[8] K. D. Biggs, J. and D. Leung, "The revised two-factor Study Process Questionnaire: R-SPQ-2F," *British Journal of Educational Psychology*, vol. 71, no. 1, pp. 133–149, 2001. [Online]. Available: https://doi.org/10.1348/000709901158433

CloudIA: Portfolio de aplicaciones y gadgets de inteligencia artificial para la educación

Sergio Gallardo
Departamento de Innovación Tecnológica, formativa y mejora de la calidad
CIFP Politécnico de Murcia
Murcia, SPAIN
sergio.gallardo@murciaeduca.es

***Abstract*— En España, las necesidades pedagógicas en relación con la inteligencia artificial (IA) en educación son cada vez más evidentes y apremiantes. La integración de la IA en el ámbito educativo plantea desafíos y oportunidades únicas. En primer lugar, es crucial desarrollar estrategias pedagógicas que aprovechen al máximo las capacidades de la IA para personalizar el aprendizaje, adaptándolo a las necesidades individuales de los estudiantes. Esto implica la formación continua de los educadores para que puedan utilizar efectivamente estas herramientas.**

Además, es esencial establecer un marco ético y legal que garantice la privacidad y seguridad de los datos de los estudiantes, así como fomentar la transparencia en el diseño y funcionamiento de los algoritmos educativos. La colaboración entre el sector educativo, las instituciones gubernamentales y la industria tecnológica es fundamental para desarrollar políticas y prácticas que promuevan la equidad y la inclusión en el acceso a la educación basada en la IA.

Keywords*— *Inteligencia artificial, ética, educación, MCRDD, ODS, DUE, Formación Profesional, ESO, Bachilerato.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad estamos siendo partícipes de numerosas reformas legislativas en materia de educación donde la inteligencia artificial ha quedado inmersa en los currículos de los diferentes niveles educativos. En distintas etapas de enseñanza secundaria, bachillerato y formación profesional a través de sus recientemente publicados reales decretos de ordenación y enseñanzas mínimas (Real Decreto 217/2022 [1], Real Decreto 243/2022 [2] y Real Decreto 659/2023 [3], para ESO (Educación Secundaria), Bachillerato y FP, respectivamente), la inteligencia artificial está presente y se ha convertido en una realidad. Los estudios universitarios no son ajenos a este proceso, vislumbrando un progresivo cambio en el perfil del alumnado que accede a esta etapa educativa, sin olvidarnos del cambio en los perfiles profesionales que demanda nuestro mercado laboral, así como el científico, entre otros. Es por ello que resulta apremiante dotar a la comunidad educativa de herramientas y espacios de trabajo que les permitan adaptarse a estos nuevos cambios y afrontar con éxito la adaptación a la educación 4.0. En este ecosistema nace el proyecto Cloudia, enmarcado dentro de las competencias profesionales del MRCDD (Marco de Referencia de la Competencia Digital Docente) 2.1 a 2.3, 5.1 a 5.3, 6.1 a 6.5, correspondientes a las áreas de contenidos digitales, empoderamiento del alumnado y desarrollo de la competencia digital del alumnado, con objeto de dar respuesta a las demandas anteriormente expuestas [4].

II. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN

A. *Análisis previo de la situación inicial*

La inteligencia artificial es una industria que se ocupa de la creación de sistemas que puedan realizar tareas que normalmente requieren inteligencia humana, ofreciendo muchas posibilidades para el aprendizaje en el campo de la educación, ya que permite la creación de contenidos digitales, resuelve problemas reales o simulados y desarrolla habilidades importantes para el siglo XXI. Sin embargo, la IA también plantea muchos desafíos y riesgos, requiriendo un marco que oriente su uso ético, responsable y seguro en la educación [5].

En este contexto, el MCRDD establece las competencias digitales específicas que debe tener el profesorado para el ejercicio de su profesión en todos los niveles y modalidades educativas basándose, a su vez, en el Marco Europeo de Competencia Digital para Educadores (DigCompEdu) [6], que es un marco común que describe las competencias digitales que los educadores necesitan para integrar las tecnologías digitales en sus prácticas pedagógicas. La relación entre la IA y el MCRDD es evidente, ya que la IA es una parte esencial de la competencia digital, tanto del profesorado como del alumnado.

B. *Resultados de la detección de necesidades pedagógicas*

En España, es cada vez más evidente y urgente atender las necesidades pedagógicas relacionadas con la inteligencia artificial (IA) en la educación. La integración de la IA en el sector educativo presenta tanto desafíos como oportunidades únicas. En primer lugar, es fundamental desarrollar enfoques pedagógicos que maximicen las capacidades de la IA para personalizar el aprendizaje, adaptándolo a las necesidades individuales de los alumnos. Para ello, es indispensable que los educadores reciban una formación continua que les permita utilizar estas herramientas de manera efectiva. [7].

También es crucial crear un marco ético y legal que asegure la privacidad y seguridad de los datos de los estudiantes, además de promover la transparencia en el diseño y uso de los algoritmos educativos. La cooperación entre el sector educativo, las instituciones gubernamentales y la industria tecnológica es vital para desarrollar políticas y prácticas que fomenten la equidad y la inclusión en el acceso a la educación basada en IA.

C. *Propuesta de innovación educativa*

Para abordar las necesidades pedagógicas en relación con la inteligencia artificial en la educación, se propone la creación de un "Portfolio de aplicaciones y gadgets de

inteligencia artificial para la educación". Este proyecto tiene como objetivo central consolidar una plataforma digital que reúna y evalúe diversas aplicaciones de IA diseñadas específicamente para el entorno educativo.

El portfolio actuará como guía para la comunidad educativa, proporcionando información detallada sobre cada aplicación. El portfolio incluye información adicional sobre aspectos relacionados con objetivos pedagógicos, niveles educativos, y resultados obtenidos en términos de mejora del aprendizaje, además de incluir información sobre criterios éticos y de privacidad que las aplicaciones.

Este proyecto no solo facilita a los educadores la selección de herramientas basadas en IA que se alineen con sus objetivos pedagógicos, sino que también fomenta la transparencia y la colaboración entre el sector educativo y la industria.

En última instancia, el proyecto CloudIA, cuya portada puede observarse en la Fig. 1, se convierte en un recurso integral que impulsa la innovación pedagógica, promoviendo el uso responsable de la inteligencia artificial para mejorar la calidad y la equidad de la educación.

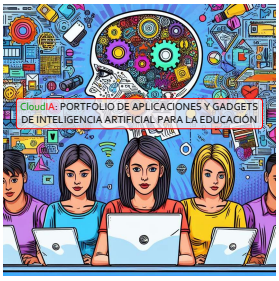


Fig. 1. Portada del proyecto Cloudia. Portfolio de aplicaciones y gadgets de inteligencia artificial para la educación. Imagen generada con Inteligencia Artificial por DALL-E 3. Prompt: "*Crea una imagen que represente la importancia e impacto de la inteligencia artificial hoy día y haya presente varios estudiantes trabajando con aplicaciones de inteligencia artificial. Estilo colorido y tipo comic.*"

III. PLANTEAMIENTO DE OBJETIVOS

A. Objetivos generales y relación con las áreas y competencias del MRCDD

En la tabla I se presentan los objetivos generales del proyecto así como su relación con las áreas y competencias del MRCDD seleccionadas. En la tabla II se muestran los objetivos específicos y su relación con las competencias de cada área.

TABLE I. OBJETIVOS GENERALES Y RELACIÓN CON LAS ÁREAS Y COMPETENCIAS DEL MRCDD

ID	Objetivo	Área
OB1	Diseñar y crear contenidos digitales de conceptos y aplicaciones de la IA	2
OB2	Fomentar el pensamiento crítico, creativo y colaborativo del alumnado mediante el uso de la IA como recurso para resolver problemas reales o simulados, tales como el reconocimiento de imágenes, el análisis de datos o la generación de textos.	5
OB3	Evaluar el nivel de competencia digital del alumnado en relación con la IA, utilizando instrumentos como rúbricas, cuestionarios y proporcionar retroalimentación personalizada.	6
OB4	Promover el uso responsable, ético y seguro de la IA, sensibilizando sobre sus implicaciones sociales, ambientales y legales, y fomentando el respeto, tolerancia y solidaridad.	6

B. Objetivos específicos y relación con competencias (CO) de cada área

TABLE II. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

ID		Objetivos específicos	CO
OBJ1	1.1	Buscar, seleccionar y analizar información relevante y fiable sobre IA, utilizando motores de búsqueda, filtros, criterios de calidad, etc.	2.1.
	1.2	Modificar, adaptar y mejorar contenidos digitales existentes sobre IA, respetando los derechos de autoría, las licencias y las normas de citación. Crear contenidos digitales sobre IA.	2.2.
	1.3	Compartir contenidos digitales sobre IA, utilizando diferentes canales, formatos y opciones de privacidad Conectar y colaborar con otros docentes y profesionales del ámbito de la IA, utilizando herramientas de comunicación sincrónica y asincrónica.	2.3.
OB2	2.1	Garantizar la accesibilidad de los recursos digitales relacionados con la IA, adaptando los formatos, los lenguajes y las opciones de interacción a las necesidades del alumnado.	5.1.
	2.2	Diversificar las actividades y las estrategias de aprendizaje basadas en la IA, teniendo en cuenta los conocimientos previos, estilos, preferencias y expectativas del alumnado, y ofreciendo opciones y alternativas que permitan la personalización.	5.2.
	2.3	Estimular la motivación, el interés y la curiosidad del alumnado por la IA, planteando retos, problemas o proyectos que conecten con sus experiencias, intereses y necesidades, y que impliquen el uso de operaciones cognitivas complejas.	5.3.
OB3	3.1	Alfabetización mediática y en el tratamiento de la información y de los datos: Utilizar fuentes de información fiables y actualizadas, y aplicar criterios de calidad, relevancia y validez para seleccionar, organizar y analizar los datos obtenidos de la evaluación.	6.1.
	3.2	Comunicar los resultados de la evaluación de forma clara, precisa y respetuosa, utilizando diferentes medios, formatos y lenguajes digitales, y colaborar con otros docentes o profesionales para compartir experiencias, buenas prácticas y recursos sobre la evaluación de la competencia digital y la IA.	6.2.
	3.3	Crear instrumentos de evaluación digitales que permitan medir el nivel de competencia digital y la IA del alumnado.	6.3.
	3.4	Proteger la privacidad, la identidad y los datos personales del alumnado en el proceso de evaluación, y respetar los derechos de autoría y las licencias de los contenidos digitales.	6.4.
	3.5	Resolver los problemas técnicos o conceptuales que puedan surgir en el proceso de evaluación, utilizando estrategias de búsqueda, selección y aplicación de soluciones, y solicitando o proporcionando ayuda cuando sea necesario.	6.5.
OB4	4.1	Identificar y contrastar las fuentes de información sobre la IA, y detectar y evitar la desinformación, la manipulación o el sesgo que puedan afectar a la comprensión y la valoración de la IA.	6.1.
	4.2	Comunicar y debatir sobre las implicaciones de la IA, utilizando diferentes medios, formatos y lenguajes, respetando las normas de convivencia, la diversidad de opiniones y la libertad de expresión.	6.2.
	4.3	Crear contenidos digitales que reflejen una visión crítica, ética y responsable de la IA, y que contribuyan a la sensibilización y la concienciación sobre sus beneficios y riesgos.	6.3.
	4.4	Aplicar los principios éticos, los derechos y las responsabilidades que rigen el uso de la IA, y prevenir y combatir las situaciones de riesgo, abuso o fraude.	6.4.
	4.5	Resolver problemas sociales, ambientales o legales que puedan surgir en relación con la IA, con estrategias de búsqueda, selección y participando en acciones de ciudadanía digital.	6.5.

IV. CONTENIDOS

A. *Relación de los contenidos con las áreas y competencias del MRCDD*

TABLE III. ENUMERACIÓN DE CONTENIDOS

ID	Contenido	Descripción
CO1	Recursos de IA. Estado del arte y la técnica	Análisis e investigacion del estado del arte y la técnica de la IA, estableciendo una contextualización y un marco de conocimiento que permita entender el estado del arte de la IA, los tipos, conceptos como IA generativa o Machine Learning, entre otros, evolución, etc., lo que posibilitará la capacidad de búsqueda y selección de herramientas de IA adecuadas para el alumnado y profesorado.
CO2	Plataforma de aplicaciones de IA	Se creará un portfolio de aplicaciones de IA. En dicha creación se incidirá en aquellas IA que permitan un acceso universal e igualitario por parte del alumnado. Diferenciando entre aplicaciones de libre acceso o vía suscripción o credenciales.
CO3	Ejemplos y dinámicas de uso de la IA	Se crearán distintos ejemplos de uso y dinámicas, apoyados con recursos multimedia, que promuevan la creación de contenidos por parte del alumnado y la resolución a problemas en su día a día, fomentando el compromiso activo del alumnado en su propio aprendizaje.
CO4	Píldoras formativas sobre protección y propiedad intelectual, ética.	Píldoras que persiguen profundizar no tanto en la parte técnica de la IA sino en aspectos relacionados con la protección, gestión y compartición de contenidos digitales y aquellos advances sobre propiedad intelectual que se están desarrollando alrededor de la IA. También se abarcarán otras dimensiones no menos importantes, como los sectores afectados, especialmente el de la educación.
CO5	Elementos d difusión del portfolio de IA	Se persigue la difusión del producto en redes, foros técnicos y educativos, profesorado y alumnado, aunando la alfabetización digital y creando foros de comunicación, colaboración e intercambio critico en la ciudadanía digital.

TABLE IV. RELACIÓN ENTRE LOS CONTENIDOS Y LAS ÁREAS DEL MRCDD

	ÁREA 2			ÁREA 5			ÁREA 6				
	2.1	2.2	2.3	5.1	5.2	5.3	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5
CO1	X	X	X								
CO2				X							
CO3					X	X			X		X
CO4							X			X	
CO5							X	X			

B. *Atención DUA (Diseño Universal para el Aprendizaje) y ODS (objetivos de desarrollo sostenible) en los contenidos*

Los contenidos de las tablas III y IV se refieren a distintos aspectos de la IA y su aplicación en el ámbito educativo. Estos contenidos se pueden relacionar con la atención al DUA y los ODS de la siguiente manera:

- El contenido CO1 se relaciona con el DUA al proporcionar al profesorado un marco de conocimiento sobre la IA que le permita seleccionar las herramientas más adecuadas para el alumnado, teniendo en cuenta sus características, necesidades y estilos de aprendizaje. Asimismo, se relaciona con el ODS 4 (Educación de calidad), al promover el acceso a una educación inclusiva, equitativa y de calidad que incorpore la IA como recurso para el aprendizaje.
- El contenido CO2 se relaciona con el DUA al ofrecer al alumnado un portfolio de aplicaciones de IA que le permita acceder a contenidos digitales interactivos y adaptativos, y que favorezca su participación y compromiso con el aprendizaje. También se relaciona con el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), al impulsar el desarrollo de infraestructuras tecnológicas que faciliten el acceso a la IA y su uso para fines educativos.
- El contenido CO3 se relaciona con el DUA al crear ejemplos y dinámicas de uso de la IA que estimulen el pensamiento crítico, creativo y colaborativo del alumnado, y que le permitan resolver problemas reales o simulados mediante el uso de la IA. Igualmente, se relaciona con el ODS 8 (Trabajo decente y crecimiento económico), al preparar al alumnado para el mercado laboral del futuro, donde la IA tendrá un papel relevante y requerirá nuevas habilidades.
- El contenido CO4 se relaciona con el DUA al profundizar en los aspectos éticos, legales y sociales de la IA, y al sensibilizar al alumnado sobre sus implicaciones para la sociedad y el medio ambiente. Además, se relaciona con el ODS 16 (Paz, justicia e instituciones sólidas), al promover el uso responsable y seguro de la IA, y al fomentar el respeto a los derechos humanos, la diversidad y la inclusión.
- El contenido CO5 se relaciona con el DUA al difundir el portfolio de IA en redes, foros y plataformas educativas, y al crear espacios de comunicación, colaboración e intercambio crítico entre profesorado, alumnado y otros agentes. También se relaciona con el ODS 17 (Alianzas para lograr los objetivos), al impulsar la cooperación y la coordinación entre los actores involucrados en la educación y la IA, y al contribuir al desarrollo de una ciudadanía digital activa y comprometida.

V. METODOLOGÍA

Para aprovechar el potencial de la IA, es necesario utilizar metodologías activas, motivadoras y creativas que fomenten la participación, el interés y la curiosidad del alumnado, y que le permitan aprender de forma significativa, autónoma y colaborativa. Algunas de estas metodologías son el aprendizaje basado en proyectos, problema o retos, el

aprendizaje cooperativo, el aprendizaje invertido, *Thinking Design* o el aprendizaje por descubrimiento. Estas metodologías se pueden apoyar en herramientas digitales que faciliten el acceso, la creación, la comunicación y la evaluación de los contenidos de IA, así como en recursos multimedia que ilustren los conceptos y las aplicaciones de la IA. El uso y combinación de estos métodos y herramientas contribuye a la transformación digital de los centros de formación profesional, ya que provoca cambios en los roles de docentes y estudiantes, en el diseño y organización de las actividades de aprendizaje y en la integración curricular de la educación digital.

VI. DIFUSIÓN Y TRANSFERENCIA DE LA INNOVACIÓN

El plan de difusión del proyecto CloudIA se ha organizado en 6 posibles líneas:

- Participación en jornadas, conferencias, eventos, ferias, etc.
- Recepción y visita de otros centros educativos de varios niveles educativos.
- Página Web, redes sociales y otras plataformas de difusión digitales.
- Publicación de resultados en congreso científico.
- Licencias, patentes y modelos de utilidad.
- Convenios y participación en redes.

A. Sostenibilidad del proyecto en el tiempo

El proyecto se difunde empleando un sitio Web así como las principales redes sociales (Facebook, Instagram, Twitter, etc) y otras plataformas digitales para la divulgación del proyecto (por ejemplo YOUTUBE), garantizando la sostenibilidad del mismo y la huella digital de los resultados obtenidos. También se prevé la publicación de noticias en páginas web educativas y de nuevas tecnologías (educarm.es, llegarasalto.es, etc.) dentro del ámbito de la innovación.

En la actualidad, el centro en el que se desarrollada el proyecto pertenece a la Red de Centros de Excelencia del Sector de Fabricación Automática, lo que ofrece un ecosistema de intercambio de experiencias y futuras colaboraciones. Se analizará la participación en otras redes tales como FP: CONECTA (fpconecta.gob.es)

B. Accesibilidad y transferencia del proyecto a la comunidad y otros agentes

El proyecto se difundirá en diferentes foros tanto en el ámbito del I+D+i como para la promoción del equilibrio de género en la FP STEAM en los que los participantes del proyecto habitualmente colaboran tales como: Edutech RM, Semana de la Ciencia y la Tecnología, Jornadas de la Formación Profesional, Campus de la Ciencia de la UPCT, Encuentros de Centros Innovadores o la Semana de la FP y el Emprendimiento, entre otros, empleando stands, demostradores, roll-up, folletos explicativos o charlas. Se organizará, en colaboración con los equipos directivos y equipos de orientación la visita y/o recepción de alumnas y alumnos para mostrarles el proyecto, sus resultados y la participación de profesoras, profesores, alumnas y alumnos de diferentes titulaciones de formación profesional.

Todos los diseños, programas, modelos o documentación técnica que decante de la ejecución del proyecto se publicará bajo alguna de las licencias *Creative Commons* o similar.

VII. PROCESO DE EVALUACIÓN

A. Relación de los criterios e indicadores de evaluación con los objetivos

La relación existente entre los criterios e indicadores de evaluación de los objetivos se muestran en la tabla V.

TABLE V. CRITERIOS DE EVALUACIÓN E INDICADORES DE EVALUACIÓN

ID	CRITERIOS DE EVALUACIÓN	INDICADORES DE EVALUACIÓN
OB1	Capacidad para crear contenidos digitales de calidad, con distintas herramientas y formatos.	Elaboración de contenidos digitales sobre conceptos y aplicaciones de la IA.
OB2	Capacidad para resolver problemas conceptuales a través de medios digitales.	Resolución de problemas conceptuales relacionados con el reconocimiento de imágenes, el análisis de datos o la generación de textos mediante la IA.
OB3	Conocimiento de las posibilidades de aprendizaje y formación en el entorno digital, y capacidad para aprovecharlas de forma efectiva y responsable.	Evaluación del nivel de competencia digital del alumnado en relación con la IA mediante el uso de instrumentos como rúbricas y cuestionarios, y proporcionar retroalimentación personalizada.
OB4	Conocimiento de los riesgos y amenazas en el entorno digital, y capacidad para proteger la privacidad y los datos personales propios y de terceros.	Promoción del uso responsable, ético y seguro de la IA, sensibilizando sobre sus implicaciones sociales, ambientales y legales, y fomentando el respeto, tolerancia y solidaridad.

B. Instrumentos de evaluación

Los instrumentos de evaluación (tabla VI), que se emplearán serán:

- Rúbricas- Para medir el desempeño de los estudiantes.
- Cuestionarios / formularios- Para recopilar información.
- Observación- Para recopilar información sobre el comportamiento y el desempeño de los estudiantes en situaciones específicas.
- Encuestas- Con objeto de obtener una realimentación del proceso.
- Reuniones periódicas- Conforme al desarrollo efectivo del proyecto.

C. Fases y calendario de evaluación

TABLE VI. INSTRUMENTOS Y FASES DE LA EVALUACIÓN

		FASE					
ID	INSTRUMENTO	D	E	F	M	A	MY
1	Rúbricas						
2	Cuestionarios / formularios						
3	Observación						
4	Encuestas						
5	Reuniones						

VIII. ESTADO ACTUAL DEL PROYECTO Y RESULTADOS OBTENIDOS

El diseño del portfolio en la actualidad se encuentra en fase de implementación habiendo llegado a la consecución parcial de los objetivos conforme a la planificación. A la finalización del proyecto se publicarán en el mismo portal los resultados cuantitativos finales y un análisis desde la perspectiva del usuario final. En la actualidad se está llevando a cabo un estudio del uso y conocimiento de la inteligencia artificial entre el alumnado mediante la implementación de un formulario en el que se consulta diversos aspectos relacionados con esta disciplina.

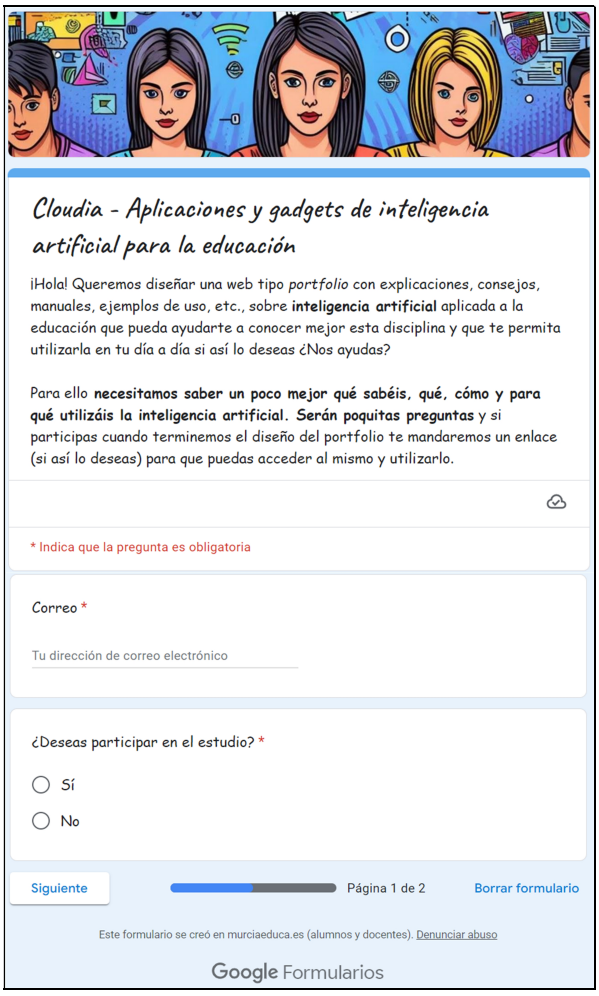


Fig. 2. Captura de pantalla del formulario diseñado para la recopilación de información para el proyecto.

Paralelamente, se han creado diferentes canales de comunicación y difusión en distintas redes sociales como Instagram, TikTok, X, Facebook, Youtube y Threads donde se publican diferentes noticias y *reels* sobre la temática y sobre el propio desarrollo del proyecto.

Fig. 3. Izquierda: Código QR de acceso al perfil Instagram del proyecto Cloudia. Derecha: Código QR de acceso al perfil Facebook del proyecto Cloudia.

En la actualidad el proyecto se ha presentado en diferentes foros como la III Semana de la Formación Profesional a la que asistieron 23 empresas y 2600 alumnos y alumnas.

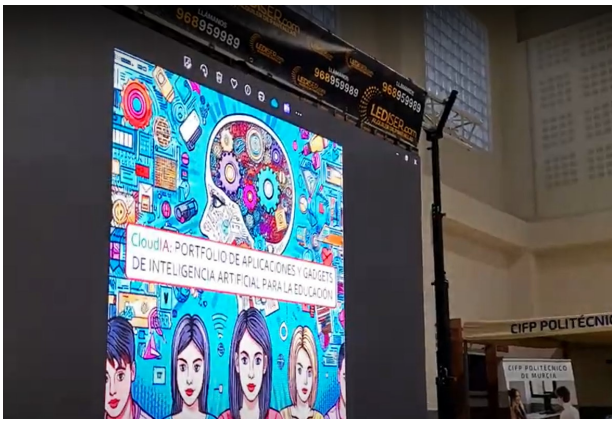


Fig. 4. Presentación del proyecto Cloudia en la III Semana de la Formación Profesional.

Está presente en otras Webs educativas a objeto de difundir sus objetivos y aumentar la extensión de su alcance.

Fig. 5. Captura de pantalla de noticia del proyecto Cloudia en Web educativa.

Igualmente se ha presentado el proyecto en diferentes acciones formativas sobre Inteligencia Artificial llevadas a cabo por el centro de Recursos de Profesores y dirigidas a la

formación de profesorado de niveles educativos desde Educación Primaria hasta Formación Profesional, pasando por Secundaria y Bachillerato,

IX. CONCLUSIONES

En la actualidad el portfolio se encuentra en fase de desarrollo y accesible en la dirección web www.cloudiaeducacion.wordpress.com, tal y como se puede observar en la Fig. 6. Se está dotando de estructura y contenido al mismo en base a los Reales Decretos recientemente publicados [1-3] y a la espera del análisis de los la información recopilada en la primeras fases del proyecto por parte del alumnado encuestado. Conjuntamente se han creado diversos canales de difusión en distintas redes sociales a objeto de llegar a la población educativa y se está difundiendo entre el profesorado mediante acciones formativas que persiguen formar a los docentes en el uso de la inteligencia artificial en el plano educativo.

Fig. 6. Portfolio Cloudia (www.cloudiaeducacion.wordpress.com)

AGRADECIMIENTOS Y MENCIONES

El presente proyecto de innovación se enmarca dentro programa DigitalProf: Innovación Educativa Digital (código 4281) (SIA 3032931) que regula la convocatoria para el desarrollo de acciones formativas de innovación digital en centros educativos de enseñanzas no universitarias, sostenidos con fondos públicos, de la Región de Murcia, dependientes de la Consejería de Educación, Formación Profesional y Empleo, en el marco del PCT #CompDigEdu Programa #DigitalProf.

Ha sido concedido bajo la Resolución de la Dirección General de Recursos Humanos, Planificación Educativa e Innovación por la que se convocan acciones formativas de innovación digital en centros públicos de la Región de Murcia en el marco del PCT CompDigEdu Programa #DigitalProf 2023-2024 y financiado por los fondos NextGenerationEU de la Unión Europea (Fig. 7).

Fig. 7. Logotipos de la financiación y concesión del proyecto Cloudia.

REFERENCES

[1] "BOE-A-2022-4975 Real Decreto 217/2022, de 29 de marzo, por el que se establece la ordenación y las enseñanzas mínimas de la Educación Secundaria Obligatoria." https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-4975

[2] "BOE-A-2022-5521 Real Decreto 243/2022, de 5 de abril, por el que se establecen la ordenación y las enseñanzas mínimas del Bachillerato." https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-5521

[3] "BOE-A-2023-16889 Real Decreto 659/2023, de 18 de julio, por el que se desarrolla la ordenación del Sistema de Formación Profesional." https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2023-16889

[4] "Marco de Referencia de la Competencia Digital Docente - INTEF" *INTEF*, Apr. 05, 2023. https://intef.es/Noticias/marco-de-referencia-de-la-competencia-digital-docente/

[5] "Recommendation on the Ethics of Artificial Intelligence" UNESCO, 2021. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380455.locale=es

[6] "DigCompEdu framework," *EU Science Hub*. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/digcompedu/digcompedu-framework_en

[7] Grupo de trabajo de Inteligencia Artificial Generativa de la UNAM, *Recomendaciones para el uso de la inteligencia artificial generativa en docencia*, 1st ed., vol. 1. México, 2023. [Online]. Available: https://iagenedu.unam.mx/docs/recomendaciones_uso_iagen_docencia_unam_2023.pdf

Control automático de corriente en un regulador de tensión

1st Jose Miguel Galeas-Merchán
Departamento de Tecnología Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, Spain
jgaleas@uma.es

2nd Margarita Ruiz-García
Departamento de Tecnología Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, Spain
mcruiz@uma.es

***Abstract*—This project proposes the development of a versatile system that includes a general-purpose analog input subsystem, such as a voltage regulator, analog output actuators and a micro controller implementing automatic current control. The challenge is to prevent exceeding the maximum current in the voltage regulator using a micro controller. The results have been highly satisfactory because this project has allowed students to handle the design concepts of an analog subsystem and to define how to integrate this subsystem into a system using a microcontroller as intelligent control.**

***Index Terms*—Analog subsystem, micro controller, automatic control**

I. Introducción

Este trabajo se centra en la asignatura de Subsistemas Analógicos (3º curso) del grado en Ingeniería de Sistemas Electrónicos de la Universidad de Málaga. Esta asignatura comprende el análisis de un conjunto de circuitos analógicos fundamentales como son los amplificadores con realimentación negativa, los osciladores, los amplificadores de potencia y las fuentes de alimentación. Cada uno de estos subsistemas se encuentran presentes en multitud de sistemas de ingeniería donde es necesario que diversas piezas trabajen conjuntamente para conseguir un objetivo común [1].

Esta asignatura de 6 créditos tiene asignadas 41 horas a la presentación de los conceptos teóricos y 19 horas al desarrollo de prácticas. Estas prácticas se evalúan mediante la presentación al profesorado de su funcionamiento en el laboratorio así como mediante el envío de una memoria donde se refleja todo el proceso de desarrollo de la misma. Dentro de la asignatura, se presta especial atención al diseño de fuentes de alimentación, centrándose particularmente en los reguladores de tensión. Este subsistema es clave debido a su amplio uso en aplicaciones prácticas y continúa siendo objeto de investigación activa en la actualidad [2]. Por este motivo, si bien en la asignatura se comienza por desarrollar una práctica más simple referida al tema de osciladores (8 horas), nuestro mayor interés se centra en una segunda práctica sobre reguladores de tensión (11 horas). Éste es el tema sobre el que vamos a desarrollar el proyecto aquí descrito. El reto ha sido desarrollar un regulador de tensión serie con un control de corriente para proteger al circuito de daños. En cursos anteriores, el control de corriente era analógico (foldback) pero en este estudio se presenta una alternativa más flexible basada en el uso de un microcontrolador para un control automático.

II. Descripción del sistema

A. Regulador de tensión serie

Los reguladores de tensión son subsistemas electrónicos que permiten obtener una salida estable de tensión frente a variaciones de [3]:

- Tensión de entrada
- Corriente de salida
- Temperatura
- Temporales

Los reguladores de tensión serie son los más utilizados y se corresponden con el esquema de la Fig. 1. En este esquema se aprecia un bloque de muestreo en la salida para comprobar si existen variaciones en la tensión. Éste se conecta al bloque comparador que compara la salida muestreada con la tensión de referencia. Finalmente existe un elemento de control serie que, con la información recibida, regula la tensión de salida. Una posible implementación de este esquema se muestra en la Fig. 2:

- Las resistencias R1 y R2 constituyen el bloque de muestreo de la salida. Este divisor de tensión nos permite ajustar la fracción de tensión de la salida que usamos para controlar si el valor es el correcto en el bloque comparador siguiente.
- El amplificador operacional es el encargado de comparar y amplificar el error. La tensión tomada con las resistencias de muestreo se compara con una tensión de referencia para ver si es correcta. La tensión de referencia suele ser establecida por un diodo zéner. Este dispositivo tiene gran uso dada su versatilidad en lo que se refiere a rango de tensiones disponibles, su fiabilidad y su facilidad de polarización.
- El elemento de control serie es el transistor bipolar. Este dispositivo usa la salida del comparador para ajustar su tensión de base y de este modo ajusta la corriente de salida para regular la tensión. En este circuito hay un lazo de realimentación negativa, de modo que, si aumenta la tensión a la salida (Vo), aumenta la tensión en la borna

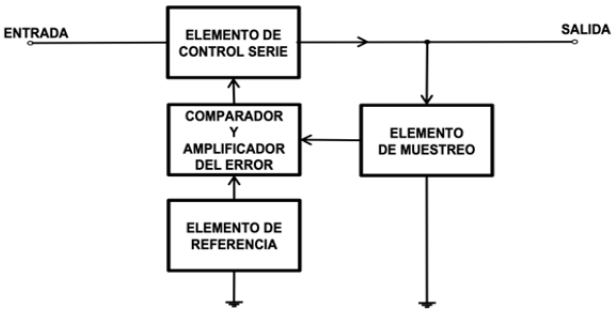


Fig. 1. Esquema de un regulador de tensión serie

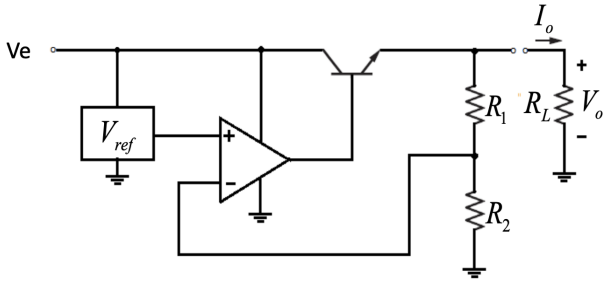


Fig. 2. Implementación de un regulador de tensión serie con BJT

negativa del operacional por lo que la salida del operacional disminuye. Esta tensión es la tensión en base del transistor de control, que al disminuir, hace que la tensión a la salida también disminuya. Esta realimentación nos lleva a analizar que esta estructura es en realidad la de un amplificador no inversor donde el transistor se emplea para dar alta corriente. Además el transistor de control debe ser de potencia porque normalmente ha de entregar corrientes elevadas a la carga.

B. Control de corriente foldback

El tema del control de corriente es muy importante en las fuentes de alimentación. Si bien es verdad que muchas fuentes soportan pequeñas sobrecargas, su vida se reduce debido al aumento de la temperatura. Para evitarlo, la mayoría de las fuentes de alimentación tienen circuitos limitadores de corriente internos que los protegen tanto a sí mismos como a la carga que tienen conectada. La función de limitación de corriente suele actuar cuando se excede la corriente de salida nominal máxima en torno al diez o veinte por ciento.

Por este motivo, en nuestro regulador (Fig. 2) se va a incluir un circuito de control de corriente con las siguientes consideraciones:

- El control actuará cuando se alcance la máxima corriente de salida indicada en las especificaciones. El caso peor es para la salida en cortocircuito.
- La potencia disipada en el regulador es, principalmente, la potencia disipada en el transistor, por tanto éste será nuestro elemento crítico en el diseño. El transistor debe soportar este rango de potencias.

En la asignatura de subsistemas analógicos, en la que se centra este trabajo, se ha optado en cursos anteriores por diseñar un control de corriente tipo foldback [4]. En la Fig. 3 se muestra como se conecta al transistor de control serie Q1 del regulador. En la Fig. 4 se muestra el funcionamiento del foldback al variar la corriente Io en la resistencia de carga:

- Si la corriente de salida no excede el máximo valor especificado, el limitador no funciona, el transistor Q2 está en corte. La tensión de salida permanece constante y la corriente de salida variará al variar la carga.
- Cuando se excede la corriente máxima, para un intervalo pequeño de variaciones de tensión en la salida, esta corriente se mantiene constante. El transistor Q2 se pone a conducir pero el diodo zéner no funciona. Para que el transistor Q2 empiece a conducir es necesario ajustar Rs, que debe tener valores muy pequeños y resulta un aspecto crítico en el diseño. En este caso se soporta cierta sobrecarga variando sólo la tensión de salida, siempre teniendo en cuenta que no se supere la potencia máxima del transistor de control Q1. Este intervalo de tensiones que soportan la corriente máxima se ajusta con el valor de tensión del zéner.
- Finalmente, si la resistencia de carga sigue bajando, se varían tensión y corriente para evitar daños en el circuito.

La implementación de este circuito foldback junto al regulador resultaba muy compleja para los estudiantes de la asignatura. Al ser un subsistema analógico relativamente grande existían muchos aspectos en la implementación real que no podían evaluar por simulación y que les impedía conseguir el correcto funcionamiento del foldback. Se trataba de conceptos cómo la desviación de los parámetros reales de los transistores, la dificultad de usar resistencias muy pequeñas para el foldback, el control de las potencias máximas en los variados componentes del circuito y la variación gradual de la carga para evaluar correctamente el funcionamiento del foldback entre otros. Por este motivo no resultaba estimulante la realización de la práctica lo que no llevaba a un buen aprendizaje de los conceptos relativos a la misma.

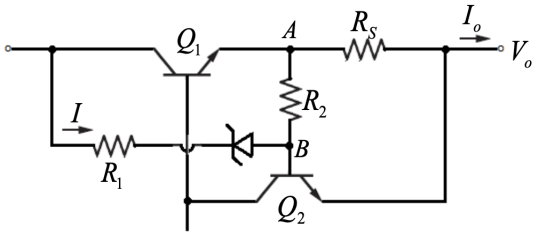


Fig. 3. Implementación de un control de corriente foldback

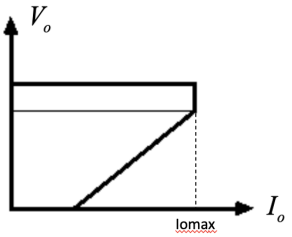


Fig. 4. Funcionamiento del control de corriente foldback

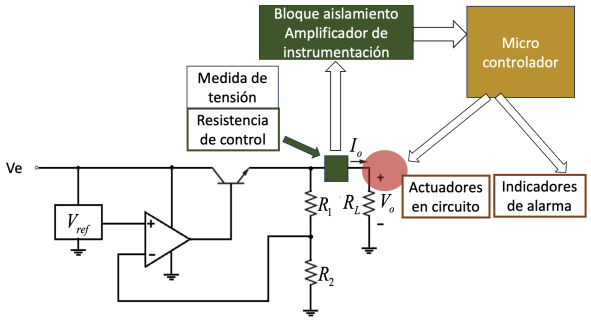


Fig. 5. Integración del control de corriente automático con el regulador

C. Control de corriente automático

Este pasado curso se ha cambiado el enfoque de la práctica de modo que el folback analógico se ha sustituido por un control de corriente automático basado en un microcontrolador. Esto reduce notablemente la complejidad de la implementación hardware y dota al sistema de una mayor flexibilidad y adaptabilidad a diversas condiciones de operación. En este caso se ha optado por usar como microcontrolador Arduino [5] debido a sus características:

- Plataforma abierta
- Alta flexibilidad y facilidad de uso
- Facilidad de programación y disponibilidad de entornos gráficos
- Disponibilidad de multitud de librerías
- Gran variedad de placas y bajo coste

Para este control automático de corriente se necesitan añadir al circuito los siguientes elementos Fig. 5:

- Resistencia de control. Es muy importante que al incluir esta resistencia en serie con la carga no se vea afectado el funcionamiento del circuito para que la medida sea válida. Con esta resistencia la corriente medida se transforma en un valor de tensión de control.
- Bloque de aislamiento. Es necesario aislar la medida de la tensión de control del regulador respecto del interfaz analógico del microcontrolador de modo que no se puedan producir daños al mismo. Una posible implementación de este bloque es el amplificador de instrumentación.
- Microcontrolador que realiza el procesado digital necesario para implementar el control automático de la corriente controlando los actuadores.

III. Diseño del sistema

La clave de diseño de este proyecto es la integración de los mundos analógico y digital para formar un sistema completo mucho más versátil.

Otra característica destacable del mismo es que, al ser un sistema programable, está dotado de gran flexibilidad y permite al alumno desarrollar su creatividad. Además le permite integrar multitud de conceptos que se han descrito en diversas asignaturas cursadas en el grado relacionadas con el diseño analógico y digital y la programación aplicada a microcontroladores.

En la Fig. 6 se aprecian los tres grandes subsistemas que se necesitan diseñar.

A. Subsistema analógico

En este bloque se engloba el sistema regulador de tensión, así como los posibles actuadores de salida que va a controlar el microcontrolador de forma automática para evitar daños si se supera la máxima corriente en la carga.

B. Subsistema de adquisición de datos

Este subsistema engloba la problemática de adquirir datos analógicos del circuito sin distorsionar su funcionamiento. Tal y como se comentó en la sección anterior es necesario emplear:

- Una resistencia en serie con la carga que transforma la corriente medida en una tensión de control.
- Un bloque de aislamiento, constituido por el amplificador de instrumentación, que aísla el sistema bajo control del puerto de entrada del microcontrolador para evitar daños. En la Fig. 7 se aprecia un esquemático del mismo para una ganancia igual a la unidad.

C. Microcontrolador

El microcontrolador realiza tres funciones principales:

- Realizar la conversión analógica/digital de la tensión de control, que es la magnitud analógica que sensamos a la entrada del circuito.
- Implementar el procesado digital chequeando si se ha alcanzado la máxima corriente.
- Controlar los actuadores, que sirven tanto para indicar si la zona de funcionamiento es segura como para evitar daños en el circuito.

En la Fig. 8 se observa un diagrama de flujo del programa en Arduino para efectuar el control automático de la corriente.

IV. Fases de desarrollo

En esta sección se van a describir las diversas fases que permiten diseñar e implementar el sistema descrito. Los estudiantes cuentan con un total de 11 horas de prácticas en laboratorio para probar y desarrollar todo el sistema. En este tiempo deben mostrar al equipo docente el funcionamiento de su diseño. Previamente a estas sesiones prácticas, deben realizar el diseño teórico del mismo y su simulación fuera del

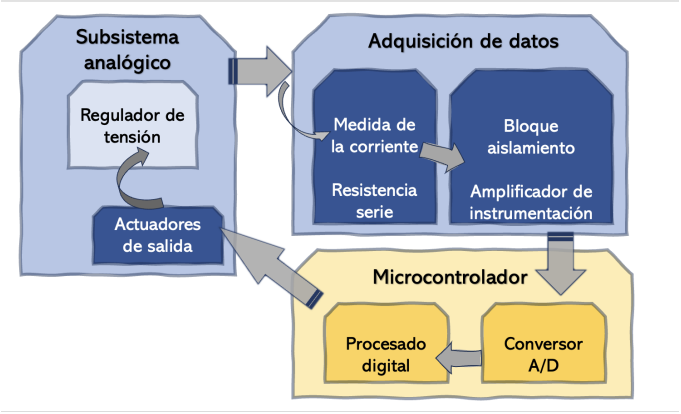


Fig. 6. Subsistemas en el diseño

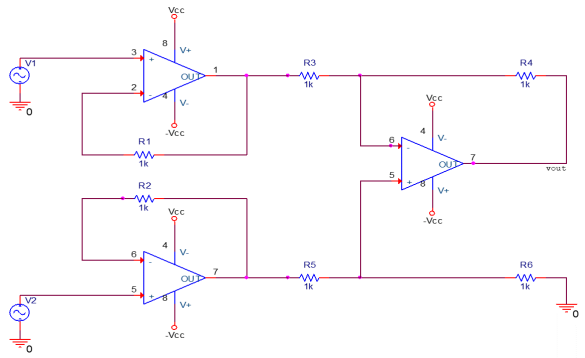


Fig. 7. Amplificador de instrumentación de ganancia unidad

horario establecido, lo que se estima en unas 2 horas, dado que en las clases teóricas se indican con mucho detalle las pautas para realizarlo. Al acabar la práctica deben entregar una memoria del desarrollo para la evaluación final. En cuanto al material en el laboratorio se les presta el Arduino y los alumnos deben adquirir el resto.

A. *Diseño teórico del subsistema analógico*

A continuación se describen los aspectos teóricos de funcionamiento que se deben tener en cuenta para completar este bloque analógico.

- Realizar el diseño teórico del regulador de tensión. Es necesario elegir los componentes adecuados para el correcto funcionamiento del regulador de tensión atendiendo a las especificaciones del sistema.
- Realizar el diseño teórico de los actuadores. Se deben diseñar los circuitos adecuados para los actuadores que se vayan a emplear, tanto los enfocados a evitar la sobrecarga al superar la máxima corriente, como los empleados para indicar si la corriente se encuentra en el rango permitido. Como ejemplo se propone un relé para desconectar la resistencia de carga y elementos como diodos o zumbadores para generar señales de alarma. En esta fase se estimula la creatividad del alumnado, dado que cada cual debe tomar sus propias decisiones.

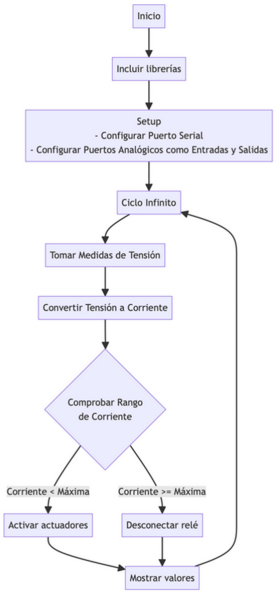


Fig. 8. Diagrama de flujo del programa de Arduino

- Realizar el diseño teórico del sistema de adquisición de datos. En primer lugar se debe diseñar el valor adecuado para la resistencia serie con la resistencia de carga que nos permite chequear la corriente. De este modo la corriente da lugar a una medida de tensión de control. Esta tensión constituye la entrada del amplificador de instrumentación, cuyos elementos también se deben diseñar para conseguir una ganancia unidad, dado que su misión es sólo aislar.

B. *Simulación del subsistema analógico*

Es imprescindible simular el comportamiento de estos sistemas usando una herramienta sofware como Orcad [6]. De este modo se chequea si el diseño teórico es correcto y se cumplen las especificaciones de partida. Además en esta fase será necesario ajustar determinados parámetros para afinar el comportamiento del circuito y cumplir las especificaciones de partida.

C. *Implementación del subsistema analógico*

En este caso se ha elegido la protoboard como placa de pruebas para estos diseños porque se pueden insertar elementos electrónicos sin la necesidad de soldar ninguno de los componentes. La ventaja de esta opción es su simplicidad tanto para montar el circuito, como para realizar pruebas experimentales y modificaciones de manera rápida. En esta fase se deben implementar los diseños y realizar las medidas necesarias con la instrumentación del laboratorio para comprobar su funcionamiento.

Es muy importante diseñar una adecuada batería de pruebas para chequear el correcto funcionamiento del sistema. Para llevar a cabo estas pruebas se deben añadir al circuitos los elementos necesarios como resistencias variables.

En las figuras Fig. 9 y Fig. 10 se muestran los ejemplos de implementaciones del regulador y el amplificador de instrumentación.

D. Bloque digital. Microcontrolador

En esta parte se incluye toda la problemática de la conversión analógica/digital. En el caso de Arduino existen librerías disponibles que ocultan la complejidad de la misma. Para nuestras medidas la resolución que ofrece Arduino es más que suficiente.

Una vez que los datos están en el sistema es necesario programar el bloque que efectúa el procesamiento de los mismos. A tal efecto es necesario comparar la tensión de control obtenida con las especificaciones de máxima corriente contando como dato con el valor de la resistencia serie empleada.

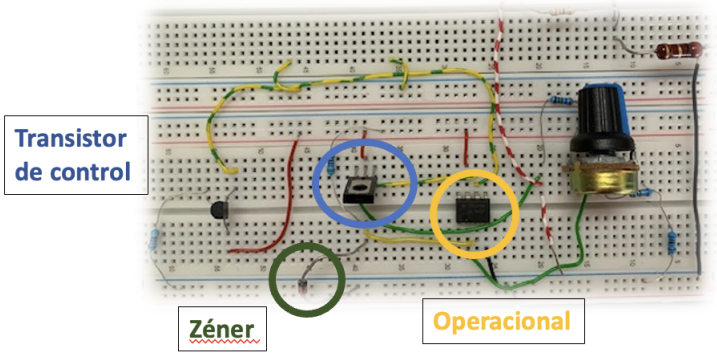


Fig. 9. Montaje en protoboard del regulador

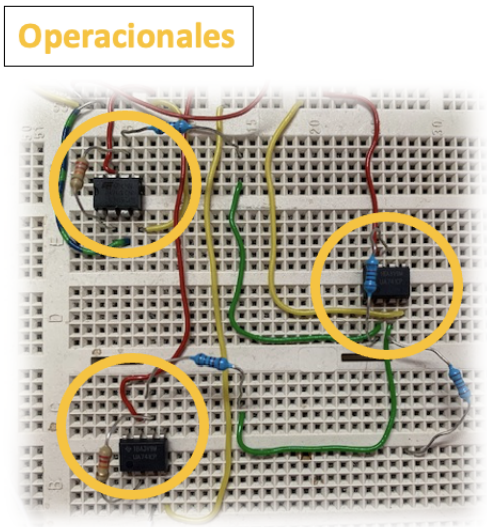


Fig. 10. Montaje en protoboard del amplificador de instrumentación

En este caso se propone a los estudiantes que diseñen cómo va a ser ese procesamiento. De este modo cada cual puede establecer la complejidad que estime conectando los actuadores que necesite para efectuar su procesamiento. Como mínimo se les propone que usen un relé a la salida para desconectar la carga y algunos leds que muestren si la zona de funcionamiento del sistema es segura. En la figura Fig. 11 se aprecia una posible implementación en la protoboard de arduino y un relé, un diodo y una pantalla conectados al mismo.

El fin último es que, al desarrollar un proyecto con características particulares, entiendan y asimilen los conceptos de circuitos involucrados en este proceso.

V. Resultados

Los resultados obtenidos han sido muy satisfactorios, ya que se ha logrado una reducción significativa en la complejidad del sistema propuesto. Esta simplificación ha permitido una mayor accesibilidad y comprensión para los estudiantes involucrados en esta asignatura.

En particular, se ha llevado a cabo un análisis y diseño de un sistema más flexible, el cual incorpora no solo los principios básicos de los bloques de regulación y actuadores, sino también aspectos de procesamiento que permiten un control más versátil y preciso de la corriente.

Estos resultados han sido evaluados a través de un cuestionario donde los alumnos indicaban los puntos positivos y negativos de la nueva práctica. En general, los alumnos de primera convocatoria indicaban que la práctica había sido innovadora, didáctica y que les había servido para afianzar los conceptos teóricos. Un aspecto significativo han sido los comentarios de los alumnos que cursaban la asignatura por segunda vez ya que indicaban que esta nueva propuesta es más entretenida, más amena y menos frustrante que en años anteriores.

VI. Conclusiones

Este artículo presenta la implementación de un sistema completo que integra un regulador de tensión, actuadores analógicos y un control automático de corriente.

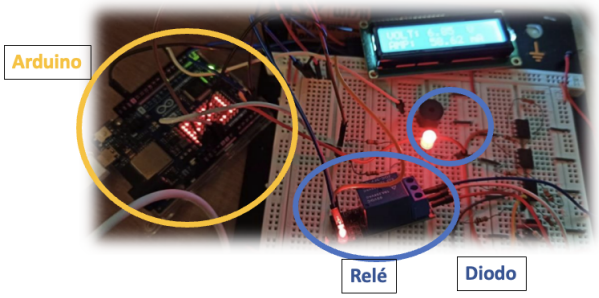


Fig. 11. Montaje en protoboard de arduino y los actuadores

Este tipo de implementación en la práctica de la asignatura ha demostrado ser altamente efectiva ya que ha permitido una reducción significativa en la complejidad del sistema, al tiempo que ofrece una mayor versatilidad y adaptabilidad a diversas condiciones de operación gracias a la integración de los mundos analógico y digital para formar un sistema completo conjunto.

Además ha permitido integrar multitud de conceptos que se han descrito en diversas asignaturas cursadas en el grado relacionadas con el diseño analógico y digital y la programación aplicada a microcontroladores.

La participación de los estudiantes en el diseño y la implementación de este sistema ha sido fundamental para su éxito. Esta experiencia práctica no solo les ha permitido comprender los conceptos teóricos de los subsistemas analógicos y digitales, sino que también ha estimulado su creatividad al enfrentarse a desafíos reales de diseño y solución de problemas. Se ha logrado un sistema funcional que cumple con los objetivos propuestos, proporcionando una solución eficaz y práctica para el control de corriente en un regulador de tensión serie.

En resumen, el fin último de esta propuesta es el desarrollo de un proyecto con unas características muy particulares para estimular la asimilación de los conceptos de circuitos involucrados en todo este proceso.

REFERENCES

[1] F. Morilla-García y S. Dormido-Canto, “Ingeniería de sistemas”,1ª ed, Sanz-Torres, 2012

[2] B. Ríos-Montero, J. Lopez-Gomez, R. Ramírez-Betancour, F. Martinez-Solis and J.. Zirate-Salvador,“An FPGA-based Automatic Voltage Regulator for a Synchronous Electric Generator”, 2023 20th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), Mexico City, Mexico, 2023, pp. 1-6.

[3] A. P. Malvino, “Principios de electrónica”, 6th ed., Ed. McGraw-Hill, 2000, pp. 991–1028.

[4] A. Garcia-Guera, C. López-Barrio, J. Marín-Galán, E. Munñoz-Merino, “Circuitos electrónicos 2”, 9th ed. vol. 2, Ed. Servicio Publicaciones ETSIT Madrid, 1986, pp. 283–335.

[5] Arduino, “Arduino documentation”, [Online]. Available: https://docs.arduino.cc/, Marzo 2024

[6] Orcad, “PSpice documentation”, [Online]. Available:https://www.orcad.com/pspice, Marzo 2024

Sistema de ensayo y caracterización de baterías de vehículos eléctricos

Nicolás Martínez Cantero
Dpto. de Ing. de Sistemas y Automática
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
nicmarcan@alum.us.es

Mohamad Hamdan
Dpto. de Ing. de Sistemas y Automática
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
mohham@alum.us.es

Alfredo Pérez Vega-Leal
Dpto. de Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
alperez@us.es

Manuel A. Perales Esteve
Dpto. de Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
mperales@us.es

Federico Barrero
Dpto. de Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
fbarrero@us.es

Manuel G. Satué
Dpto. de Ing. de Sistemas y Automática
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
mgarrido16@us.es

***Abstract*— La batería recargable es el componente central de los vehículos eléctricos y requiere un alto rendimiento para conseguir las máximas prestaciones en ahorro de combustible, coste de mantenimiento y fiabilidad. Este rendimiento se determina mediante características tales como el estado de carga (SOC) o el estado de salud (SOH) de la batería. Este artículo presenta una descripción general de las principales características que se emplean en la evaluación de una batería recargable empleada en vehículos eléctricos, ofreciendo una plataforma y un mecanismo de prueba y caracterización que permite acercar este tipo de dispositivos a los alumnos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla.**

Keywords— Laboratorios remotos, baterías recargables, caracterización de dispositivos.

I. Introducción

Los datos históricos, así como los modelos del clima futuro, muestran que el calentamiento global terrestre es debido al conocido como efecto invernadero y es, a su vez, proporcional al aumento de las concentraciones de CO2 en la atmósfera [1]. Más concretamente, cada vez que las concentraciones de CO2 aumentan 10 ppm (partes por millón de moléculas de aire), la temperatura media del planeta aumenta 0.1°C [2]. La relación entre calentamiento global y concentración de CO2 se debe en buena parte a los gases que emiten los vehículos de combustión interna, que provocan gran cantidad de emisiones que afectan a la salud de los seres humanos y tienen efectos perniciosos sobre dicho calentamiento global.

Una de las principales medidas adoptadas para evitar que los problemas anteriores empeoren es el establecimiento de calendarios para dejar de producir vehículos de combustión interna, por lo que los vehículos eléctricos (VE), en los que la batería recargable es fundamental, previsiblemente sustituirán a los de combustión interna en el futuro [3]. En comparación con otras baterías recargables como las de Ni-Cd, Ni-MH y plomo-ácido, las de iones de litio tienen una mayor densidad de energía y potencia y vida útil, por lo que se aplican habitualmente en electrónica de consumo [4], [5]. Sin embargo, cuando la aplicación requiere de mucha energía, como es el caso en los vehículos eléctricos, es imprescindible conectar en serie y en paralelo numerosas celdas para conformar la batería utilizada, lo que limita su uso al provocar problemas de coste, estabilidad, coherencia y seguridad. Las baterías de iones de litio deben operarse en un área operativa segura y confiable, que se ve afectada por la tasa de carga, el rango de temperatura y el voltaje. Exceder estos rangos conducirá a un rápido deterioro de la batería en el medio plazo, pudiendo provocar problemas de seguridad. Para garantizar el funcionamiento fiable de las baterías de los VE es importante evaluar y conocer sus características.

Este artículo muestra el desarrollo de un sistema automático de caracterización de baterías eléctricas recargables que permite programar ciclos de carga y descarga, ofreciendo acceso a la información generada y permitiendo el análisis detallado de las prestaciones de la batería del VE, una de las principales barreras a la que se enfrentan los futuros consumidores de esta tecnología. El trabajo desarrollado servirá de base para conseguir la convergencia entre teoría y práctica en la formación docente relacionada con la gestión de energía a partir de baterías en VE. En la sección II se describe el contexto en el que se engloba esta experiencia docente, con especial mención a la asignatura que sirve de punto de partida para el sistema desarrollado. Posteriormente, en las secciones III y IV, se describen las principales características a analizar, así como la bancada que se ha desarrollado para realizar ensayos y analizar el comportamiento de diferentes tipos y tecnologías de baterías empleables en VE. Algunos resultados obtenidos en pruebas realizadas con baterías reales empleando el sistema de prueba desarrollado se describen en la sección V. Por último, las conclusiones alcanzadas se detallan en la sección VI.

II. Contexto

La Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla desarrolla una labor investigadora puntera en el ámbito de la electrificación asociada al transporte por carretera [6]-[10]. En el curso 2022/23 se decidió cambiar la configuración actual del grado y máster en Ingeniería de Tecnologías Industriales para suprimir las intensificaciones especialistas del grado, pasando a un grado generalista y dejando la especialización para el máster universitario en ingeniería industrial, integrado en el grado. La titulación de Ingeniero Industrial planteada se asimila a los planes de estudio que se imparten en la actualidad en las Universidades Politécnicas de Madrid, Cataluña o Valencia, así como en la Universidad del País Vasco.

La nueva planificación incorpora una asignatura optativa denominada “Electrónica para Movilidad Eléctrica” en la especialidad denominada “Electrónica para la Industria Digital y la Transición Energética”. Esta asignatura está centrada en la tecnología y gestión energética de los vehículos eléctricos, se impartirá durante el primer cuatrimestre del sexto curso de la titulación y tiene asignados 5 créditos ECTS.

La organización docente de la asignatura se está desarrollando en estos momentos, de manera que el primer curso académico en el que se impartirá será el curso 2025-2026. Los contenidos asignados a la asignatura incluyen sistemas electrónicos de gestión energética en vehículos eléctricos, la tecnología electrónica de potencia para vehículos eléctricos, los cargadores e infraestructura de recarga, así como la electrónica auxiliar del vehículo eléctrico. Las actividades formativas y metodologías incluyen clases prácticas, en las que se incluiría la propuesta planteada en este trabajo.

III. Principales Características de las Baterías

A pesar de que la comercialización del VE es una realidad hoy en día, aún quedan numerosos retos tecnológicos por abordar. Entre éstos se pueden destacar los relacionados con el sistema de almacenamiento, la reducción del coste, el aumento de su capacidad o el mejor aprovechamiento de la energía almacenada. El sistema formado por las baterías es una parte fundamental del vehículo eléctrico, y constituye la base del almacenamiento de energía. La forma de almacenamiento de la energía en las baterías del vehículo es química, al tratarse de una de las formas de almacenamiento de mayor densidad. A pesar de los esfuerzos por mejorar la tecnología de las baterías, ver Fig. 1 y [11], los vehículos eléctricos todavía tienen una autonomía limitada. El Nissan Leaf (2015), por ejemplo, con 30kWh de batería, tiene una autonomía de entre 160 y 320 km con una carga completa, y menos aún con el aire acondicionado o la calefacción encendidos. A día de hoy se pueden encontrar vehículos con 400km de autonomía real en el mercado.

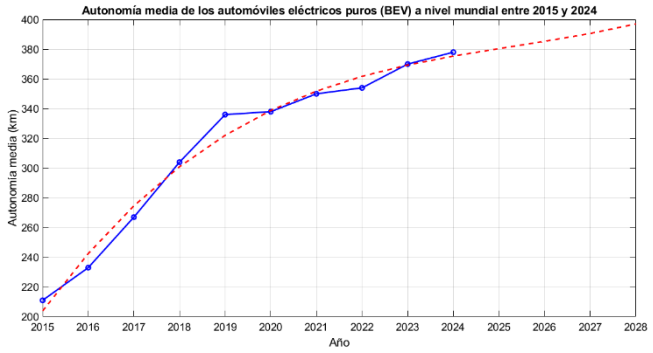
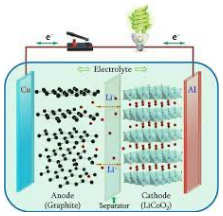


Fig. 1. Evolución de la autonomía media de VE.

La batería eléctrica está habitualmente compuesta por celdas conectadas en serie y/o paralelo, en el que la celda es la unidad básica de la batería, capaz de convertir energía química en energía eléctrica a través de reacciones electroquímicas. Las baterías constan de cuatro partes fundamentales que son: ánodo (polo negativo), cátodo (polo positivo), separador (barrera porosa que impide el contacto entre cátodo y ánodo, permitiendo el paso de iones) y electrolito (que puede presentarse en distintos estados, liquido, gas, gel o sólido, y que permite el transporte de electrones e iones). A lo largo de los procesos de carga y descarga de una batería ocurren dos reacciones, una en el ánodo y otra en el cátodo, denominadas semi reacciones. Para que la batería almacene energía o la produzca, estas reacciones deben intercambiar electrones e iones. En concreto, el ánodo sufre una reacción de oxidación durante el proceso de descarga, mientras que en el proceso de carga sufre una reacción de reducción. Para el caso de cátodo, tenemos una reacción de reducción durante el proceso de descarga y una reacción de oxidación durante el proceso de carga. De esta forma, el almacenamiento electroquímico en la batería permite convertir la energía química en energía eléctrica por medio de intercambio de iones en un proceso de oxidación-reducción.

Los materiales que componen los elementos de una batería dependen del tipo de batería y se encuentran en continuo estudio y constante mejora. En el caso de los VE, la alternativa más popular es aquella batería que se basa en Ion-Litio, seguida de las de plomo ácido, hidruro metálico de níquel y cloruro de sodio y níquel, Fig. 2.



Tecnología	Reacción
Ácido plomo	$Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \rightleftharpoons 2PbSO_4 + 2H_2O$
NiCd	$2NiO(OH) + Cd + 2H_2O \rightleftharpoons 2Ni(OH)_2 + Cd(OH)$
NiMh	$NiO(OH) + MH \rightleftharpoons Ni(OH)_2 + M$
Li-Ion	$LiCoO_2 + C \rightleftharpoons Li_{1-x}CoO_2 + Li_xC$

Tecnología	Reacción en el cátodo	Reacción en el ánodo
Ácido plomo	$PbO_2 + 3H^+ + HSO_4^- + 2e^- \rightleftharpoons 2H_2O + PbSO_4$	$Pb + HSO_4^- \rightleftharpoons PbSO_4 + H^+ + 2e^-$
NiCd	$NiO(OH) + H_2O + e^- \rightleftharpoons Ni(OH)_2 + OH^-$	$Cd + 2OH^- \rightleftharpoons Cd(OH)_2 + 2e^-$
NiMh	$NiO(OH) + H_2O + e^- \rightleftharpoons Ni(OH)_2 + OH^-$	$MH + OH^- \rightleftharpoons M + H_2O + e^-$
Li-Ion	$LiCoO_2 \rightleftharpoons Li_{1-x}CoO_2 + xLi^+ + e^-$	$C + xLi^+ + e^- \rightleftharpoons Li_xC$

Fig. 2. Esquema general y reacciones electroquímicas que se producen en diferentes tipos de baterías.

Nos centraremos en el análisis de baterías de Ion-Litio, que son las más utilizadas en la actualidad por la mayoría de vehículos eléctricos. Las principales características de estas baterías son su alta densidad de energía (acumulan mucha mayor carga por unidad de volumen que otros tipos de baterías), longevidad (capacidad y ciclo de vida útil) y una buena eficiencia de carga y descarga [12]. Cabe destacar que uno de los factores clave a tener en cuenta son los sistemas de protección durante los procesos de carga y descarga, con el fin de evitar sobrecargas, cortocircuitos, y altas temperaturas. Todo esto conlleva al desarrollo de sistemas capaces de monitorizar y salvaguardar estos procesos de manera segura.

En nuestro trabajo hemos empleado como batería de prueba para comprobar que el sistema desarrollado funciona correctamente, una batería de litio LiFePo4 32700 de 6000 mAh y 3.2 V. Las características nominales extraídas de las hojas de características de la batería se muestran en la Tabla 1, y entre los parámetros de mayor relevancia se encuentran la capacidad nominal (expresada en amperios-hora (Ah), que representa la cantidad máxima de carga eléctrica que la batería puede suministrar en un intervalo de tiempo específico), la tensión nominal (correspondiente al voltaje estándar de operación de la batería), el voltaje de corte de descarga (que define el nivel mínimo de tensión al que la batería puede llegar durante el proceso de descarga), y la tensión máxima de carga (que indica el límite superior del voltaje permitido para cargar la batería). Asimismo, se consideran las corrientes de carga y descarga rápida, estándar y la corriente máxima de descarga. Además, es importante la evaluación de la impedancia interna de la batería y sus rangos de temperaturas de almacenamiento, que especifica las temperaturas mínimas y máximas en las que la batería puede ser almacenada durante largos periodos sin sufrir daños. Otros aspectos destacables incluyen el estado de carga (SOC, *State Of Charge*) y el estado de salud (SOH, *State Of Health*) de la batería. El SOC indica el nivel actual de carga de la batería, expresado generalmente como un porcentaje de su capacidad total, mientras que el SOH representa el porcentaje de degradación sufrida por la batería a lo largo del tiempo [15]. Estos parámetros son fundamentales para

comprender el rendimiento y la capacidad de la batería en diversas condiciones de uso.

Tabla 1. Especificaciones de la batería LiFePo4 32700 6000 mAh 3.2 V.

Parámetro	**Especificación**
Capacidad nominal	6000 mAh
Voltaje nominal	3.2 V
Voltaje de corte de descarga	2.0 V
Voltaje máximo de carga	3.65 V
Corriente de carga estándar	0.2C A
Corriente de descarga estándar	0.2C A
Corriente de carga rápida	0.5C A
Corriente de descarga rápida	0.5C A
Corriente máxima de descarga	3C A
Impedancia interna	≈25 mΩ
Rango de temperatura de almacenamiento	-20ºC ~ 45ºC

IV. Banco de ensayo de baterías

El esquema general del sistema desarrollado y la interfaz diseñada en LabVIEW se muestran en las Figs. 3 y 4. Esta interfaz no solo controla el banco de ensayos, sino que facilita la adquisición de los parámetros de la batería bajo análisis. El sistema desarrollado utiliza los siguientes instrumentos y componentes físicos:

- Ordenador personal que centraliza la gestión y control del sistema de test.
- Fuente de tensión programable Sorensen DLM20-30, conectada con el ordenador personal mediante 2 cables ethernet cat6 y un router D-Link D-300.
- Carga electrónica programable DC Bk 8614, conectada con el ordenador personal mediante un cable USB tipo B.
- Dispositivo de entradas y salidas multifunción Ni-USB6281, conectado con el ordenador personal mediante un cable USB tipo B. Se ha incluido en el diseño del banco de pruebas para la medida de la temperatura de la batería y para la futura expansión del sistema (inclusión de relés de control y medidas de monitorización y supervisión externas a los equipos anteriormente mencionados).
- Termopar tipo K.

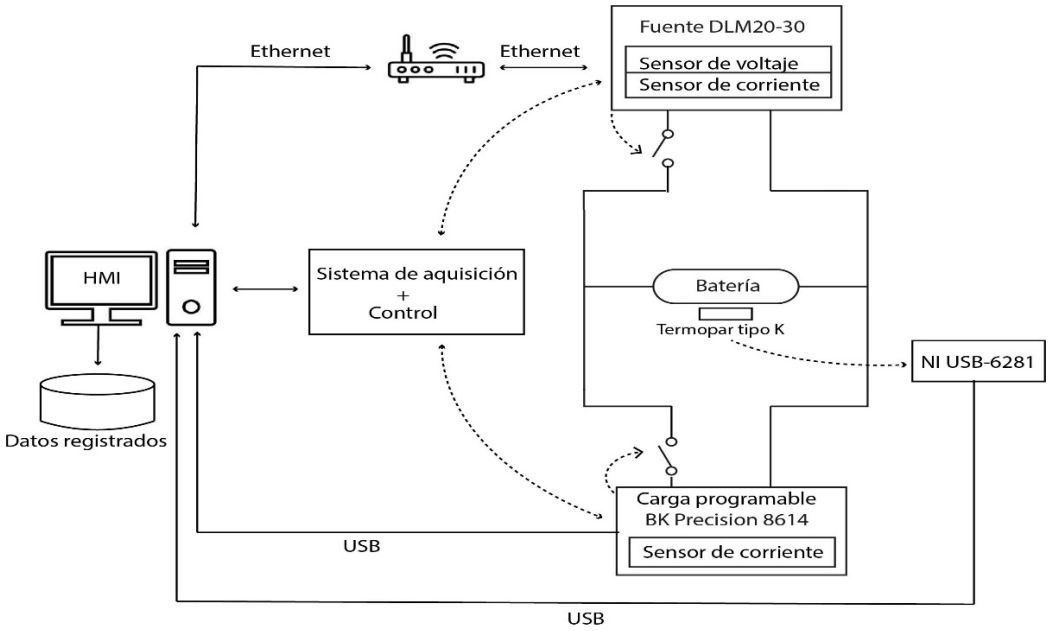


Fig. 3. Esquema general del sistema propuesto para el ensayo de baterías recargables.

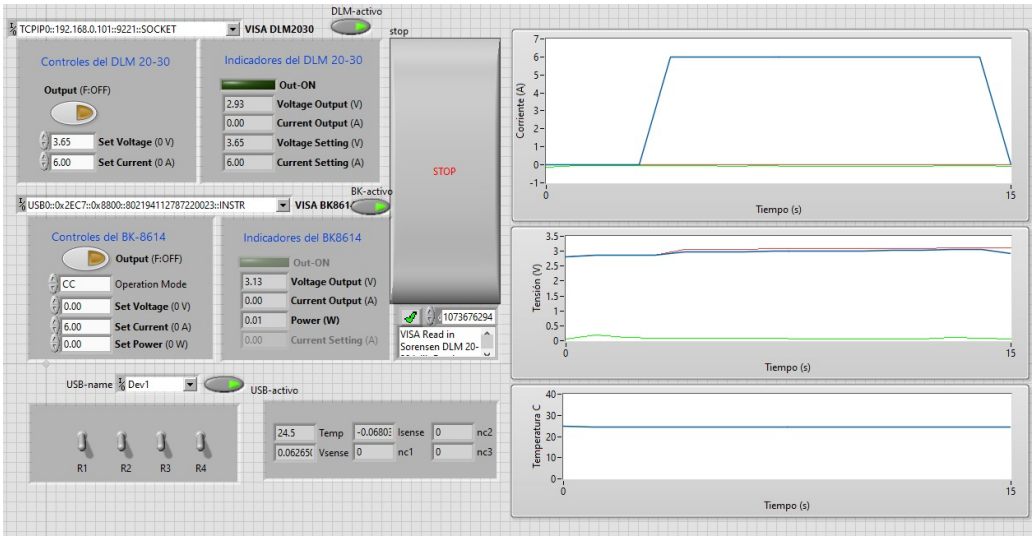


Fig. 4. Entorno de monitorización y control de la bancada de caracterización de baterías.

En cuanto a las herramientas informáticas empleadas durante el desarrollo del estudio, se utilizaron los siguientes programas:

- LabVIEW 2015 para el desarrollo del entorno de control y monitorización del banco de pruebas. Los datos obtenidos en las pruebas son exportados en formato Excel para su posterior análisis.
- Matlab 2023 para el procesamiento de los datos en formato Excel disponibles después de cada ensayo y la obtención de las gráficas descriptivas del propio ensayo.
- Advanced IP Scan para detectar la dirección IP de la fuente Sorensen DLM20-30. Esta herramienta facilita la identificación de dispositivos en la red.

El sistema de adquisición y control (SDAYC en lo que sigue por simplicidad) ha sido desarrollado utilizando el entorno de programación gráfica LabVIEW. Este entorno permite el control de la fuente de tensión y de la carga electrónica programable, supervisando los procesos de carga y descarga de la batería analizada como ejemplo de uso del sistema (LiFePo4 32700, 6000 mAh, 3.2 V). Además de su función de control, el SDAYC facilita la monitorización de las tensiones, corrientes y temperatura de la batería, contribuyendo a un seguimiento detallado de los parámetros relevantes durante las pruebas.

El sistema de conexiones empleado en los ensayos conecta a la batería que se va a analizar en paralelo con la fuente de tensión y la carga programable, mientras que el termopar se ubica en un punto intermedio en la carcasa externa de la batería, Fig. 3. En cuanto a la interconexión entre la fuente de tensión y el SDAYC, se implementa mediante una red de área local (LAN) con conectividad Ethernet, Fig. 3. El router cumple, en este contexto, la función de asignar dinámicamente una dirección IP a la fuente de tensión a través del protocolo de configuración dinámica de host (DHCP). Posteriormente, se emplea el programa IP Scanner con el propósito de escanear y reconocer la dirección IP asignada a la fuente. Esta información se incorpora en LABVIEW, estableciendo así la comunicación entre la fuente de tensión y el SDAYC. En lo que respecta a la carga programable y al Ni-USB681, ambos dispositivos mantienen una comunicación directa con el ordenador mediante la interfaz USB, siendo automáticamente detectados por el SDAYC.

Durante los procesos de carga y descarga de la batería, se capturan las corrientes a través de los sensores internos de corriente de la fuente de tensión (proceso de carga) y de la carga programable (proceso de descarga). En cuanto a la tensión, ésta se monitoriza utilizando el sensor de voltaje de la fuente DLM 20-30 que se ha configurado para medir la tensión existente en las bornas de la batería. Por otro lado, la temperatura de la batería se monitoriza empleando un termopar tipo K, que se conecta a una entrada analógica del dispositivo Ni-USB681.

V. Pruebas del sistema desarrollado

Para comprobar el correcto funcionamiento del banco de ensayos de baterías que se ha desarrollado, se han realizado diferentes pruebas para obtener algunos de los parámetros, como SOC y SOH, que caracterizan el estado de la batería analizada en nuestro caso de ejemplo. Para obtener una estimación de estos parámetros, se han realizado tres ensayos de carga y descarga de la batería.

El proceso de carga se realiza con un perfil estándar conocido como corriente de carga constante - tensión de carga constante (CC-CV) [13], que consiste en un primer estado de carga a corriente constante (CC), en el que la tensión de la batería va aumentando a medida que la misma acepta carga. Cuando la batería alcanza un cierto valor de tensión preestablecido, la carga continúa manteniendo constante la tensión (CV) lo que provoca que se vaya reduciendo la corriente de carga a medida que la carga de la batería se va completando. Este proceso culmina cuando la corriente alcanza un cierto umbral [14].

El proceso de descarga se realiza mediante corriente constante en los dos primeros ensayos, mientras que en el tercer ensayo se lleva a cabo con una corriente predefinida incorporando intervalos aleatorios de encendido y apagado. Estos intervalos aleatorios se definen dentro de un rango de tiempo preestablecido, con un límite mínimo y máximo. A lo largo de estos procedimientos, la tensión se mantiene prácticamente invariable durante la mayor parte de la descarga y cuando la tensión comienza a disminuir, se lleva a cabo una monitorización cuidadosa que interrumpe la descarga en el momento en que ésta alcanza el voltaje de corte de descarga.

La secuencia del primer ensayo (Figs. 5 y 6) es la siguiente:

1) Carga de la batería con un perfil CC-CV. Inicialmente con CC a una tasa de 1C (6A), hasta que la batería alcanza una tensión de 3.65V (voltaje máximo de carga). Posteriormente, se realiza una carga de tipo CV a 3.65V hasta que la corriente alcanza un umbral menor o igual a C/20, momento en que se procede a detener el proceso de carga, Fig 5.
2) Se exportan las tensiones y corrientes adquiridas de la fuente de tensión desde LabVIEW. Asimismo, se exporta la temperatura adquirida a través del instrumento Ni-USB681. Se utiliza el formato XLSX.
3) Se importan los archivos XLSX a MATLAB, procediéndose a su procesamiento para generar gráficos que muestren la evolución de la tensión, la corriente y la variación de temperatura durante el proceso de carga, todos en función del tiempo, Fig. 5.
4) Luego se ejecuta el proceso de descarga, utilizando una CC de 1C, hasta que la batería llega a una tensión de 2.5V (voltaje de corte de descarga), momento en que se procede a detener el proceso, Fig 6.
5) Desde LabVIEW se exportan en formato XLSX los valores monitorizados de tensión y corriente de descarga, así como la temperatura de la batería, que son posteriormente importados y procesados en MATLAB para la caracterización gráfica del proceso de descarga de la batería que se ilustra en la Fig. 6.

El segundo ensayo realizado es muy similar al anterior. Se lleva a cabo la misma secuencia de carga y descarga, con la diferencia de que en el paso 1 se realiza la carga con una corriente de 0.5C y en el paso 4 la descarga se lleva a cabo con una corriente de 0.5C. Los resultados obtenidos se muestran en las Figs. 7 y 8.

Por último, el tercer ensayo es similar al segundo con la diferencia de una descarga programada en el paso 4 a 0.5C, añadiendo además intervalos aleatorios de encendido y

apagado con períodos mínimos y máximos de 15 y 25 segundos, respectivamente, Figs. 9 y 10.

Los valores porcentuales del SOC durante la carga y descarga se calculan en MATLAB, utilizando el método de Coulomb, eq. (1), que evalúa la relación entre la capacidad de la batería en cada instante de tiempo durante el proceso de carga-descarga, así como la capacidad máxima alcanzada por la batería al finalizar el proceso. Esto permite obtener gráficas que representan las variaciones de la tensión durante la carga y descarga en relación con el estado de carga correspondiente. Asimismo, se determina el valor del SOH en cada ensayo utilizando la eq. (2), donde se establece la relación entre la capacidad máxima alcanzada por la batería y la capacidad nominal proporcionada por el fabricante. Los valores SOC y SOH obtenidos en cada ensayo realizado se muestran en la Fig. 11.

$$\text{SOC}\ (\%) = \left(\int_0^t i \cdot dt\right) \cdot \frac{100}{\int_0^{t_{final}} i \cdot dt} \tag{1}$$

$$\text{SOH}\ (\%) = \frac{\int_0^{t_{final}} i \cdot dt}{C_{nominal}} \cdot 100 \tag{2}$$

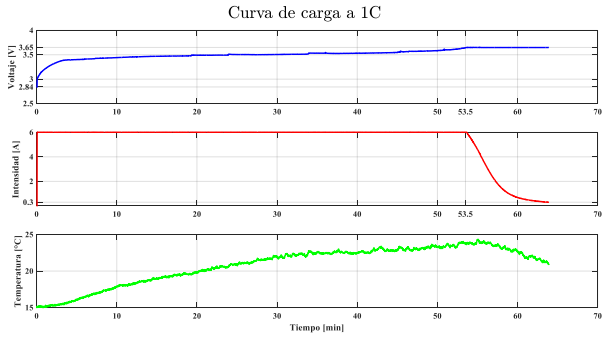


Fig. 5. Ensayo 1: Proceso de carga CC-CV (1C-3.65V).

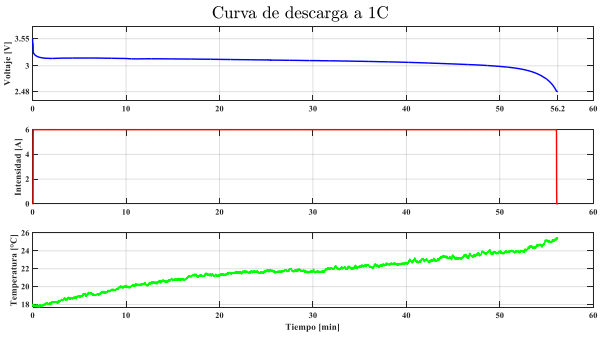


Fig. 6. Ensayo 1: Proceso de descarga CC (1C).

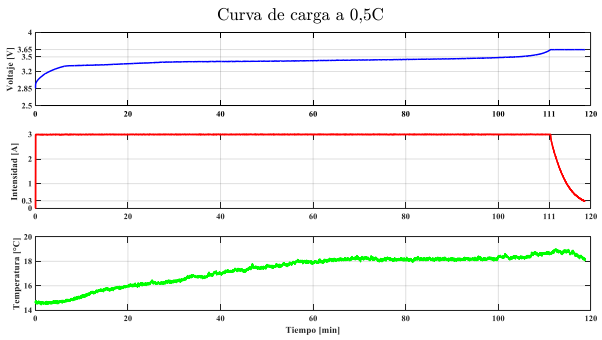


Fig. 7. Ensayo 2: Proceso de carga CC-CV (0.5C-3.65V).

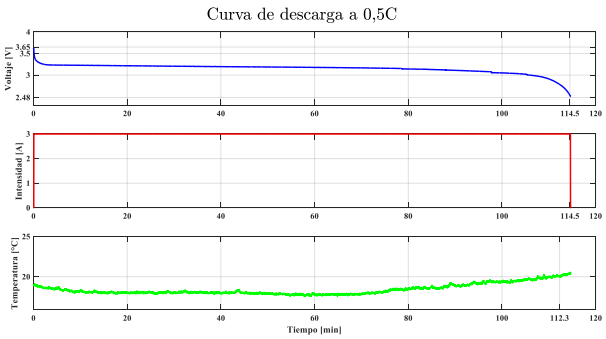


Fig. 8. Ensayo 2: Proceso de descarga CC (0.5C).

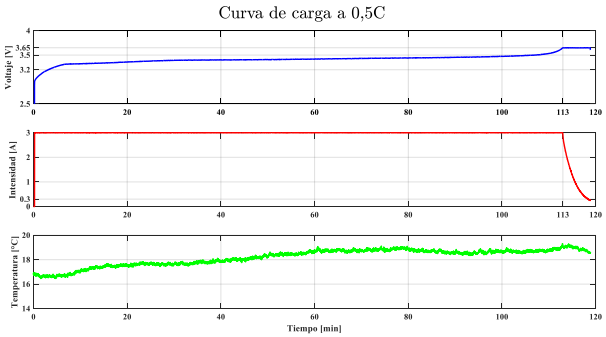


Fig. 9. Ensayo 3: Proceso de carga CC (0.5C).

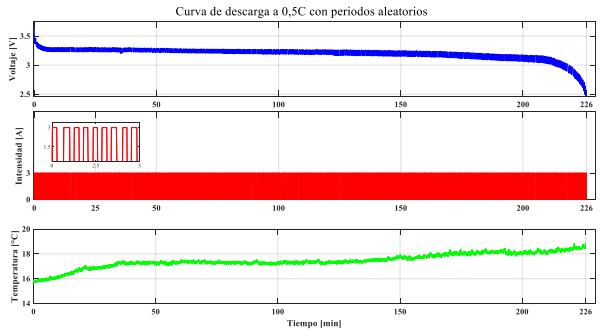


Fig. 10. Ensayo 3: Proceso de descarga con intervalos aleatorios (0.5C).

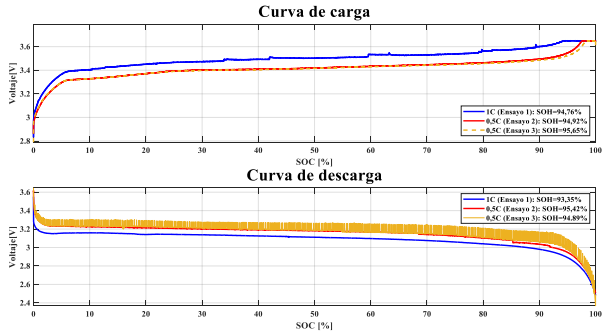


Fig. 11. Curvas de tensión de carga y descarga en funcion al SOC para las intensidades de corrientes fijadas en los ensayos.

VI. Conclusiones

En este trabajo se han descripto las principales características de una bancada de ensayos de baterías de litio o SDAYC que permite realizar operaciones programables de carga y descarga. El sistema desarrollado permite ilustrar el comportamiento de las baterías ensayadas, determinando los principales parámetros que evalúan la calidad de la batería, con el objetivo de obtener un sistema de ensayo y caracterización en el que los alumnos puedan monitorizar las variables de interés de una batería de litio, permitiendo así validar estudios teóricos relacionados con la gestión de

energía en vehículos eléctricos. Se espera que el sistema desarrollado facilite de manera significativa la docencia e investigación relacionadas con la gestión de la energía en el ámbito de la movilidad eléctrica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte de los proyectos TED2021-129558B-C22 (financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación Agencia Estatal de Investigación de España MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y también por Unión Europea NextGenerationEU/PRTR) y PID2021-125189OB-I00 (financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE Ministerio de Ciencia e Innovación, Agencia Estatal de Investigación de España y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional).

REFERENCIAS

[1] A. Stips, D. Macias, C. Coughlan, et al., "On the causal structure between CO2 and global temperature," Sci Rep Vol. 6, 2016.

[2] NOAA, NASA Goddart Institute for Space Studies.

[3] X. Sun, Z. Li, X. Wang, C. Li, "Technology Development of Electric Vehicles: A Review," Energies, Vol. 13, Iss. 1, 2020.

[4] W. Chen, J. Liang, Z. Yang, G. Li, "A Review of Lithium-Ion Battery for Electric Vehicle Applications and Beyond," Energy Procedia, Vol. 158, pp. 4363-4368, 2019.

[5] J. Deng, C. Bae, A. Denlinger, T. Miller, "Electric Vehicles Batteries: Requirements and Challenges", Joule, Vol. 4, Iss. 3, pp. 511-515, 2020.

[6] F. Colodro, J.L. Mora, F. Barrero, M.R. Arahal, J.M. Martinez-Heredia, "Analysis and simulation of a novel speed estimation method based on oversampling and noise shaping techniques," Results in Engineering, Vol. 21, 2024.

[7] D. Soto-Marchena, F. Barrero, F. Colodro, M.R. Arahal, J.L. Mora, "On-Site Calibration of an Electric Drive: A Case Study Using a Multiphase System," Sensors, Vol. 23, Iss. 17, 2023.

[8] M.R. Arahal, F. Barrero, M.G. Satué, M. Bermúdez, "Fast Finite-State Predictive Current Control of Electric Drives," IEEE Access, Vol. 11, pp. 12821-12828, 2023.

[9] M.G. Satue, M.R. Arahal, D.R. Ramirez, F. Barrero, "Multi-phase predictive control using two virtual-voltage-vector Constellations," Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Vol. 20, Iss. 4, 2023.

[10] M.R. Arahal, F. Barrero, M. Bermúdez, M.G. Satué, "Predictive Stator Current Control of a Five-phase Motor using a Hybrid Control Set," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 11, Iss. 2, pp. 1444-1453, 2023.

[11] W. Cai, Yu-Xing Yao, et al., "A review on energy chemistry of fast-charging anodes," Chemical Society Reviews, Vol. 49, Iss. 12, pp. 3806-3833, 2020.

[12] M.A. Hannan, M.M. Hoque, A. Hussain, Y. Yusof, P.J. Ker, "State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations," IEEE Access, Vol. 6, pp. 19362-19378, 2018.

[13] J. Rook, "LiFePO4 Design Considerations," Texas Instruments, 2020, https://www.ti.com/lit/an/sluaar1/sluaar1.pdf?ts=1709644472727#:~:text=However%2C%20LiFePO4%20batteries%20have%20a,a%20Li%2Dion%20may%20not.

[14] M. Bustillo, F. Calvello, J. Pérez, F. Arismendi, J. Carriquiry, M. Vignolo, "Segunda vida de celdas de LiFePO4 provenientes de un vehículo eléctrico," 1st Iberoamerican Workshop on Electromobility (IBEMOB 22), pp. 1-6, 2022.

[15] D.A. Pola, H.F. Navarrete, M.E. Orchard, R.S. Rabie, M.A. Cerda, B.E. Olivares, J.F. Silva, P.A. Espinoza, A. Perez, Particle-Filtering-Based Discharge Time Prognosis for Lithium-Ion Batteries With a Statistical Characterization of Use Profiles "Particle-Filtering-Based Discharge Time Prognosis for Lithium-Ion Batteries With a Statistical Characterization of Use Profiles," IEEE Transactions on Reliability, Vol. 64, Iss. 2, pp. 710-720, 2015.

10 años formando ingenieros/as en el Máster Universitario en Automatización, Electrónica y Control Industrial

Unai Hernandez-Jayo
Universidad de Deusto
48007 Bilbao (España)
Email: unai.hernandez@deusto.es

Javier Garcia-Zubia
Universidad de Deusto
48007 Bilbao (España)
Email: zubia@deusto.es

Ignacio Angulo-Martinez
Universidad de Deusto
48007 Bilbao (España)
Email: ignacio.angulo@deusto.es

Ignacio Garcia Quintanilla
Universidad de Deusto
48007 Bilbao (España)
Email: ignacio.jigarcia@deusto.es

Hugo Landaluce
Universidad de Deusto
48007 Bilbao (España)
Email: hugo.landaluce@deusto.es

Julio Revilla
Universidad de Deusto
48007 Bilbao (España)
Email: julio.revilla@deusto.es

Alberto Tellaeche
Universidad de Deusto
48007 Bilbao (España)
Email: alberto.tellaeche@deusto.es

Ana Macarulla
Universidad de Deusto
48007 Bilbao (España)
Email: ana.macarulla@deusto.es

Jose Angel Gutierrez
Universidad de Deusto
48007 Bilbao (España)
Email: joseangel.gutierrez@deusto.es

***Resumen*—Desde el curso 2015-16, 170 estudiantes han sido formados en el Máster Universitario en Automatización, Electrónica y Control Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Deusto. Con motivo de la celebración el próximo curso 24-25 del 10º aniversario de este postgrado, el claustro de profesores del máster firma el presente artículo como reconocimiento del trabajo de reciclaje y actualización constante de los contenidos y metodologías aplicadas en el proceso formativo de unas disciplinas técnicas en continua evolución y que demandan una adaptación permanente a las nuevas necesidades de la industria**

***Index Terms*—Automatización Industrial, Electrónica Industrial, Control Industrial, Máster Universitario.**

I. Introducción

El Máster Universitario en Automatización, Electrónica y Control Industrial (MUAECI, web del máster) se implanta en el curso 2015-16 como adaptación al nuevo marco académico del ya extinto 2º ciclo de Ingeniero en Automática y Electrónica Industrial ofrecido por la propia Universidad de Deusto y que formó durante más de una década profesionales con un alto grado de empleabilidad y de satisfacción. Se trata un máster de 60 ECTS impartido en 2 semestres, en donde el primer semestre tiene una mayor carga docente, dejando para el segundo semestre las asignaturas de prácticas en empresa (6ECTS) y trabajo fin de máster (6ECTS).

En el presente artículo los autores (el claustro de profesores del máster), queremos hacer un repaso de las principales aportaciones y metodologías docentes que aplicamos de una manera conjunta y coordinada en la docencia del máster, siendo la principal característica el alto contenido práctico de las asignaturas y la coordinación entre ellas para centrar el aprendizaje en el alumno mediante el desarrollo de proyectos combinados. Actualmente, exceptuando las asignaturas de prácticas en empresa, seminarios de investigación o proyecto fin de máster, todas las asignaturas menos una (9/10) se imparten íntegramente en los laboratorios de la facultad

Uno de los principales pilares del máster es la coordinación existente entre todos los profesores, labor realizada desde la primera edición por la dirección del máster. Desde el diseño del máster se estableció la necesidad de dar un enfoque práctico y colegiado a todas las asignaturas. El objetivo es que los estudiantes desarrollen las competencias técnicas del máster combinando en diferentes proyectos los conocimientos que van adquiriendo en las diferentes asignaturas. Así, a modo de ejemplo, las asignaturas de Robótica industrial y Visión artificial que se imparten en el primer semestre, teniendo cada una su programa y sistema de evaluación, comparten un proyecto en el que los estudiantes en equipos de 3 o 4 personas deben dar solución a un proyecto práctico real en el que combinan los conocimientos de ambas disciplinas. Este proceso se replica en otros 4 escenarios o proyectos reales en los que se combinan el resto de asignaturas del máster, utilizando siempre laboratorios dotados de equipos industriales y no meramente didácticos. Los equipos de trabajo se mantienen en todos los PBLs durante todo el curso.

II. Breve descripción del MUAECI

El MUAECI ha hecho suyo el lema ”Learning by Doing”de modo que nuestro compromiso con los estudiantes y las empresas es que una vez finalizado el máster, los estudiantes saben desarrollar proyectos de ingeniería en el ámbito

de la automatización, la electrónica o el control industrial, incluyendo la robótica como un área de aplicación de estas tecnologías. Para ello es necesario una inmersión profunda en cuanto a tiempo y conocimientos en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería destinados al máster. Así, tal y como se indicaba en la introducción, prácticamente todas las asignaturas se imparten directamente en los laboratorios, cuyo equipamiento se actualiza de manera regular de acuerdo a las necesidades tecnológicas requeridas por los profesores. Los laboratorios de los que consta el máster son:

- Laboratorio de Robótica y Visión, en el cual se imparten las asignaturas de Robótica industrial y Visión artificial, ambas del primer semestre (S1)
- Laboratorio de fabricación inteligente, laboratorio en donde se desarrolla el proyecto conjunto de las asignaturas de Automatización para industrias de proceso continuo y discreto y Redes de comunicación industriales (S1), y a partir del curso que viene se integran también las asignaturas de Robótica industrial y Visión artificial
- Laboratorio de control industrial, en donde se trabaja la asignatura de Control industrial aplicado (S1)
- Laboratorio de automatización y redes industriales, donde se imparten las asignaturas de Automatización para industrias de proceso continuo y discreto y Redes de comunicación industriales (S1)
- Laboratorio de electrónica de potencia y máquinas eléctricas, dedicado a las asignaturas de Sistemas electrónicos de potencia y Control en tiempo real de dispositivos industriales, ambas del semestre 2 (S2)
- Laboratorio de electrónica digital dedicado a las asignaturas de Diseño avanzado de sistemas digitales (S1) y Sistemas embebidos avanzados (S2)

Como se pude extraer del listado anterior, es el primer semestre en donde hay una carga lectiva más intensa. Esto se debe a que es durante el S2 en el que los estudiantes compaginan la asistencia a clase con las prácticas en empresa y el desarrollo del TFM, junto con la asignatura de Control avanzado y multivariable que no tiene un laboratorio específico asignado.

Mención especial tienen también las prácticas en empresa en el contexto del MUAECI. Se trata de una asignatura que si bien se realiza en el S2, su gestión comienza en octubre-noviembre del S1, ya que se realiza una búsqueda de prácticas personalizada para cada estudiante según la rama tecnológica del máster en la que quieran profundizar. Así, desde la coordinación del máster nos encargamos de enviar los CVs de los estudiantes a aquellas empresas que colaboran con la Facultad de Ingeniería de modo que, tras el proceso de selección que la empresa estime oportuno, el estudiante elegido se incorpora a la empresa entre los meses de enero o febrero. Lo frecuente además es que durante las prácticas en empresa (generalmente remuneradas) los estudiantes puedan también desarrollar su Trabajo Fin de Máster, dando por concluido el máster entre los meses de junio o julio.

En las siguientes secciones se describen los proyectos finales combinados que se desarrollan en cada una de las asignaturas del máster.

III. Robótica Industrial y Visión Artificial

El proyecto final o PBL que se explica en esta sección corresponde con el realizado en las asignaturas de Robótica Industrial y Visión Artificial, ambas encuadradas en la materia de Automatización Industrial. La asignatura de Robótica Industrial tiene por objetivo, entre otros, desarrollar aplicaciones basadas en la utilización robots industriales en escenarios de fabricación avanzada, que incorporen los mecanismos de comunicación necesarios para llevar a cabo tareas que cooperan en tiempo real e interactúan con otros elementos. Este objetivo se trabaja con los alumnos utilizando dos células robóticas equipadas con dos robots industriales reales, en las que el estudiante desarrollará la programación de los mismos aplicando los conceptos teóricos adquiridos previamente en el aula, creando las soluciones requeridas para los proyectos propuestos en la asignatura. Por otra parte, la asignatura de Visión Artificial tiene por objetivo principal, desarrollar aplicaciones informáticas tanto sobre ordenadores industriales, como autómatas u otros controles programables en escenarios industriales de fabricación, principalmente para la solución de aplicaciones de control de calidad o medición industrial. En esta segunda asignatura el estudiante utiliza sistemas de visión artificial industrial, compuestos por cámaras, luces, comunicaciones, unidades de procesamiento (PCs) y software, desarrollando algoritmos avanzados de extracción de información a partir de imágenes. De manera más concreta, los objetivos formativos de ambas asignaturas se articulan en base a competencias genéricas y específicas, siendo en el caso de la asignatura de Robótica Industrial las siguientes:

- Competencia Genérica 1: Identificar, analizar y definir los elementos que constituyen un problema para resolverlo con criterio y de forma efectiva, proponiendo soluciones que puedan ser contrastadas en equipo y aplicadas en el ámbito de la automatización, electrónica y control industrial a partir de los datos obtenidos.
- Competencia Específica 1: Programar y planificar aplicaciones industriales de manipulación robótica en diferentes escenarios industriales.
- Competencia Específica 2 Integrar robots y manipuladores industriales con sistemas de visión artificial en plantas de fabricación avanzada.

De igual manera, las competencias definidas en la asignatura de Visión Artificial son:

- Competencia genérica 1: Identificar, analizar y definir los elementos que constituyen un problema para resolverlo con criterio y de forma efectiva, proponiendo soluciones que puedan ser contrastadas en equipo y aplicadas en el ámbito de la automatización, electrónica y control industrial a partir de los datos obtenidos.
- Competencia específica 1: Desarrollar aplicaciones de visión artificial para la mejora y control de procesos industriales.

- Competencia específica 2: Integrar sistemas de visión artificial en aplicaciones robotizadas en plantas de fabricación avanzada

Como se puede observar a partir de las competencias específicas de ambas asignaturas, se especifica de manera clara la integración de ambas tecnologías como uno de los principales objetivos formativos.

III-A. Proyecto propuesto

En el ámbito de la automatización industrial actual, la robótica y la visión artificial resultan dos tecnologías plenamente complementarias, y por lo tanto el máster se ha planificado para poder llevar a cabo la integración de ambas en un proyecto final.

La idea principal del proyecto planteado es simular una instalación automatizada de inspección de calidad de piezas de automoción. Desde esta premisa, el robot industrial manipula las piezas a analizar, las presenta de manera controlada a un sistema de visión artificial para su inspección, y finalmente, una vez que la pieza ha sido inspeccionada, la clasifica en diferentes localizaciones dentro de la celda robótica automatizada dependiendo del estado de la misma (pieza correcta, un error, dos errores, tipo de error, ...)

El robot empleado durante la asignatura y en este proyecto es el Kuka KR6-2 con el controlador KRC4 (Figura 1), mientras que desde el punto de vista de la visión artificial se utiliza una cámara matricial Dalsa Genie C1280, con conexión gigabit Ethernet y utilizando una óptica de 50 mm, junto con la instalación de una luz difusa para iluminar sin brillos la cara interior de la pieza de automoción a inspeccionar.

La pieza a inspeccionar es una pieza de automoción cuya cara interna se puede observar en la Figura 2. El objetivo final de control de calidad es la identificación de tres símbolos en su cara interna: el 00, el 01 y el número de serie de 8 dígitos que se encuentra próximo al centro de la pieza y que es necesario leer mediante identificación OCR (Optical Character Recognition).

Este proyecto presenta al estudiante los siguientes retos que ayudan a su formación:

- Comunicación por TCP/IP para la sincronización de ambos sistemas: el controlador del robot y el sistema de visión artificial.
- Configuración conjunta y desarrollo de soluciones pensadas para su correcta integración tanto en la vertiente de robótica como de visión artificial.
- Control en tiempo real de la inspección que se está realizando. Identificación de errores y control de la completa inspección de la pieza.

La principal ventaja que aporta este proyecto es que el alumnado se enfrenta a la problemática asociada a una instalación que se asemeja a las instalaciones reales, en las cuales hay que considerar muchos factores extra a parte de los específicos de ambas disciplinas que se integran. Desde este punto de vista a parte de aprender el desarrollo de algoritmos de visión artificial o de desarrollar mediante programación offline soluciones robóticas, el alumno también integra conocimientos de calidad en procesos industriales, sincronización de diferentes tecnologías o requerimientos de velocidad de procesamiento.

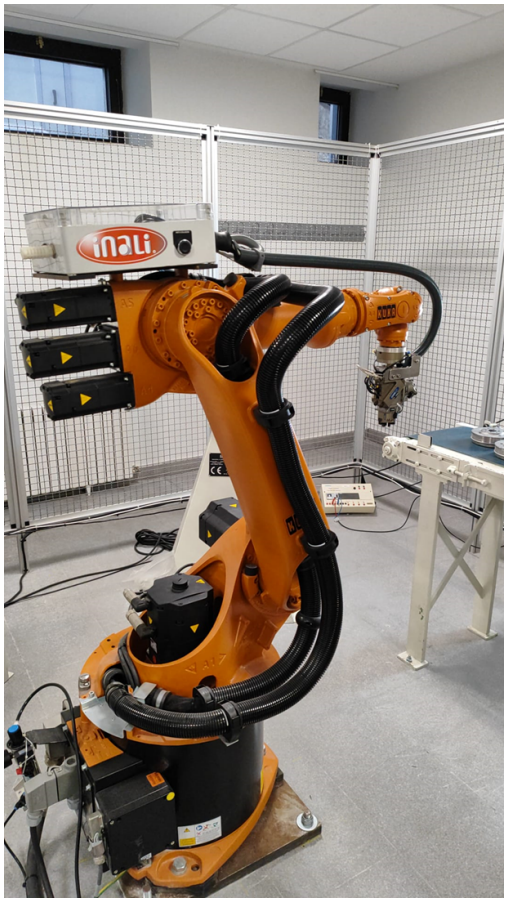


Figura 1. Robot industrial KUKA KR6-2

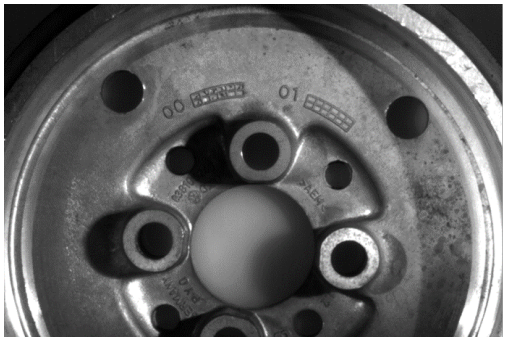


Figura 2. Ejemplo de pieza a inspeccionar durante el proceso

Los resultados de estos últimos años atestiguan que este tipo de proyectos ayudan a los alumnos a integrar los conocimientos adquiridos a lo largo del máster de manera efectiva, y que resultan altamente efectivos para su formación práctica interdisciplinar como ingenieros superiores. De este modo los alumnos tienen que demostrar la capacidad de relacionar conceptos y disciplinas dentro del ámbito de la ingeniería electrónica industrial y automática.

IV. Automatización para industrias de proceso continuo y discreto y Redes de comunicación industriales

Las asignaturas Automatización para industrias de proceso continuo y discreto y Redes de comunicaciones industriales, que se imparten en el primer semestre, teniendo cada una su programa y sistema de evaluación, proponen un PBL conjunto denominado Automatización y visualización de una línea de ensamblado de un dispositivo electrónico. En este proyecto, los estudiantes deben trabajar en equipos de 4 personas (mismo equipo que se utiliza en el PBL de Robótica y Visión) para dar solución a un proyecto práctico real, con equipamiento industrial, en el que se combinan los conocimientos de ambas disciplinas.

La asignatura Automatización Para Industrias de Proceso Continuo y Discreto se encuadra en la materia de Automatización Industrial que tiene por objetivo, entre otros, diseñar, desarrollar e implementar estrategias de control automático inteligente del ámbito de la fabricación avanzada, que trascienden a las que usualmente se aplican en control de procesos. Esta asignatura se centra en el estudio de las tecnologías avanzadas de automatización en procesos discretos y continuos aplicados a la industria. Pretende, por tanto, que el estudiante diseñe, programe e interprete procesos de automatización industrial basados en el uso e integración de las tecnologías de automatización de los procesos continuos y discretos en sistemas de fabricación avanzados. Para satisfacer este objetivo, los estudiantes tienen que desarrollar las siguientes competencias, las cuales se encuentran diferenciadas entre genéricas y específicas:

- Competencia Genérica: Utilizar el aprendizaje de manera estratégica y flexible en función del objetivo perseguido en el ámbito de la ingeniería en automatización, electrónica y control industrial, integrando diversas teorías o modelos y haciendo una síntesis personal y creativa adaptada a las propias necesidades profesionales.
- Competencia Específica 1: Diseñar, programar e implementar automatismos industriales centralizados o distribuidos en procesos continuos y discretos
- Competencia Específica 2: Integrar procesos continuos y discretos en un sistema de fabricación avanzado.

Siguiendo el modelo Modelo de Aprendizaje de la Universidad de Deusto (MAUD) las clases en aula, junto con el trabajo personal de estudio del estudiante, constituyen la fase de conceptualización. Las fases de observación reflexiva y experimentación activa tienen lugar durante las clases prácticas y durante el trabajo del estudiante fuera de su horario lectivo en el que el laboratorio está a su disposición. Así pues, las técnicas empleadas en el aula son:

- Exposición del profesor complementando el contenido de los apuntes con explicaciones acerca de las características y funcionamiento de los sistemas y técnicas de automatización industrial, sus elementos HW y SW, y los aspectos teóricos para facilitar su implementación en el PLC. Se presentan los conceptos teóricos de los PLCs actuales, sus herramientas más comunes, señales analógicas y su tratamiento y funcionalidades para controlar procesos discretos, como el GRAFCET, o continuos como funciones PID u otros lazos de control.
- Prácticas de laboratorio planteadas y orientadas al desarrollo del proyecto PBL. Este proyecto consiste en automatizar una instalación de ensamblado formada por varias estaciones de trabajo. Las primeras prácticas de los estudiantes consisten en controlar cada una de estas estaciones de trabajo de forma individual e independiente utilizando un sistema Hardware-In-the-Loop (HIL) constituido por un PLC S7-1500 y la simulación de las estaciones en tiempo real desde el software Ciros.

Una vez realizadas las implementaciones de las estaciones simuladas, los estudiantes se juntan en grupos e integran los desarrollos realizados en proyectos de grupo para pasar a trabajar con las estaciones reales en la CP-L

IV-A. Descripción de la Maqueta CP-LAB

La maqueta CP-Lab es una fábrica didáctica y una instalación industrial de última generación (Figura 3). Permite la ejecución de procesos de fabricación digital completamente automatizados que optimizan la eficiencia y rentabilidad del proceso. Esto prepara a los estudiantes para las demandas del mundo laboral, con una alta demanda de profesionales capaces de mejorar la eficiencia de los procesos productivos por medio de la automatización.

La CP-Lab representa una colaboración entre el claustro de profesores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Deusto, con especialización en automatización, electrónica y control industrial, con empresas líderes en equipamiento industrial, como Festo Automation, Kuka Robotics o Siemens. El resultado es una instalación diseñada para llevar a cabo un proceso de ensamblado de un dispositivo electrónico completamente automatizado. El equipamiento incluido se ha concebido para validar el impacto de las nuevas tecnologías en el ámbito industrial, integrando los diferentes niveles de la pirámide de la Industria 4.0, tanto las tecnologías operativas (OT) como de la información (IT)

A continuación, se presentan los principales módulos hardware incluidos en esta avanzada instalación:

- Ocho procesos de ensamblado y monitorización completamente automatizados, que abarcan módulos de manipulación, almacén apilador, taladrado, inspección de calidad, prensa y dispensación. Todos ellos montados sobre una base común que incorpora tecnología RFID para garantizar la trazabilidad de la producción de los diferentes dispositivos o piezas de trabajo.
- Una célula robotizada flexible que se encarga de la dispensación de la tarjeta del circuito impreso, el ensamblado de los componentes electrónicos y la supervisión de su correcto funcionamiento. Esta célula incorpora un robot industrial de 6 ejes y una cámara de visión artificial para ajustar los agarres del robot al posicionamiento de los diferentes elementos con los que el robot debe operar.

Figura 3. Estación CP-Lab

La maqueta también incluye un sistema de gestión de la producción Management Execution System (MES) que permite coordinar la entrada de pedidos y materias primas con la disponibilidad de los diferentes equipos de producción, extraer información de las células de fabricación en tiempo real, y configurar las instrucciones operativas para los puestos de trabajo. Además, también se dispone de un modelo idéntico digitalizado en el software Ciros, que permite al estudiante interactuar con el sistema, y aprender a operarlo antes de acceder a las estaciones reales. De esta forma, el estudiante puede analizar el comportamiento de las diferentes estaciones en diversas situaciones, y mejorar su rendimiento y eficacia simulando cambios en la configuración, garantizando así la seguridad de los equipos.

IV-B. Proyecto propuesto

El estudiante aplica los conocimientos y habilidades adquiridos mediante la realización de estos proyectos de forma grupal. Mediante este PBL se pretende que el estudiante automatice un proceso discreto y sea capaz de diseñar el control secuencial de las diferentes estaciones, las cuales contienen problemáticas diversas, como estructuras lineales, exclusivas o concurrentes. Se pretende que el estudiante sea capaz de configurar y trabajar con equipamiento industrial y que se enfrente a las problemáticas que estos equipamientos presentan.

Por ello, el PBL se compone de una primera fase en la que los alumnos deben implementar el funcionamiento de al menos 3 estaciones individualmente, mediante simulación. Y una vez en funcionamiento, los estudiantes pasan a trabajar en grupo con la maqueta real.

Los resultados de aprendizaje de este PBL son los siguientes:

- RA1: Configura un hardware de PLC complejo con E/S remotas y tarjetas de comunicaciones externas.
- RA2: Comprende los modos de funcionamiento de un equipamiento industrial: manual/automático, local/remoto, emergencia/rearme.
- RA3: Identifica la tipología de los diferentes procesos secuenciales, tanto para proceso continuo como discreto.
- RA4: Conoce las herramientas más comunes en la industria para implementar lazos de control mediante PLC.
- RA5: Aporta soluciones innovadoras que añaden funcionalidades o nuevas utilidades sobre procesos existentes.

V. Control Avanzado y Multivariable

Control Avanzado y Multivariable se trata de la asignatura con menor carga docente del máster, constando unicamente de 3 ECTS frente a los 5 ECTS del resto. Se suma a esta circunstancia que la procedencia de los estudiantes es muy variada y la ingeniería de control es una disciplina muy transversal que se mueve entre la ingeniería, la física y las matemáticas. Las competencias asignadas a esta asignatura son la específica (CE17) “Diseñar controladores para sistemas complejos, multivariables y no lineales” y la genérica (CG3) “Comunicarse eficazmente con otras personas a través de la expresión clara de lo que se piensa sobre cuestiones y conceptos relacionados con la ingeniería de automatización, electrónica y control industrial”. Dado el carácter de la competencia específica y los contenidos necesarios para su desarrollo, se ha optado por implementar una estrategia que combina por una parte la metodología clásica, que intercala la clase expositiva con la realización de ejercicios y resolución de problemas, con la formulación de un proyecto de simulación a desarrollar en equipos de 4 personas, los cuales son los mismos que en el resto de proyectos combinados que se trabajan en el máster.

V-A. Proyecto propuesto

El objetivo final del proyecto es diseñar un observador multivariable para un proceso industrial no lineal: un reactor continuo tipo tanque perfectamente agitado (CSTR) en el entorno MATLAB/Simulink adaptado de [1]. El proyecto se desarrolla en 4 fases consecutivas:

- Implementación del modelo no lineal del proceso
- Linealización en un punto de operación
- Transformaciones lineales para la obtención de las formas canónicas controlable y observable
- Diseño e implementación de un observador de estado

Cada fase del proyecto tiene un enunciado con las indicaciones de lo que se debe desarrollar y una rúbrica de evaluación, que incluye los indicadores de evaluación de cada competencia y los descriptores de su nivel de desarrollo (a modo de ejemplo se muestra la rúbrica de evaluación de la fase 1, en la Tabla 1).

En la primera fase del proyecto los estudiantes elaboran una memoria descriptiva que incluya la descripción de la implementación del modelo, los ensayos realizados para el análisis del comportamiento del sistema de acuerdo a las indicaciones del enunciado, los resultados obtenidos y un breve apartado de conclusiones. Con la retroalimentación recibida de la profesora, los estudiantes realizarán las modificaciones necesarias tanto en el modelo como en la memoria descriptiva y abordan la fase 2. No hay una memoria nueva, sino que se añaden los nuevos desarrollos, resultados y conclusiones.

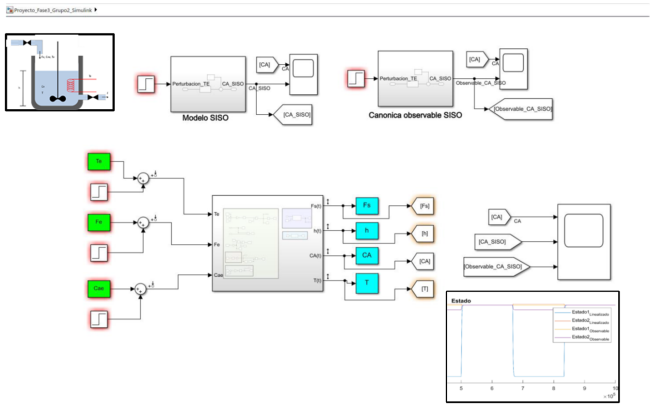


Figura 4. Ejemplo de implementación de la fase 3

De forma análoga se desarrollan las fases 3 y 4. Asimismo, cada fase, además de enunciado propio, presenta una rúbrica de evaluación propia.

Durante el desarrollo del proyecto las señales de entrada son el caudal volumétrico de fluido entrante, la concentración molar de un componente A en dicho caudal, la temperatura del fluido entrante y la temperatura del refrigerante del sistema de refrigeración. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del reactor son:

- Balance del componente A
- Balance energético
- Caudal de salida del tanque
- Volumen de reacción

Se facilita también al estudiante los parámetros que caracterizan al proceso para que los implemente en un script de MATLAB, de forma que cualquier modificación de las características del reactor se pueda hacer de forma sencilla, o incluso se pueda disponer de diferentes reactores en diferentes puntos de operación sin necesidad de modificar el modelo principal.

Para la fase 3 del proyecto los estudiantes han de desarrollar los algoritmos que, a partir del modelo lineal obtenido en la fase 2, realicen las transformaciones propias para disponer de una forma canónica observable que permita en la fase 4 "observar" alguno de los estados. En la Figura 4 se muestra un ejemplo de la implementación de la fase 3 y algunos resultados de simulación.

Las señales de entrada, en la primera implementación son constantes (Te, Tr, Fe Cae) y definen el punto de operación principal, y sobre dicho punto se añaden variaciones para poder comprobar la respuesta del sistema original y de los modelos linealizados.

A modo de conclusiones se puede indicar que desde el punto de vista de los estudiantes ésta resulta una asignatura "diferente" a las del resto del máster, ya que incluye teoría de control nueva, de difícil interpretación en un contexto industrial real. El volver a estudiar y resolver problemas de cierta complejidad matemática genera cierta reacción negativa. Por el contrario, cuando empiezan a trabajar sobre el proyecto, la actitud cambia, porque les permite ver cómo lo estudiado anteriormente adquiere cierto sentido. Por la circunstancia particular de la asignatura, con una base teórico-conceptual de peso, esta experiencia se podría más describir como una experiencia en la que el estudiante implementa los aprendizajes realizados en un proyecto de aplicación, siendo el proyecto más una herramienta de consolidación del aprendizaje que lo que define propiamente a la metodología de aprendizaje basado en proyectos. A pesar de ello, la formulación abierta del proyecto propuesto les permite explorar e identificar distintas herramientas y proponer diferentes soluciones a un proyecto común, y es ahí donde se pone de manifiesto que el proyecto es uno de los principales instrumentos para favorecer el aprendizaje autónomo y creativo, donde los estudiantes, además, ejercitan actitudes de colaboración y reflexión asociadas a esta metodología.

VI. Diseño Avanzado de Sistemas Digitales y Sistemas Embebidos Avanzados

La asignatura de Diseño Avanzado de Sistemas Digitales (DASD) se encuadra en la materia de Electrónica Industrial. Esta asignatura se relaciona directamente con la asignatura de Sistemas Embebidos Avanzados (SEA), y ambas tiene como objetivo principal el desarrollo de sistemas centrados en SoCs (System-on-a-Chip). Un SoC es un sistema complejo que integra y aúna el potencial de dos enfoques de diseño electrónico: microprocesadores programados en C y FPGA en VHDL. En el caso concreto de ambas asignaturas se usan SoC de Xilinx/AMD, y concretamente en el curso 2023-2024 se ha utilizado la PYNQ Z2 desarrollada por TUL, Technology Un-Limited (https://www.tulembedded.com/FPGA/ProductsPYNQ-Z2.html) Las dos asignaturas se imparten en dos semestres distintos. La asignatura de DASD tiene como objetivo principal que el alumno diseñe proyectos básicos a bajo nivel que integren ARM/C con FPGA/VHDL, siendo el punto principal el diseño y consumo de IPs custom y proporcionados de fábrica por parte de los alumnos. En SEA, el alumno diseña sistemas que ahora son gestionados a alto nivel, siendo Linux el principal gestor de los IPs y usando Internet como un recurso más del diseño. Cabe decir que existe muy poco material práctico para formación en SoC. Los materiales de esta asignatura se encuentran en la plataforma Moodle de las asignaturas. Las competencias de las asignaturas son:

- CE13: Diseñar sistemas digitales avanzados basados en dispositivos lógicos configurables tipo FPGA mediante un lenguaje de descripción hardware
- CE14: Diseñar sistemas digitales basados en multiprocesadores y FPGA con lenguajes de descripción hardware y herramientas CAE.

Los resultados de aprendizaje se centran en saber diseñar e implementar sistemas digitales en SoC, trabajando bajo un enfoque PBL. En el caso particular de DASD, el PBL se plantea de forma muy sencilla a lo largo del curso:

- Iniciación y uso de un SoC: PYNQ Z2 y la plataforma Vivado/Vitis.

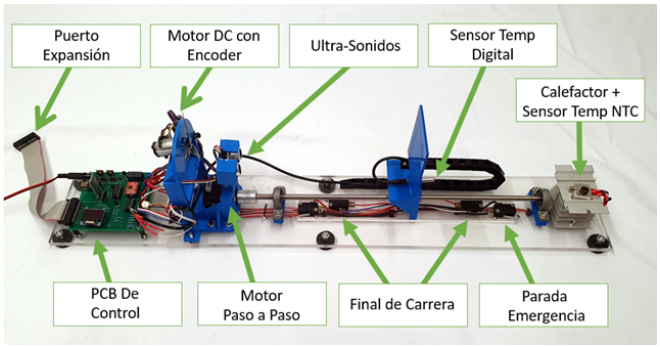


Figura 5. Maqueta utilizada durante el proyecto

- Pequeños diseños basados en ARM/C y en FPGA/VHDL
- Diseño en Vivado y consumo en Vitis de IPs básicos
- Diseño en Vivado y consumo en Vitis de IPs propios de Xilinx/AMD centrados en comunicaciones industriales: I2C, UART, etc.
- Diseño en Vivado y consumo en Vitis de IPs de control de sensores y actuadores.
- Diseño integrado entre Matlab y Vivado/Vitis: controlador PI.
- Implementación de un proyecto final utilizando la maqueta da Figura 5 [2]

El desarrollo del proyecto conjunto es bien sencillo: cada semana se desarrollan IPs que luego formarán parte del proyecto final. Es decir, el proyecto final será la unión, más o menos compleja según el grupo, de los IPs ya desarrollados.

Mención especial tiene la relación de esta asignatura con otras, ya que un máster no debe presentar solo ciertas tecnologías de forma aislada, sino que debe integrar unas con otras, como se da en la práctica laboral industrial. DASD tiene una conexión directa con dos asignaturas. Por un lado la asignatura Comunicaciones Industriales explica al alumno diferentes protocolos de comunicación y los usan en aplicaciones industriales tipo SCADA, pero esta misma formación sirve para que en DASD, el alumno implemente estos protocolos como IPs de distintos dispositivos. Por ejemplo, se consume un OLED bajo I2C, se diseña una aplicación para móvil empleando UART/Bluetooth o se utiliza una sonda industrial de temperatura bajo protocolo 1-wire.

Por otro lado, los alumnos diseñan el IP de un controlador PI para un motor DC controlado por PWM. Este diseño tiene tres partes fundamentales: modelización de cada motor DC concreto de cada alumno en Matlab, diseño del regulador PI en Matlab e integración y consumo del mismo en el entorno Vivado/Vitis. Esta es una práctica compleja que permite al alumno ver y aprovechar el esfuerzo que distintas compañías industriales hacen por cooperar entre sí.

La secuencia temporal de la asignatura se divide en dos partes: formación individual unas 9-10 semanas y proyecto final en grupo unas 4-5 semanas. La evaluación del proyecto final consta de dos partes: individual y grupal, y además incluye la competencia transversal de trabajo en grupo.

Tabla I
RESULTADOS DE SATISFACCIÓN MUAECI 2020-2023

Pregunta	Curso 22/23	Curso 21/22	Curso 20/21
Plan de estudios y su estructura	3,77	3,67	4,17
Adecuación de los procedimientos y criterios de evaluación	3,77	4,23	4,39
Grado de coordinación de las asignaturas	4	4,23	4,44
Adaptación del programa al perfil profesional y/o académico	4,46	4,38	4,50
Calidad docente del profesorado	4,08	4,23	4,56
Metodología de docencia/aprendizaje	3,85	4,25	4,39
Calidad de la atención del profesorado	4,54	4,38	4,72
Espacios de trabajo	4,31	4,58	4,76
Satisfacción global del máster	4,15	4,36	4,56

Los alumnos expresan satisfacción general con a asignatura y en especial con el enfoque PBL, sin embargo indican que no pocas veces la asignatura cubre muy distintos aspectos y dispositivos lo que complica su seguimiento. Las indicaciones más claras por parte de los alumnos de este curso 2023-2024 van a marcar la reorganización de la asignatura simplificando el desarrollo de la misma y su documentación, de manera que el trabajo esté más centrado en la maqueta, que deberá ser rediseñada en términos de hardware.

VII. SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA Y CONTROL EN TIEMPO REAL DE DISPOSITIVOS INDUSTRIALES

El proyecto en el que trabajan los estudiantes en estas dos asignaturas del segundo semestre, fue presentado con anterioridad en el XIV Congreso TAEE por los profesores encargados de las asignaturas [3].

VIII. SATISFACCIÓN DE LO ESTUDIANTES

Dentro del proceso de calidad de la Universidad de Deusto, los estudiantes al finalizar los estudios de postgrado deben completar una encuesta en la que reflejan su opinión sobre los estudios cursados. A continuación en la Tabla I se presentan los resultados obtenidos por el MUAECI durante los cursos 20/21 (20 alumnos matriculados), 21/22 (22 alumnos) y 22/23 (15 alumnos)

Como se puede observar en las puntuaciones obtenidas (sobre 5), la satisfacción general de los estudiantes a lo largo de las tres últimas ediciones del MUAECI es elevada, estando siempre por encima de 4. Destacamos también la puntuación obtenida en cuando a calidad del profesorado y los espacios de trabajo, siendo los medios humanos y materiales más importantes para asegurar la satisfacción de los estudiantes. También importante destacar en los últimos 3 años los estudiantes también valoran muy positivamente la coordinación entre las asignaturas, lo cual, tal y como se ha visto en las descripción de los proyectos incluidos en este artículo, es fundamental para

que los alumnos tengan claros los objetivos, fases y resultados a obtener en cada uno de ellos.

IX. Conclusiones

El artículo aquí presentado introduce de manera general los proyectos de las principales asignaturas del Máster Universitario en Automatización Electrónica y Control Industrial de la Universidad de Deusto. La metodología está basada en el aprendizaje basado en proyectos, la cual se utiliza en todas las asignaturas del máster con el objetivo de que los estudiantes pongan en práctica de manera combinada los conocimientos de todas las materias en el desarrollo de proyectos reales. Se aporta también un resumen del nivel de satisfacción de los estudiantes de los últimos 3 años. A la vista de estos resultados creemos que la metodología seguida está bien valorada por los alumnos, lo que nos invita a seguir con la misma en las siguientes ediciones del máster, el cual cumple 10 años el próximo curso 24/25.

Agradecimientos

Referencias

[1] Peña E, Pérez AR, Miranda AJ, Sánchez JH. *Modelado de un reactor químico tipo CSTR y evaluación del control predictivo aplicando Matlab-Simulink*. Ingenieria Uc. 2008

[2] Javier García-Zubía, Ignacio Angulo Martínez, Javier Vicente Sáez, *Maqueta open hardware para asignaturas de electrónica programable*. Actas del XV Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica, TAEE 2022, Teruel

[3] Unai Hernández-Jayo, Ignacio García Quintanilla, *Ejemplo de aplicación del concepto Aprendizaje Basado en Proyectos en estudios de Máster* Actas del XIV Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica, TAEE 2020, Oporto.

PÓSTERES 1 – SESIÓN DE PÓSTERES

Sonda espacial para búsqueda de mundos habitables.

José Luis Rodríguez-Fernández
Dep. Electrónica
IES Escolas Proval
Nigrán, España
chechu@edu.xunta.gal

Javier Diz-Bugarín
Dep. Electrónica
IES Escolas Proval
Nigrán, España
javier.diz@edu.xunta.gal

Abstract—**En este artículo se describe el proyecto realizado por los alumnos de los ciclos formativos de formación profesional del IES Escolas Proval [1] para participar en el desafío Cansat [2] organizado por Esero, la delegación en España de la Oficina de Recursos Educativos de la Agencia Espacial Europea (ESA) [3]. El desafío consiste en construir un satélite del tamaño de una lata de refrescos que permita cumplir con una misión específica. El desarrollo del trabajo y la búsqueda de soluciones es un reto que deben superar los alumnos con ayuda de sus mentores.**

Keywords— Vocational Training, Satellite, Design, Electronics and Programming, Project-Based Learning.

I. Motivación para el desarrollo del proyecto

El ciclo superior de Mantenimiento electrónico es una enseñanza orientada al prototipado electrónico. En él se cursa un módulo en el que al terminar el ciclo deben desarrollar un prototipo electrónico y exponerlo al finalizar el curso ante el equipo docente. Esto ha servido de incentivo para enrolar a los alumnos en la aventura del Cansat.

El equipo que ha desarrollado este trabajo (Fig. 1) ha estado formado por seis alumnos de diferentes cursos y dos profesores que han ejercido de tutores. Los alumnos se organizan repartiéndose una serie de roles de cara a especializar a cada uno en tareas como el diseño de hardware, programación de dispositivos, diseño mecánico de la envolvente, construcción del paracaídas, búsqueda de financiación y divulgación del trabajo por diferentes canales. Esta manera de trabajar hace que se inculque en el alumnado la adquisición de destrezas técnicas en las que se prima la búsqueda de soluciones efectivas iterando con los prototipos que se van construyendo. En este sentido, se busca que los alumnos se adentren en campos como el diseño 3D, la programación de dispositivos o el diseño electrónico que permita conseguir los objetivos de la misión.

Todo el esfuerzo se dirige hacia la consecución de un objetivo específico. Los estudiantes deben tener la capacidad de integrar varios dispositivos electrónicos, comprendiendo sus características, para lograr su conexión. El satélite de simulación debe tener la capacidad de guardar la información y transmitirla en tiempo real a una estación de radio ubicada en tierra, cerca del punto de lanzamiento

Asimismo, se busca fomentar la formación de valores como la responsabilidad, el liderazgo, la colaboración en equipo y la comunicación con diversos actores sociales vinculados al entorno de la institución educativa.

Fig. 1. Reunión de trabajo del equipo SETISAT

La misión del satélite se divide en dos partes. La primera, que es obligatoria, consiste en medir los valores de presión y temperatura de la atmósfera. La segunda parte, opcional, implica equipar el Cansat con sistemas que puedan medir otros parámetros atmosféricos relacionados con la vida, como la contaminación, la concentración de oxígeno, la intensidad de luz y la presencia de un campo magnético, entre otros. Además, hemos dotado a nuestro ingenio de la capacidad de reproducir un mensaje de audio grabado cuando sea necesario desde la estación terrestre. De esta manera, se ha convertido al satélite en una sonda capaz de investigar si otros mundos podrían albergar vida, y si esta vida fuese inteligente, podría escuchar un mensaje de bienvenida que anuncia nuestra llegada y nuestra misión pacífica. Inspirados en el proyecto SETI [4] de la NASA, decidimos llamar a nuestro prototipo SETISAT.

Todos los dispositivos electrónicos necesarios para cumplir con la misión deben ser instalados en el interior de la carcasa del Cansat. Por lo general, la misión implica transmitir los datos por radio a una estación terrestre, donde se grafican y se analizan posteriormente. Los estudiantes deben interpretar estos datos y determinar si la misión ha sido exitosa o no.

Para recopilar datos, el satélite, que a partir de ahora llamaremos Cansat, debe ser lanzado a una altitud de aproximadamente un kilómetro en un área despejada para garantizar un aterrizaje seguro y la posibilidad de recuperación. Una vez que alcanza la altura deseada, se libera del vehículo de lanzamiento y desciende de manera controlada con la ayuda de un paracaídas hasta que toca tierra.

II. Desafío Cansat

El reto CanSat, que significa "satélite en una lata," es una competición educativa en la cual los participantes deben concebir, construir y lanzar un pequeño satélite del tamaño de

una lata de refresco, conocido como CanSat. El propósito principal de este desafío es simular a una misión espacial completa a una escala reducida, permitiendo que los participantes experimenten diversos aspectos de la ingeniería espacial y promueva el aprendizaje práctico.

A continuación, se describe de manera general el desarrollo del reto CanSat, describiendo las etapas de trabajo:

- Diseño: Los equipos participantes deben idear el prototipo, el cual consiste en un dispositivo electrónico equipado con sensores y sistemas de comunicación. El diseño debe tener en cuenta aspectos tales como la estructura física, los sistemas de energía, la electrónica de los sensores y los sistemas de control.
- Construcción: Una vez completado el diseño, los equipos deben fabricarlo utilizando materiales y componentes disponibles en el mercado. Esto implica la construcción de la estructura, la integración de los componentes electrónicos, la programación del software necesario y la realización de pruebas funcionales.
- Lanzamiento: Se efectúa el lanzamiento real del CanSat utilizando un cohete o un medio equivalente, como un globo aerostático, dron o parapente, que permita elevar el dispositivo a una altura aproximada de un kilómetro.
- Misiones: Durante el vuelo, el CanSat debe llevar a cabo una tarea específica. Por ejemplo, la tarea podría implicar la recopilación de datos atmosféricos, la monitorización de la radiación, mediciones de temperatura o la captura de imágenes. El CanSat debe completar la tarea de manera autónoma y recopilar los datos correspondientes.
- Recuperación y análisis de datos: Tras el vuelo, se debe recuperar el CanSat y analizar los datos recopilados durante la misión. Esto incluye el procesamiento de los datos, la interpretación de los resultados y la elaboración de informes técnicos y presentaciones. Además, al menos los datos de la misión primaria deben

El reto CanSat ofrece a los participantes la oportunidad de aplicar conocimientos en diversas disciplinas, trabajar en equipo, resolver problemas técnicos y experimentar el ciclo completo de una misión espacial en un entorno educativo.

III. Objetivos educativos

A lo largo de este desafío, los alumnos verán mejoradas sus destrezas en áreas como:

- Diseño electrónico: El hardware requiere de la integración de diferentes sistemas que puede incluir el diseño de un PCB que incluya sistemas de comunicación, sensores, actuadores y sistemas de control.
- Diseño mecánico: Se requiere diseñar y fabricar una estructura física que proteja los componentes internos durante el lanzamiento. Además, se diseña el paracaídas para asegurar una velocidad de descenso dentro de los límites establecidos.
- Programación de sistemas: La programación del software es esencial para controlar diversas funciones, como la recopilación y procesamiento de datos, la comunicación con la estación base y la visualización e interfaz de control.
- Cálculos relacionados con Física y aplicación de conceptos en Matemáticas: Los participantes deben comprender los principios físicos y las ecuaciones matemáticas para entender los parámetros medidos, además de realizar conversiones de unidades.
- Telecomunicaciones: Se aplican conocimientos en sistemas de comunicación por radio para establecer enlaces de datos entre el CanSat y la estación base, permitiendo la transmisión y recepción de información durante el vuelo.
- Ciencias de la Tierra y del Espacio: Los participantes deben comprender conceptos relacionados con la atmósfera, el clima, la meteorología y otros aspectos relacionados con la exploración espacial.

Además de estas disciplinas académicas, también se fomenta el desarrollo de otras habilidades:

- Gestión de proyectos: La planificación, asignación de recursos, seguimiento y coordinación de tareas son fundamentales para el éxito del proyecto. La colaboración entre los miembros del equipo y la responsabilidad en las tareas asignadas son esenciales.
- Mecenazgo: Los estudiantes deben comunicarse con agentes sociales, empresas e instituciones relacionadas con la institución educativa, convenciéndolos de la viabilidad del proyecto y conseguir su apoyo a través de donaciones de material o contribuciones económicas. Esto es importante no solo para el proyecto en sí, sino también para el futuro de los estudiantes en el entorno laboral.
- Divulgación: Es esencial que la misión se dé a conocer a la comunidad educativa y a la sociedad en general. Para lograrlo, se llevan a cabo actividades que ayudan a comprender el proyecto. Esto incluye la utilización de medios como la prensa o las redes sociales. Además, durante las etapas del concurso, los equipos deben presentar su trabajo ante un jurado que les hace preguntas técnicas sobre el desarrollo del prototipo.

Estas son algunas de las disciplinas y habilidades que los estudiantes adquieren durante la realización del proyecto. Se fomenta el trabajo en equipo, la resolución de problemas y el aprendizaje interdisciplinario, brindando a los estudiantes una experiencia práctica en el campo de la tecnología espacial. En este artículo se describe el proyecto ideado y se comentan las fases de su desarrollo donde se puede comprobar alguna de estas destrezas que están relacionadas con el desarrollo de prototipos electrónicos.

IV. Misiones desarrolladas en SETISAT

En la misión principal del CanSat, se requiere medir la temperatura del aire y la presión atmosférica que se guardarán en una tarjeta de memoria ubicada dentro de la sonda. Simultáneamente, se enviarán cada segundo a la estación de tierra, donde, en nuestro caso, se almacenarán en una base de datos de un equipo que hará de servidor. En el servidor se ha programado un sitio web que permitirá que los clientes puedan consultar al mismo tiempo y desde diferentes puntos los datos a través de un navegador web. En las páginas se han programado diferentes gráficos lo que permitirá visualizar la evolución de las medidas en relación con la altitud de descenso y en tiempo real.

El paracaídas se sujetará a la envolvente mediante unas gomas elásticas que amortiguará el momento en el que se abra

durante el descenso. Esto permitirá reducir la velocidad de caída.

La altitud se medirá de dos maneras: en el primer método, utilizando un sensor barométrico que mide la presión y calcula indirectamente la altitud; en el segundo, mediante un GPS que proporcionará una medición más precisa de la altitud y permitirá contrastar la medida del primer método.

Una vez que los estudiantes comprendieron el objetivo de la misión principal, se llevaron a cabo sesiones de trabajo para desarrollar la misión secundaria. Durante estas sesiones, los mentores dieron a conocer al equipo el proyecto SETI, que consiste en el análisis de datos de radiotelescopios para buscar señales de origen no natural. El proyecto SETI@home aprovechó la potencia de procesamiento de miles de computadoras personales en todo el mundo para analizar los datos obtenidos por los radiotelescopios. Utilizaban para ello aplicaciones de software que los usuarios instalaban en sus equipos personales para colaborar. Este proyecto despertó el interés del equipo, y decidieron construir algo relacionado con la búsqueda de vida en otros planetas, utilizando el CanSat como una sonda espacial que enviaría mensajes de bienvenida a la llegada de un mundo potencialmente habitable. Para esto era necesario diseñar un enlace de retorno desde la estación de tierra que permitiera el envío de una señal de control que dotase al CanSat de la posibilidad de emitir un mensaje de bienvenida o una melodía relacionada con este propósito. El mensaje a reproducir se podría seleccionar desde la estación de tierra.

Un aspecto relevante para la existencia de vida tal y como la conocemos es la existencia de una gravedad moderada, que no debe ser excesivamente alta ni demasiado baja. Valores cercanos a 9,8 m/s² indicarían un entorno adecuado para la vida. La gravedad se medirá mediante un acelerómetro integrado en el giroscopio utilizado para estudiar los movimientos en la masa de aire de la atmósfera.

Asimismo, se consideran otras magnitudes importantes, como el campo magnético, que actúa como escudo protector ante partículas de alta energía procedentes del espacio exterior. El GPS seleccionado incorpora una brújula capaz de medir el campo magnético en los tres ejes.

El lanzamiento del CanSat en nuestra atmósfera servirá para calibrar todos los instrumentos a bordo. Se verificará si la evolución de todos estos parámetros es la esperada. Si no lo es, se planteará si los instrumentos seleccionados son los adecuados, si las condiciones de medición son óptimas o si ha habido algún error de diseño o programación.

La presencia de luz es fundamental para la fotosíntesis en las plantas y para la liberación de serotonina en los seres humanos, lo que afecta al estado de ánimo. Se estableció que el umbral mínimo debía ser de 50 lux ya que se considera que muchas especies no pueden realizar la fotosíntesis por debajo de este valor. Por lo tanto, si la medición superaba este valor, podría indicar la idoneidad del planeta para el desarrollo de la vida vegetal. Para medir este parámetro, se utilizó un sensor basado en un fototransistor, el TEMT6000.

Otro parámetro esencial que se debía medir es la concentración de oxígeno en la atmósfera, que debía ser al menos de un 20% para asegurar nuestra forma de vida. Por tanto, se debía comprobar si el valor de concentración era similar. El lanzamiento nos pareció una gran oportunidad de comprobar la variación de concentración de oxígeno con la altitud. Se utilizó el sensor Gravity I2C Oxygen del fabricante DFRobot.

Para medir la dinámica atmosférica se optó por un giroscopio, con la idea de que este pudiera detectar la inclinación de la lata durante la caída. La ausencia de oscilaciones en la lata durante la caída podría indicar una falta de movimiento en la masa de aire, un factor importante en la definición del clima de una zona. Para esta medición, se empleó un giroscopio basado en el MPU6050. Además, se utilizó el sensor múltiple barométrico BME680, empleado también en la misión principal, para medir la humedad atmosférica y detectar partículas contaminantes. Aunque inicialmente se planteó medir la presencia de CO2, se descartó debido a que el tiempo de medida para conseguir un valor fiable superaba el tiempo de vuelo.

Además de estos sensores, se incorporó un sistema de aviso acústico que permite anunciar la llegada de la sonda a un nuevo mundo. Para ello, se equipó la lata con un sistema de audio capaz de reproducir audio pregrabado en una tarjeta SD. Se utilizó el módulo DFPlayer, que permite reproducir múltiples archivos de audio. Desde la estación de tierra, se puede seleccionar el audio que se desea que emita la sonda, lo que permitirá probar el canal de retorno hacia el CanSat y verificar su funcionamiento a distancia.

Con el objetivo de determinar la autonomía, se proporcionan detalles sobre el consumo de energía de cada dispositivo:

Tabla 1: Consumo de los dispositivos del CanSat

Dispositivo	mA med	mA max
ESP32 dev kit	50	200
Brújula QMC5883L GY-273	2,6	2,6
Sensor de Presión, temperatura, humedad y gas BME680	5	12
Acelerómetro y Giroscopio MPU-6050	5,6	5,6
Sensor de luz TEMT6000	5	5
Módulo de transmisión de datos APC220	28	40
Sensor de oxígeno Gravity I2C	5	5
GPS GLONASS Dual BN-880 con antena	50	50
Lector mp3 DF Player	40	50
Amplificador Estereo PAM8403 con Potenciometro 3W	500	500
Total	696	862

De la tabla de consumos se puede apreciar que lo que más consume es el amplificador. Hay que tener en cuenta que el mensaje de audio no es continuo si no que funciona solamente a demanda, es decir, cuando desde la estación de tierra se indique que debe reproducir alguno de los ficheros de audio. No obstante, considerando un consumo continuado medio de unos 700mA y que se usa una pila de 3000mAh, entonces se puede decir que la autonomía del montaje es de unas 4,6h. Considerando que las pistas de audio se reprodujeran continuamente, entonces la autonomía descendería a unas 3,5h.

En el siguiente diagrama de bloques (Fig. 2) se indica con detalle el conexionado de cada uno de los elementos del sistema.

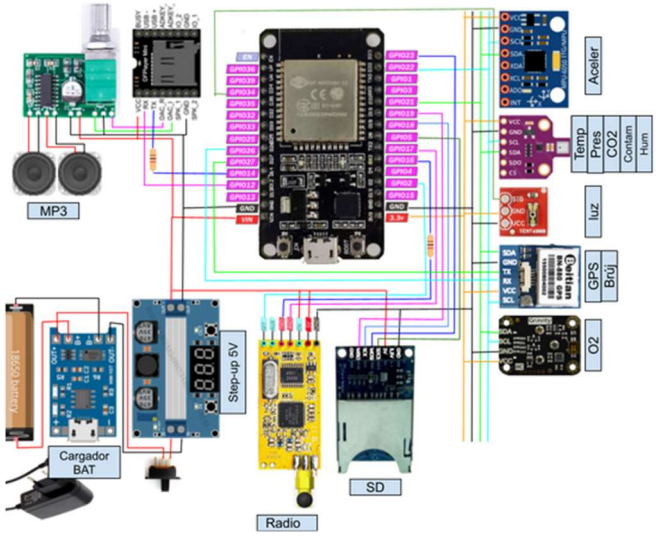


Fig. 2. Diagrama de bloques completo del sistema Cansat

En el caso de la estación base (Fig. 3) necesitábamos otro ESP32, un dispositivo capaz de acceder a una red wifi que permitiera ser una pasarela con el servidor de datos. Para realizar esto utilizamos la capacidad de conectarse a una red inalámbrica existente de este controlador. Esto permite establecer una red sin cables entre el servidor LAMP y la antena de recepción. Con esto se consiguió que la antena fuese portátil y el alumno pudiese apuntar cómodamente hacia la sonda mientras descendía.

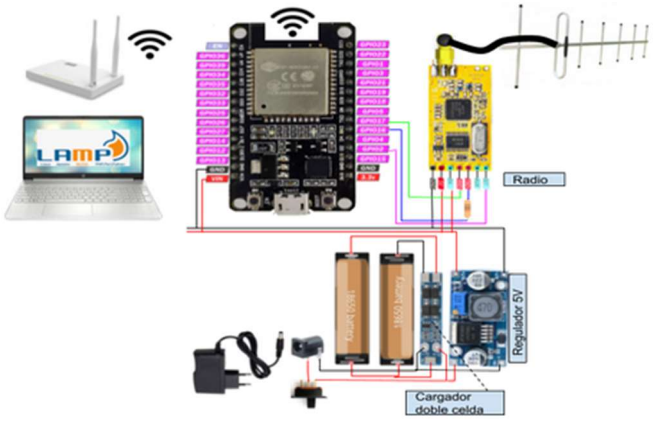


Fig. 3. Diagrama de bloques de la estación base

V. Etapas del diseño

El diseño electrónico consiste en la integración de dispositivos en forma de placas independientes que le facilitan los datos a un microcontolador principal a través de puertos de comunicación serie integrados en este dispositivo. El sistema de control escogido es un microcontrolador ESP32 [10]. Antes de escoger este procesador, se estudiaron otras alternativas basadas en microcontroladores de Atmel de la familia Arduino (Nano, Micro, Nano Every o UNO). Todos eran válidos para cumplir con el objetivo, pero el microcontrolador ESP32 era claramente mejor. Dispone de más memoria de programa, 4MB flash, procesa a 240MHz, dispone de dos núcleos y dispone de una gran cantidad de puertos, incluidos el SPI e I2C que eran importantes para comunicar con algunos dispositivos del prototipo. El precio también fue un buen motivo para terminar por decantarnos por esta opción. Además, su tamaño era reducido lo que hacía que se ajustara bien al tamaño de la envolvente.

Para la medida de la temperatura y presión se escogió el multisensor BME680 porque además incluía medida de humedad y gases contaminantes. Con el mismo sensor se cubren los requisitos de la misión primaria y parte de los de la misión secundaria.

Para las comunicaciones por radio se utilizó el módulo APC220 que permite llegar hasta 1000m transmitiendo a 9600 baudios.

En la Fig. 4 se muestran varios de los dispositivos utilizados en las pruebas.

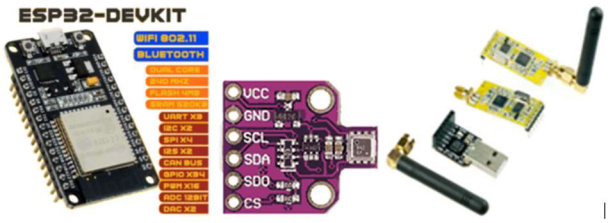


Fig. 4. Figura 4: Dispositivos para pruebas de la misión primaria: ESP32, BME680 y transmisor de radio APC220

Las primeras pruebas se hicieron utilizando placas prototipo (Fig. 5). Se obtuvieron buenos resultados incluso con obstáculos de por medio (comunicación a través de tabiques de separación). Para poder distanciar aún más el emisor del receptor, se alimentó el emisor con pilas ion litio, de esta manera, se consiguió que el emisor fuera portátil.

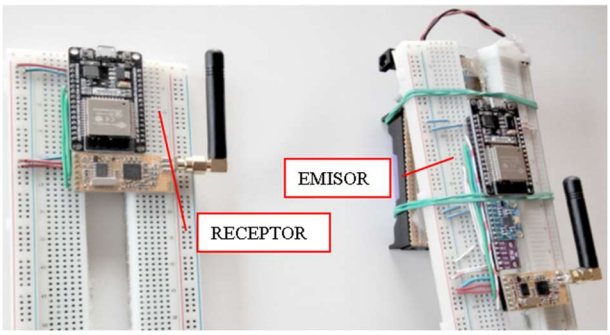


Fig. 5. Primeras pruebas de la misión primaria: emisor portátil y receptor.

Estas primeras pruebas sirvieron de aliciente, pues se había conseguido un montaje básico con el que los datos se almacenaban en la base de datos. Una característica interesante de nuestro prototipo es que los datos que llegan al receptor se envían mediante una conexión WiFi al servidor donde se almacenan los datos. Esto hizo que luego la antena receptora pudiera hacerse portátil y con ello se mejoró la capacidad de apuntamiento sin que la distancia al servidor se limitase a la longitud del cable USB o ethernet (Fig. 6).

Para enviar los datos se ha programado en el emisor un bucle temporal y cada segundo se envían los datos de temperatura, presión y un indicador de estación (SETISAT) que permite evitar las interferencias con otras tramas de datos de otros Cansat.

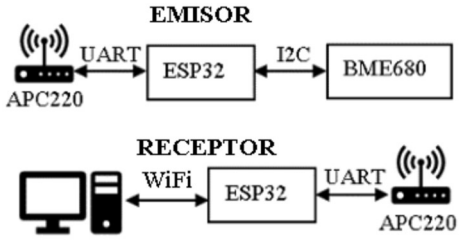


Fig. 6. Diagrama de conexiones del prototipo inicial

En la primera prueba realizada con las antenas que vienen con los transmisores se comprobó que la distancia de transmisión era de unas pocas decenas de metros y se veía bastante influenciada con la presencia de obstáculos de gran volumen como edificios o árboles. Se decidió entonces soldar al vivo de la antena un cable coaxial. Del otro extremo se conectó un conector de tipo F a una antena de UHF de 14dB con una frecuencia de resonancia de unos 600MHz. A pesar de que la frecuencia de la antena no estaba en el rango de los 433MHz los resultados obtenidos (Fig. 7) fueron muy satisfactorios.

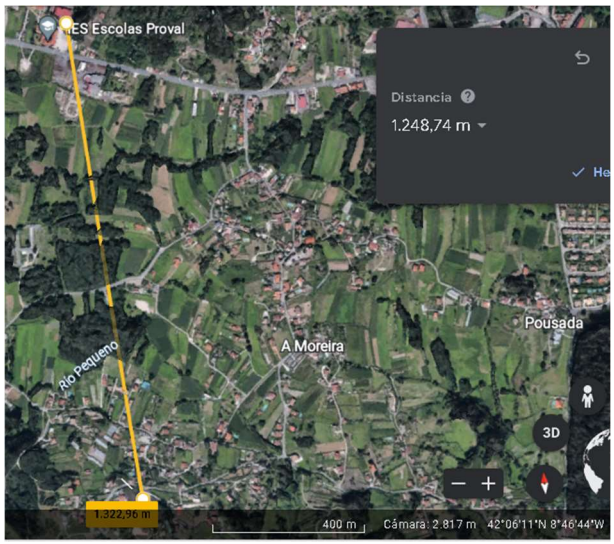


Fig. 7. Pruebas de distancia de transmisión a 1,2km entre el instituto y la capilla de San Sebastián, próxima al instituto y que permite visión directa.

En paralelo con el diseño preeliminar de los dispositivos electónicos se trabajaba en el diseño del paracaídas. Para la realización de los cálculos que permitiría obtener el diámetro del paracaídas se ha utilizado la guía de diseño proporcionada por Esero. En nuestro caso se decidió construir un paracaídas plano. El motivo de haber escogido esta geometría era su simplicidad de diseño y su facilidad de construcción. También nos parecía más vistoso que los otros tipos. El primer prototipo se realizó mediante bolsas de plástico. Teniendo en cuenta el máximo peso, 350g, el resultado de los cálculos fue un paracaídas de unos 30cm de diámetro. Las pruebas de caída libre se hicieron lanzando el paracaídas desde un tercer piso, unos 10m de altura, y se obtuvo una velocidad de caída de 10m/s. Esto corroboró que el diámetro del paracaídas cumplía con el requisito de velocidad de caída. Una vez realizadas las pruebas de prelanzamiento con el prototipo de paracaídas en plástico se reconstruyó, esta vez utilizando la tela de un paraguas.

Por otro lado, quedaba por resolver cómo graficar los datos para que los alumnos pudiesen realizar la interpretación de los mismos. En el módulo de Mantenimiento de Equipos de Voz y Datos se estudia cómo conectar a un servidor web nodos basados en la familia Arduino, equipos con conexión a una red informática. Se estudia igualmente cómo montar un servidor LAMP en una máquina virtual y cómo programar un interfaz HMI (Human Machine Interface) basado en páginas web. Aprovechando estos contenidos se decidió hacer la visualización de los datos utilizando estas herramientas.

Los datos recibidos se grafican utilizando un servidor web en el que se almacenan los datos recibidos en una base de datos. Los datos se grafican en tiempo real a medida que el CanSat desciende. El microcontrolador de la estación base sube los datos a tablas dentro de una base de datos en MySQL. Cada tabla genera una huella temporal a medida que los datos se almacenan. Las medidas se representan confrontándolas con la altitud. En el servidor se han escrito páginas web que utilizan la librería Echarts Apache [11]. Gracias a esta librería podemos representar gráficas lineales o en tres ejes. Esto permite poder representar el descenso del CanSat y visualizar la ubicación utilizando las coordenadas proporcionadas por el GPS (Fig. 8). Hay que decir que la librería facilita el cálculo de medias además de indicar el máximo y mínimo de las variables medidas. Además, dispone de un control que permite tabular los datos representados.

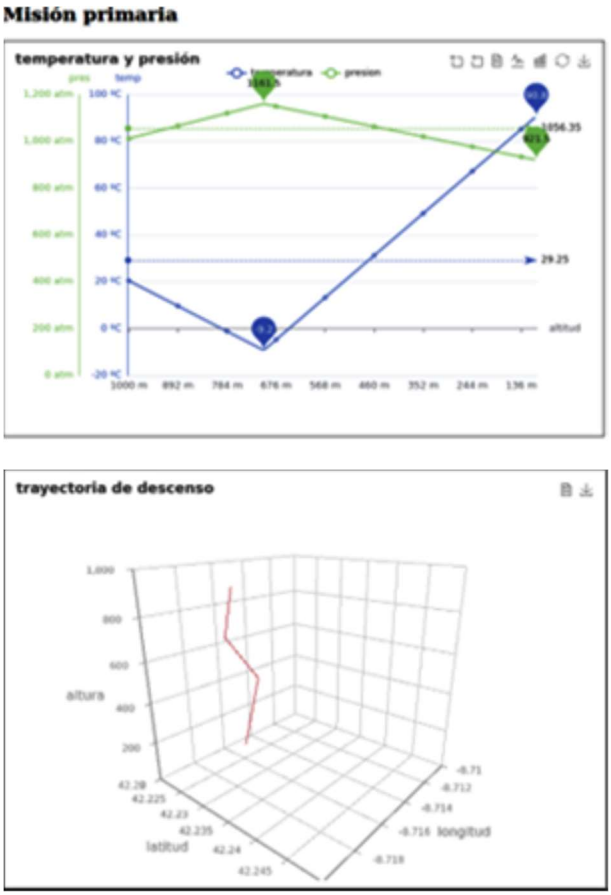


Fig. 8. Ejemplo de gráficas utilizando la librería Echarts Apache.

Además, en la página web se ha programado la interfaz que permite escoger la pista de audio que se escuchará durante el descenso (Fig. 9). Los audios están grabados en la tarjeta SD del módulo DFPlayer [12] que se ha instalado en el Cansat.

Fig. 9. Formulario web para la selección del mensaje de bienvenida.

Los datos pueden ser visualizados a través del gestor web phpMyAdmin (Fig. 10) que también permite editar la estructura de las tablas.

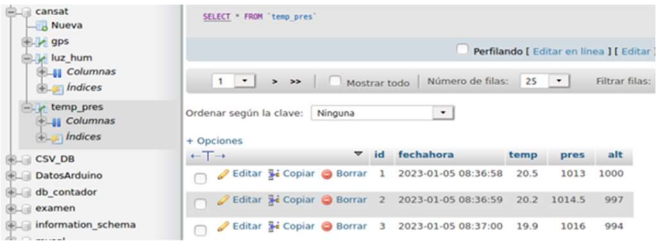


Fig. 10. Entorno de explotación phpMyAdmin para MySQL.

El diseño de la envolvente de la sonda se ha realizado teniendo en cuenta que existen sensores que debemos colocarlos en el exterior para que puedan realizar una correcta medida de los parámetros atmosféricos. Es el caso del sensor de luz, del GPS o del barómetro, así como también el de oxígeno. Por otro lado, el altavoz también era necesario que estuviese localizado en algún lugar que permitiera emitir el frente sonoro y facilitase escucharlo desde tierra. En este caso lo hemos colocado detrás del logo de nuestro equipo que se ha extrusionado en el cilindro del CanSat.

La carcasa se ha diseñado y fabricado mediante una impresora 3D propia. Para su diseño se ha utilizado TinkerCAD. Con esta aplicación web se aprende rápidamente a conseguir el formato requerido en las bases del concurso. Además, hemos podido colocar los diferentes elementos electrónicos utilizando las librerías de componentes electrónicos de que dispone esta herramienta. Los componentes que no hemos encontrado en la librería de TinkerCAD los hemos descargado de páginas que disponen de un gran número de diseños (grabcad, thingiverse). Para identificar nuestro diseño y poder distinguirlo del resto, se ha incrustado en la envolvente (Fig. 11) el nombre del equipo.

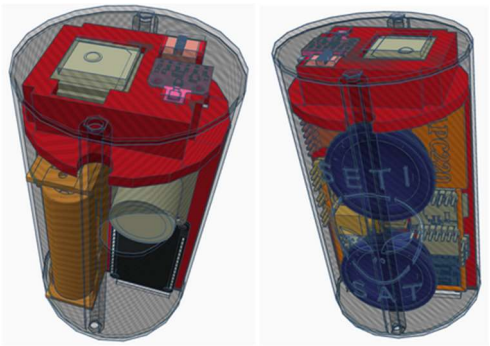


Fig. 11. Diseño de la carcasa, detalle de alojamiento de dispositivos en el interior y extrusión del logo en la tapa superior

En la ilustración Fig. 12 se puede apreciar como ha quedado realmente la distribución de componentes en el interior del Cansat. Como se puede apreciar solo se ha instalado un altavoz. El motivo es porque el cableado entre dispositivos ocupaba mucho sitio. También se han encontrado dificultades con las placas que llevaban soldadas tiras de pines ya que la disposición en acodado (90º) hacía que ocupasen un volumen que bien hubiese venido bien para ubicar otros elementos. El desafío de integrar una cantidad tan amplia de instrumentos en un espacio limitado es un gran reto.

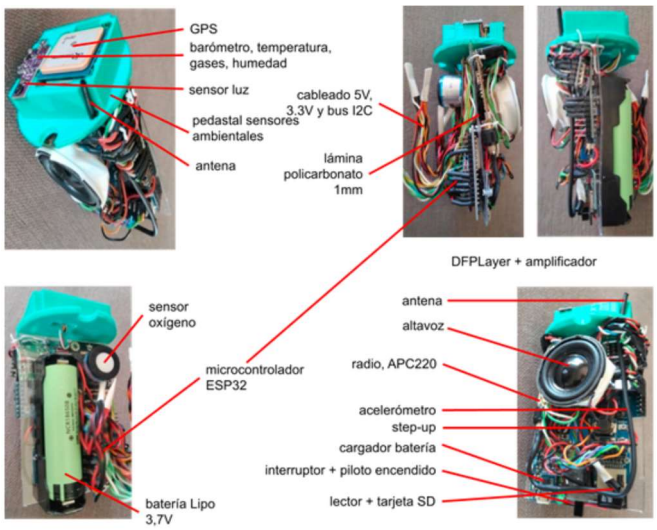


Fig. 12.Electrónica del CanSat del SETISAT ensamblada en un único bloque

Igualmente, también se diseñó una envolvente para el receptor (Fig. 13). En esta caja se aloja el sistema de alimentación mediante dos baterías tipo LiPo y un regulador de 5V así como el módulo de radio APC220 [13] y el microcontrolador ESP32. Con estos dispositivos se ha construido un enlace vía Wifi con el servidor de datos que permite libertad de movimientos con la antena sin necesidad de emplear cables. Algunos detalles de los logotipos se extrusionaron directamente en el diseño 3D. Para otros detalles gráficos se utilizó una impresora de vinilo con la que se ha creado el logo que luego se ha pegado tanto en las tapas del CanSat como en la del receptor.

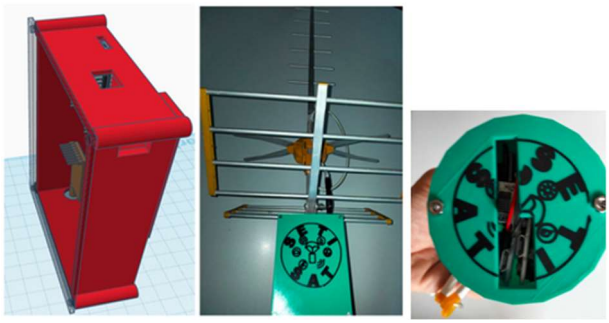


Fig. 13. Diseño de la envolvente del receptor, aspecto final del receptor montado en una antena Yagi y detalle de la tapa con acceso a los conectores principales

En la distribución de elementos dentro de la envolvente del transmisor en el montaje final hubo que realizar modificaciones debido al espacio que ocupaba el cableado entre los elementos. En concreto se eliminó uno de los altavoces y se cambió la ubicación del módulo de radio dado que de esta manera quedaba mejor alojada la antena. Una vez montado el Cansat su peso fue de 270g. De cara al lanzamiento se añade un lastre de 50 gramos para conseguir cumplir con las especificaciones del desafío. El paracaídas (Fig. 14) se ha unido a la envolvente mediante unas gomas que permitirán amortiguar el golpe del frenado del descenso cuando se despliegue el paracaídas.

Fig. 14. Aspecto final del transmisor con paracaídas.

El servidor utilizado para almacenar y explotar los datos está basado en una máquina Linux con un sistema Ubuntu sobre la que se le han instalado los paquetes de Apache, MySQL y php. Con estos paquetes podremos programar un sitio web dinámico que permita visualizar los datos almacenado en la base de datos MySQL. Tal como se había mencionado decidimos utilizar este entorno de desarrollo por varios motivos:

- Consulta multipuesto: El hecho de que el sistema de consulta esté basado en un servidor web. Permite a varios clientes conectarse simultáneamente y que cada uno pueda analizar un conjunto de datos

diferentes, lo que permite acelerar el análisis de datos recibidos desde la sonda.

- Conexión inalámbrica con el receptor de radio: El receptor de radio basado en un ESP32 tiene capacidad de unirse a una red wifi y enviar consultas al servidor cuando recibe datos de la sonda cómo comportarse como un servidor y aceptar consultas desde el servidor cuando, por ejemplo, cuando un cliente web solicita reproducir un mensaje de audio en la sonda.
- Graficado: Existen en el mercado disponibles librerías con licencia de uso libre que permite graficar datos almacenados en una base de datos. Estas librerías, como el caso de la utilizada en nuestro proyecto, Echarts Apache, permite obtener gráficos multilínea que permiten comparar los juegos de datos almacenados. En nuestro caso se han obtenido varios gráficos donde se comparaban de dos a tres conjuntos de valores. De esta manera hemos podido cotejar los datos de altitud del GPS y del barómetro, o los que se refieren a la misión primaria donde se visualizaban los datos correspondientes a temperatura y presión.
- Instalación sencilla: El servidor permite que no se tenga que instalar en ninguna máquina a parte del propio servidor. Los datos se centralizan en una base de datos de MySQL. La consulta de los datos se pueda realizar tanto localmente desde el propio servidor como remotamente a través de cualquier equipo en red con el servidor que disponga de un navegador web.
- Reducción de herramientas software: No tener que instalar software adicional a las herramientas instaladas en el propio servidor hace sencillo la explotación de la información desde los ordenadores clientes ya que no es preciso que se instale ninguna herramienta software a mayores como hojas de cálculo o específicas para poder representar gráficamente la información.

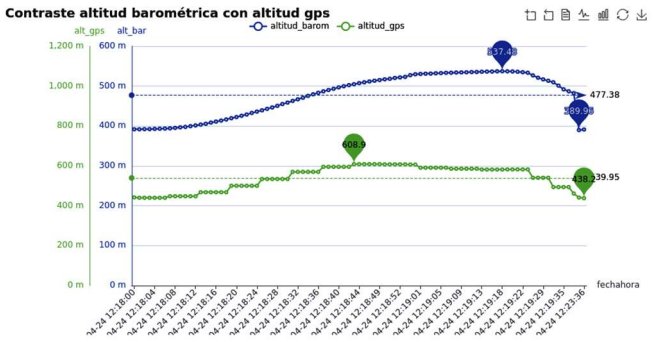


Fig. 15. Comparación del juego de valores correspondientes a altitud proporcionados por el barómetro y el GPS

El sitio web de SetiSAT está formado por varios ficheros. El principal llamado *index.php* contiene el código que permite refrescar periódicamente las gráficas, así como un selector que permite escoger el mensaje que ha de reproducir la sonda. La premisa sobre la manera en como programar el sitio fue aprovechar los conocimientos sobre los contenidos de una de las asignaturas que se debía cursar durante el año del concurso CanSat. De esta manera se buscaba una solución comprensible y que pudiesen llegar a explicar ante el jurado del certamen. El código de las páginas prescinde del uso de ficheros de estilos u otras herramientas de programación web que dificulte la legibilidad de lo codificado en estos ficheros.

Cuando un usuario se conecta al servidor a través de un navegador web, este sirve la página principal. El flujo de peticiones (Fig. 16) implica que unas veces el servidor acepte peticiones desde el receptor de radio para insertar los datos en la base de datos y otras veces desde el cliente web para poder graficar estos.

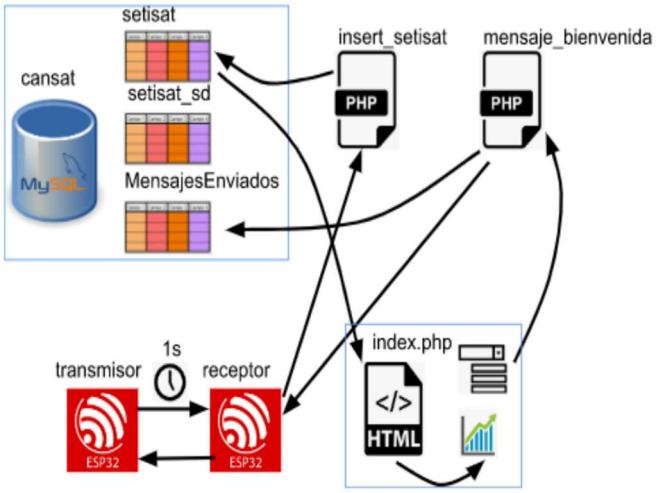


Fig. 16. Funcionamiento del sitio web. Flujo de consultas entre los ficheros del sitio, la BBDD y el módulo receptor

El transmisor de radio de la sonda envía los datos al receptor con una cadencia de un segundo. El número de datos que envía son algo más de quince variables, encabezadas con la palabra clave del equipo 'SETISAT' que evita que datos de otras sondas puedan interferir con la nuestra.

Una característica interesante de la solución basada en servidor web es que el protocolo http dispone de una pila de consultas, con lo que las peticiones para guardar datos en la base de datos no se han de realizar en tiempo real, de tal manera que, si el servidor está ocupado, se encolan las peticiones y estas se ejecutarán más tarde. Esto permite que no se pierdan datos por problemas de congestión en el canal de comunicación, como sí sucede en aplicaciones que utilizan el puerto serie o USB.

La base de datos está basada en el motor MySQL, ampliamente testado y de código abierto. La velocidad con la que se ejecutan las consultas cubre con creces las necesidades del proyecto. La base de datos se compone de tres tablas. La principal llamada *setisat* guarda los datos de los sensores, *setisat_sd* es una tabla espejo de la primera donde se importarán los datos de respaldo que se guardan en la tarjeta SD y por último la tabla *MensajesEnviados* que guarda las peticiones de los clientes web para que la sonda reproduzca los mensajes de audio. La manera de comprobar que los mensajes que se han enviado y se han reproducido por tanto en la sonda, es comparar el contenido de esta última tabla con los guardados en el fichero análogo de la tarjeta SD instalada a bordo de la sonda.

Base de datos

fechahora	1	mensaje	idioma
2023-04-24 12:18:58		6	italiano
2023-04-24 12:18:18		1	alemán
2023-04-24 12:18:04		5	inglés
2023-04-24 12:17:48		4	gallego
2023-04-24 12:17:24		2	español

Tarjeta SD

```
1 2
2 '
3 4
4 '
5 5
6 '
7 1
8 '
9 6
10 '
```

Fig. 17. Comparación entre el registro de mensajes enviados de la sonda y los almacenados en la base de datos.

El control de mensaje de bienvenida se realiza a través de un formulario web. Cuando se ejecuta el formulario, es decir al pulsar el botón *Confirmar*, se envía una consulta al fichero

mensaje_bienvenida.php el cual guarda en la base de datos el mensaje que se debe reproducir y al mismo tiempo se envía una consulta al receptor de radio indicando que ha de enviar a la sonda la orden de reproducir este mensaje seleccionado desde el cliente web. Para que el receptor de radio pueda enviar esta instrucción a la sonda debe programarse para que funcione como un servidor web y que acepte consultas desde el servidor LAMP.

VI. Conclusiones

Este trabajo ha permitido desarrollar múltiples actividades relacionadas con destrezas que permiten que los alumnos puedan idear, construir y probar un prototipo totalmente funcional. Por otro lado, se desarrollan habilidades de comunicación y divulgación [14] de tal manera que se pone a prueba su capacidad para resolver dudas tanto a miembros de su comunidad educativa como ante un jurado que valora el esfuerzo realizado.

Es una oportunidad para poner a prueba lo estudiado en los módulos del ciclo formativo de Mantenimiento Electrónico y también el poder promocionarse profesionalmente ante las empresas del entorno. Muchas de estas empresas han mostrado gran interés por el proyecto y a raíz de esta noticia algunos alumnos harán prácticas en algunas de ellas.

Este proyecto se ha verificado en condiciones reales mediante el lanzamiento efectuado en el Centro de Investigación Aeroespacial de Rozas (Lugo, España) el 24 de abril de 2023. Posteriormente, el 27 de abril se ha realizado la defensa pública del proyecto (Fig 18) en el Auditorio Xosé Neira Vilas (Santiago de Compostela, España) ante un jurado compuesto por expertos de las Universidades gallegas y la Agencia Espacial Europea, obteniendo el primer premio en la final regional gallega del Desafío CanSat 2023 [15]. Fue una gran sorpresa para todos y una experiencia que el equipo SETISAT no olvidará nunca.

Fig. 18. Divulgación del proyecto en la Ciudad de la Cultura – Santiago de Compostela.

Agradecimientos

A los alumnos participantes en el proyecto, cuyo entusiasmo y trabajo han hecho posible la obtención del primer premio en la final regional.

Las jornadas de formación recibida por Esero ha permitido conocer otras experiencias de otros institutos de secundaria y nos ha allanado el camino para poder alcanzar a terminar nuestro prototipo. Por tanto, el soporte que ha proporcionado la organización ha hecho que los mentores pudiesen orientar el trabajo de los alumnos y aclarar muchas dudas sobre aspectos de la competición y del desarrollo del CanSat.

Por último, el esfuerzo realizado por la Consellería de Educación que ha permitido el lanzamiento de nuestra sonda a pesar de las muchas dificultades que han tenido que sortear.

Referencias

[1] “Instituto de enseñanza secundaria Escolas Proval” [Online]. Available: http://www.edu.xunta.gal/centros/iesescolasproval/ (accessed Jan,21 2024).

[3] “Desafío CanSat” [Online]. Available: https://esero.es/cansat/ (accessed Jan,18 2024).

[2] “Oficina Europea de Recursos para la Educación Espacial en España (ESERO Spain)” [Online]. Available: https://esero.es/_(accessed Dec,10 2023).

[4] “Proyecto SETI” [Online]. Available: https://www.seti.org/ (accessed Nov,05 2023).

[5] “Sensor de campo magnético de 3 ejes” [Online]. Available: https://learn.adafruit.com/adafruit-hmc5883l-breakout-triple-axis-magnetometer-compass-sensor/overview (accessed Nov,20 2023).

[6] “Medición de luz ambiente” [Online]. Available: https://learn.sparkfun.com/tutorials/temt6000-ambient-light-sensor-hookup-guide/all (accessed Dec,12 2023).

[7] “Medición de oxígeno” [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/Gravity_I2C_Oxygen_Sensor_SKU_SEN0322 (accessed Nov,20 2023).

[8] “Giroscopio de tres ejes” [Online]. Available: https://naylampmechatronics.com/blog/45_tutorial-mpu6050-acelerometro-y-giroscopio.html (accessed Nov,15 2023).

[9] “Sensor múltiple barométrico” [Online]. Available: https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/gas-sensors/bme680/ (accessed Nov,23 2023).

[10] “Microcontrolador ESP32” [Online]. Available: https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32 (accessed Dec,17 2023).

[11] “Librería Echarts Apache” [Online]. Available: https://echarts.apache.org/en/index.html (accessed Jan,05 2024).

[12] “Reproductor mp3 DFPLayer” [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/DFPlayer_Mini_SKU_DFR0299 (accessed Nov,05 2024).

[13] “Módulo de radio APC220” [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/APC220_Radio_Data_Module_SKU_TEL0005_ (accessed Nov,05 2024).

[14] “Página del proyecto SETISAT en Wordpress” [Online]. Available: https://setisat.wordpress.com/ (accessed Jan,05 2024).

[15] “Publicación del primer premio CanSat de la fase regional gallega” [Online]. Available: https://www.xunta.gal/notas-de-prensa/-/nova/79598/instituto-escolas-proval-nigran-representara-galicia-fase-nacional-del-certamen?langId=gl_ES (accessed Jan,05 2024).

Laboratorio remoto basado en una plataforma hardware reconfigurable

1st Carlos Cruz
Department of Electronics
University of Alcalá
Alcalá de Henares, Spain
carlos.cruzt@uah.es

2nd Ruben Gil
Department of Electronics
University of Alcalá
Alcalá de Henares, Spain
ruben.gilv@uah.es

3rd Alvaro de la Llana
Department of Electronics
University of Alcalá
Alcalá de Henares, Spain
alvaro.llana@uah.es

4th Ignacio Bravo
Department of Electronics
University of Alcalá
Alcalá de Henares, Spain
ignacio.bravo@uah.es

5th Alfredo Gardel
Department of Electronics
University of Alcalá
Alcalá de Henares, Spain
alfredo.gardel@uah.es

6th José Luis Lázaro
Department of Electronics
University of Alcalá
Alcalá de Henares, Spain
josel.lazaro@uah.es

***Abstract*—Las actividades de laboratorio son esenciales para que los estudiantes asimilen correctamente los conceptos teóricos y se considera una parte importante de la enseñanza de la ingeniería debido a la propia naturaleza de la profesión. Tradicionalmente, estas actividades se realizan en las instalaciones de la universidad con un horario fijo, sin mucha flexibilidad, donde el equipamiento, la atención del profesor, y el acceso al laboratorio son limitados. Desde nuestra experiencia docente se propone como alternativa a la enseñanza tradicional el uso de laboratorios remotos como herramientas para la realización de prácticas a través de un sistema hardware reconfigurable. Los resultados muestran que es posible combinar un instrumento configurable y el ordenador para gestionarlo. El puesto remoto diseñado permite gestionar las reservas por parte de los alumnos, haciendo posible crear entornos adaptados al experimento de laboratorio que se vaya a realizar en gran variedad de asignaturas. Como línea de trabajo futura, se pretenden mejorar las aplicaciones de osciloscopio y generador de señales en una única tarjeta electrónica hardware comercial.**

***Index Terms*—Laboratorio remoto, FPGA, Diseño y control electrónico.**

I. Introducción

Las actividades experimentales en la enseñanza tradicional desempeñan un papel fundamental en el aprendizaje de la Electrónica, y aunque pueden complementarse con la simulación, no pueden sustituirse. El laboratorio es por tanto, un componente importante de esta enseñanza y el continuo desarrollo de tecnologías de la información y la comunicación (TIC) puede ofrecer novedosas opciones en el perfeccionamiento de esta parte del aprendizaje. Por ejemplo, los laboratorios a distancia pueden proporcionar una formación más práctica dirigida a un mayor número de estudiantes, permititiendo que cada alumno trabaje simultáneamente desde su propio dispositivo y siga los ejemplos establecidos por el profesor [1], [2]. Concretamente, los laboratorios virtuales y remotos han demostrado ser eficaces para aumentar el interés de los estudiantes por la electrónica analógica [3]–[5], digital [6]–[10], y su participación en actividades de aprendizaje mejorando posibles restricciones de tiempo o de lugar. La Tabla I muestra algunos beneficios e inconvenientes de la enseñanza según el tipo de laboratorio se si se comparan con la enseñanza tradicional. Además de los beneficios que obtienen los estudiantes en el uso del laboratorio remoto, las universidades también pueden aprovechar estas instalaciones para compartir equipos y recursos ofreciendo formación a distancia y proporcionando acceso a la experiencia práctica [11].

TABLE I
Ventajas e inconvenientes en el uso de diferentes tipos de laboratorio.

Tipo de laboratorio	Ventajas	Inconvenientes
Real	Datos reales Interacción en laboratorio Trabajo colaborativo Interacción con profesor	Restricciones de tiempo, lugar Requiere programación Alto coste Requiere supervisión Requiere mantenimiento Problemas de seguridad Protección laboral
Virtual	Explicación de conceptos Sin restricción de tiempo-lugar Medio interactivo Bajo coste	Datos idealizados Falta de colaboración Sin interacción equipos reales
Remoto	Interacción con equipos reales Calibración Datos realistas Sin restricciones de tiempo y lugar Coste medio Aprendizaje constructivista Interés científico	Sin presencia real Problemas de acceso Seguridad Desarrollo sistema de reservas

Los requisitos para establecer y utilizar laboratorios remotos pueden variar según la naturaleza de los experimentos y la infraestructura disponible. El desarrollo de un sistema de reservas en un interfaz de usuario, el desarrollo de medidas de seguridad y privacidad (cifrado de datos y autenticación segura,), la configuración de un servidor dedicado para alojar y ejecutar el laboratorio remoto, la conexión de sensores y/o actuadores en un sistema para recopilar datos, así cómo un hardware especializado para generación de señales son algunos

requerimientos necesarios para el correcto funcionamiento de prácticas remotas. En este contexto, el uso de plataformas hardware reconfigurables se han empleado en gran variedad de trabajos para cumplir con parte de estos requerimientos citados [12]–[14].

En este trabajo se presenta una propuesta innovadora para el desarrollo de prácticas remotas que permite dotar de disponibilidad de recursos a los laboratorios de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá incorporando nuevas tecnologías. El puesto remoto desarrollado se muestra en la Figura 1 y está formado por un ordenador personal conectado a la red de la Universidad, una aplicación software para el acceso remoto con gestión de reservas de los alumnos, y una plataforma de pruebas con distintos elementos conectados: tarjetas electrónicas dedicadas, motores, sensores, etc., tal y como se presenta en [15].

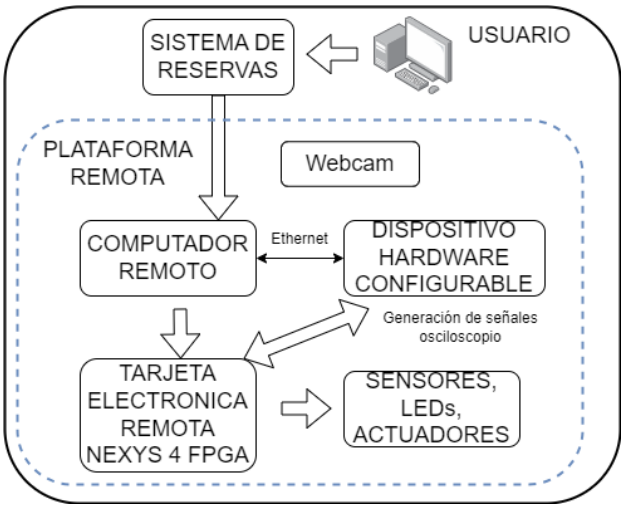


Fig. 1. Diseño del montaje experimental del laboratorio remoto.

A continuación, se describen los siguientes objetivos que se han propuesto en este trabajo:

- Realizar reservas de puestos remotos mediante un sistema integrado en la plataforma virtual de la universidad.
- Generar, controlar y adquirir señales para verificar el funcionamiento de prácticas de laboratorio en los casos que fueran necesarios.
- Disponer de una realimentación visual en la realización de las pruebas.
- Innovar el proceso de enseñanza y aprendizaje en el desarrollo de prácticas de laboratorio.
- Obtener una retroalimentación por parte de los estudiantes en el uso de herramientas remotas.

Las principales contribuciones de este trabajo se centran en el desarrollo de un sistema que permite acceder y controlar remotamente un equipo de laboratorio escalable y reutilizable en una gran variedad de instrumentos (tarjetas digitales, sensores, etc.). El sistema propuesto nos permitirá generar ciertas señales digitales y analógicas, estas últimas con unos requerimientos en periodo y amplitud, y con capacidad para visualizarlas en un osciloscopio integrado. En suma, se ha logrado desarrollar una plataforma remota adaptable a gran variedad de prácticas gracias a un mismo hardware-software de generación de señales adaptando las prestaciones según los requerimientos de cada práctica propuesta.

Este trabajo se organiza de la siguiente forma: en la Sección II se describe la arquitectura del laboratorio remoto y se presentan los principales componentes (hardware/software) para un correcto funcionamiento. La Sección III analiza los resultados obtenidos en el uso de la heramienta por parte de un grupo de estudiantes. Finalmente, la Sección IV presenta las principales conclusiones y trabajos futuros.

II. Arquitectura del laboratorio remoto

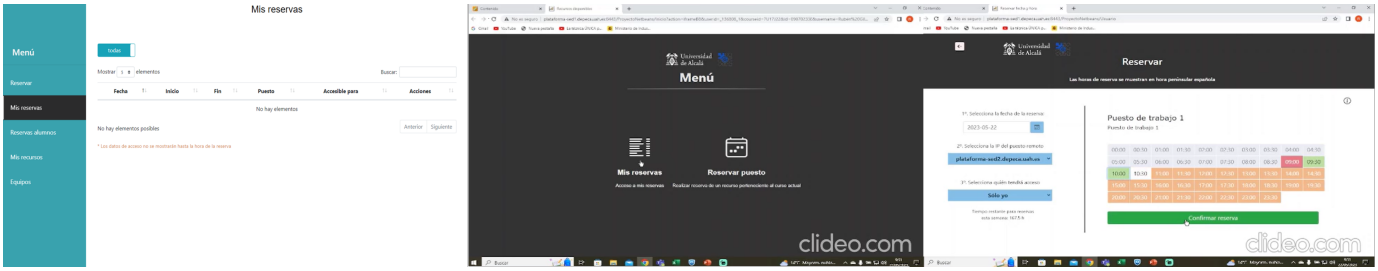
La Universidad de Alcalá dispone de un sistema de gestión del aprendizaje para almacenar cursos online, así como proporcionar información e interacción entre alumnos y profesores. Gracias a un sistema de autenticación, los estudiantes pueden acceder a los diferentes servicios en línea ofrecidos por la Universidad. El sistema de laboratorio remoto consta de las siguientes partes:

1) Un sistema de reservas en línea, que asigna diferentes roles en función del registro, con capacidad de proporcionar acceso y controlar recursos remotos configurados en línea. Este sistema de reservas consta de una base de datos y de un interfaz desarrollados para su funcionamiento.
2) Una unidad remota, que estará disponible para su uso tanto por profesores como por estudiantes. Esta plataforma puede servir a usuarios en línea y presenciales, y consta de dos tipos de elementos físicos: el elemento de práctica formado por una tarjeta electrónica (p.ej., tarjeta electrónica FPGA NEXYS4) que se debe utilizar para el mismo experimento del laboratorio presencial y un módulo de gestión que hace posible el control remoto de la práctica.

Se consideran como usuarios registrados aquellos autenticados mediante los mecanismos establecidos y el acceso VPN (Virtual Private Network, en inglés). Para ello, el servicio de reservas en línea obtiene y reutiliza los datos de los usuarios registrados. Estos usuarios acceden al sistema de reservas online con dichas credenciales. El sistema de reservas en línea desarrollado puede funcionar de manera independiente, en las instalaciones de la institución o en la nube. A través del sistema, los usuarios pueden realizar reservas anticipadas del laboratorio remoto disponible, programar reservas periódicas (esta función es exclusiva para los profesores) y acceder al laboratorio remoto.

A. Sistema de gestión de reservas

El sistema de reservas en línea permite gestionar las relaciones entre los usuarios y el laboratorio remoto. Existen dos perfiles diferentes (destinado para estudiantes y para profesores) que proporciona diferentes opciones de gestión. En primer lugar, el sistema comprueba si el usuario pertenece a la lista de usuarios del curso y si ya está registrado. En caso



(a) (b) (c)

Fig. 2. Sistema de reservas desarrollado para el profesor (a); sistema de reservas del alumno; ejemplo de reserva del puesto en diferentes tramos horarios (c).

contrario, el usuario será dado de alta en una base de datos. Aquí, el usuario podrá gestionar todas las reservas realizadas o realizar nuevas reservas.

Se han definido diferentes roles en el sistema de reservas: 1) el administrador del sistema, que es el técnico responsable del correcto funcionamiento del software y de la gestión de la base de datos; 2) el administrador remoto del laboratorio, que tiene la capacidad de crear nuevos espacios de laboratorio, añadir equipos, configurar el número de alumnos por equipo, o definir los horarios disponibles; 3) los profesores, que disponen de capacidades de reserva ampliadas, sin restricciones horarias, y que pueden modificar las reservas realizadas por los alumnos; 4) los estudiantes, que tienen capacidades de reserva limitadas y se les permiten solicitar determinados límites de tiempo específicos.

Se ha creado una base de datos que almacena información sobre usuarios y cursos en una serie de tablas definidas. Concretamente, estas tablas almacenan información relacionada con los cursos proporcionando un identificador que se designa automáticamente. Además, se crea una lista de alumnos inscritos en el curso. Una vez que el alumno está inscrito en el curso, los datos se almacenan en una tabla de usuarios. Por último, una tabla de recursos almacena información relacionada con cualquier configuración de laboratorio remoto que pertenezca a un curso. Cada configuración tiene un identificador único designado automáticamente, un nombre de laboratorio remoto y una descripción.

Por otro lado, se han desarrollado dos interfaces del sistema de reservas en función del rol del usuario que accede. En el caso de que el usuario sea un profesor, la interfaz permite a los profesores crear nuevas actividades, añadir alumnos a grupos de trabajo, realizar nuevas reservas, y ver las reservas realizadas tanto por el propio usuario como por los alumnos del curso. Una vez creado el grupo de alumnos y actividades, cualquier usuario puede reservar el recurso creado por el profesor. El acceso al sistema de reservas por parte del alumno se muestra en la Figura 2b donde pueden comprobar las reservas efectuadas y reservar un puesto remoto (Fig.2c). El alumno debe seleccionar las franjas horarias que más le interesen, dentro de las limitaciones horarias para el tipo de cuenta de usuario. La selección debe tener franjas horarias contiguas. Además el sistema de reservas informa al usuario si ha alcanzado el tiempo máximo asignado para reservar recursos en un determinado curso. Cada vez que se reserve un puesto, el alumno recibirá una contraseña para acceder al laboratorio mediante la aplicación de escritorio remoto.

B. Ejemplo de unidad remota

La herramienta de laboratorio remoto propuesta se divide en dos módulos: la placa electrónica de desarrollo a programar y una aplicación web para controlar y observar el montaje experimental. El montaje está elaborado de forma que permita la ejecución de múltiples prácticas sin requerir ajustes frecuentes. Por ejemplo, la interfaz desarrollada permite gestión remota de ciertas escalas y parámetros del de un osciloscopio.

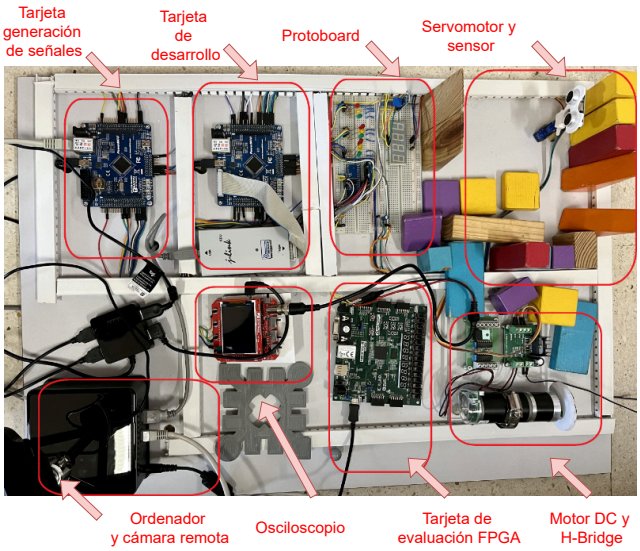


Fig. 3. Plataforma de unidad remota.

La Figura 3 muestra un ejemplo de laboratorio remoto desarrollado con los siguientes componentes: 1) un ordenador remoto, con el sistema operativo y las herramientas necesarias instaladas de forma similar a los lugares físicos; 2) un sistema de generación de señales para proporcionar señales de entrada reales y secuencias de entrada a través de una aplicación web local;3) tarjeta electrónica de desarrollo NEXYS4 empleada para el desarrollo de los experimenos presentados en este trabajo. Esta tarjeta esta conectada al ordenador para descargar el código de prácticas y depurar su correcto funcionamiento; 4)

Un servomotor y un sensor de ultrasonidos, para una práctica mixta de electrónica y control;5) una protoboard conectada a la placa de desarrollo con los componentes de salida necesarios como displays, LEDs, etc; 6) un osciloscopio configurable de bajo coste capaz de mostrar diferentes señales seleccionadas mediante un multiplexor analógico; y 7) cámaras conectadas al ordenador para ver el funcionamiento de la práctica en tiempo real.

III. Resultados experimentales

Esta investigación pretende proporcionar información sobre los beneficios o desventajas del uso del laboratorio remoto. Para ello, esta herramienta ha sido propuesta para su uso a un grupo de 14 estudiantes de la asignatura de Diseño Electrónico para comprobar el correcto funcionamiento de un diseño previamente desarrollado en el laboratorio presencial. Se trata de una asignatura de carácter obligatorio que se cursa en la titulación de Grado en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación. Está formada por un total de 6 créditos ECTS y pretende proporcionar al alumno conocimientos sobre metodologías y herramientas para el diseño y verificación de sistemas electrónicos, tanto analógicos como digitales.

El objetivo de la práctica propuesta se centra en el diseño de un sistema capaz de encontrar una contraseña numérica comparando su valor con tres diferentes subsistemas: un generador de números aleatorios, un contador descendente, o un divisor de frecuencia (prescaler), seleccionados a partir de un multiplexor. Si el sistema encuentra dicha contraseña se generará una alarma (se encenderá un led). Para llevar a cabo este sistema se diseña por separado cada uno de los componentes del esquema que se presenta en la figura 4: prescaler, cronómetro, generador de números aleatorios (LFSR), multiplexor, caja fuerte (safe box), y registro.

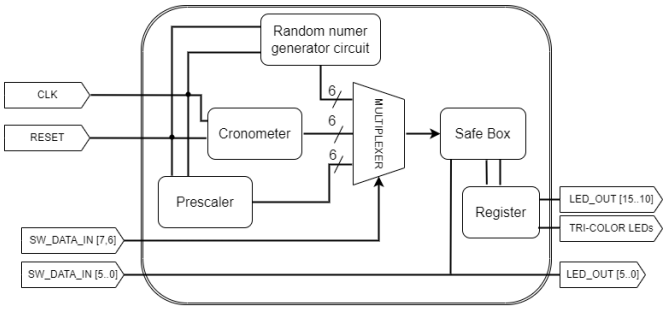
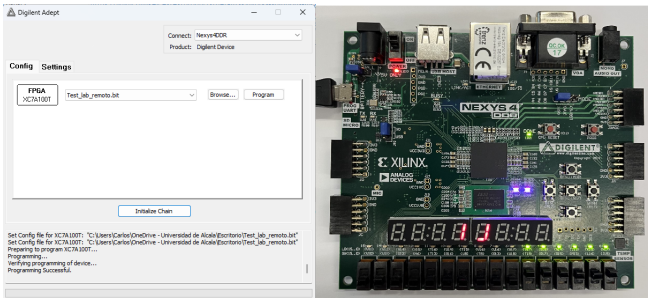


Fig. 4. Diseño electrónico propuesto en la práctica.

Para el diseño electrónico en dispositivos basados en FPGA (Field Programable Gate Array, en inglés) se emplea la herramienta Vivado de Xilinx y el lenguaje VHDL (Very High Speed Integrated Circuits, en inglés) en el laboratorio presencial. Los estudiantes realizan la práctica siguiendo tres etapas: la primera etapa consiste en describir el diseño y la simulación funcional verifica su correcto funcionamiento. La etapa de síntesis consiste en traducir el diseño a un formato intermedio conocido como lista de componentes (netlist). En la etapa de implementación se asignan los elementos lógicos de la lista de conexiones a las ubicaciones físicas del chip FPGA. Xilinx Vivado generará un archivo bitstream que puede ser programado en una tarjeta hardware FPGA como la que se presenta en la Figura5a. Este archivo contiene la información de configuración en un archivo binario que se puede utilizar para programar la FPGA. Por último, se utiliza el software Digilent Adept para programar el bitstream generado en la FPGA (Fig.5b). Este paso configura la FPGA para que se comporte de acuerdo con el diseño VHDL y puede ser realizado mediante la herramienta de laboratorio remoto.



(a) (b)

Fig. 5. Software para descarga del diseño en tarjeta (a); Tarjeta de evaluación FPGA Nexys4 (b)

Los resultados obtenidos de este trabajo derivaron de un cuestionario cumplimentado por los alumnos. El cuestionario se realizó al final del curso académico 23-24 destinado a conocer el grado de aceptación de la herramientas de laboratorio remoto empleada en la verificación del diseño. Este cuestionario estaba formado por un total de 17 preguntas (escala Likert de 10 puntos, siendo 1 el valor más bajo y 10 el más alto). Se tomó como punto de partida para el diseño del cuestionario el trabajo previo de [20], y que ha servido para evaluar otras experiencias docentes. La Figura 6 muestra la preferencia en la presencialidad para la primera parte del diseño.

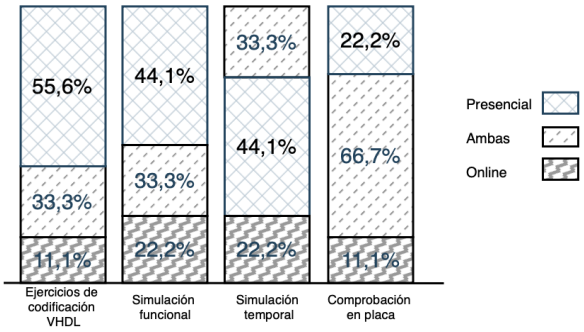


Fig. 6. Resultados obtenidos en la encuesta a los estudiantes participantes sobre el uso de herramientas de diseño electrónico.

Por ejemplo, más de la mitad de los estudiantes (55,6%) prefieren realizar las tareas de programación en VHDL de forma presencial. También muestran su preferencia realizar las simulaciones en el laboratorio presencial para contar con el apoyo del profesor. Por último, los estudiantes destacan el

TABLE II
RESULTADOS OBTENIDOS EN LA ENCUESTA A LOS ALUMNOS PARTICIPANTES. LOS VALORES DE ESCALA EQUIVALEN: 10. TOTALMENTE SATISFECHO; 1. TOTALMENTE EN DESACUERDO.

Preguntas de la encuesta al alumnado	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
1.¿Crees que supone una buena ayuda para aprobar/aprovechar mejor la asignatura realizar la actividad de laboratorio remoto?	-	-	-	-	-	-	-	3	3	3
2.¿Cuál es tu satisfacción global con la actividad en remoto?	-	-	-	-	-	1	3	3	1	1
3.¿Te parece una buena idea extenderlo a otras actividades de la asignatura?	1	-	-	-	-	-	-	-	-	8
4.¿Te ha resultado fácil "entrar" / login al sistema remoto?	-	-	-	-	-	-	1	3	3	2
5.¿Te has sentido cómodo usando el sistema de puesto remoto?	-	-	-	-	-	-	1	3	3	2
6.¿Has tenido sensación de control y manejo fácil de la maqueta?	-	-	-	-	2	-	1	3	2	1
7.¿Has encontrado el sistema sin acceso o con problemas de conectividad?	2	1	-	-	-	1	2	2	-	1
8.¿Conocías la opción de los laboratorios en remoto para docencia?	2	1	-	1	1	-	2	1	-	1
9.¿La actividad propuesta está adecuadamente planteada?	-	-	-	-	-	1	2	2	2	2
10.¿Crees que el desarrollo de esta actividad ayuda a consolidar los conceptos teóricos?	-	-	-	1	-	1	1	-	4	1
11.¿Consideras adecuados los ejercicios propuestos para la actividad de laboratorio remoto?	-	-	-	-	1	1	-	2	3	2
12.¿Los materiales y herramientas recomendados por el profesor han sido adecuados?	-	-	-	-	1	2	-	2	1	3

Preguntas de respuesta abierta
13.Si has tenido que esperar para usarlo, puedes decirnos algo sobre la causa/motivo?
14.¿Ha sido adecuado el tiempo asignado para cada reserva/conexión al sistema remoto?
15.¿Cuántas reservas / conexiones en remoto crees que utilizarías con respecto a las clases presenciales a lo largo del curso?
16.Para cada una de las actividades de laboratorio de la asignatura de Diseño Electrónico, ¿indica si crees que usarías la plataforma en lugar de venir a clase presencialmente?
17.¿valorarías positivamente la posibilidad de hacer una tutoría en el puesto remoto?

uso de la plataforma remota únicamente como elemento de validación. 7 de cada 10 Estudiantes prefieren compaginar la presencialidad con el uso del laboratorio remoto.

También se realizaron preguntas sobre el número de reservas de laboratorio remoto necesarias frente al uso de tutoría presencial. Los estudiantes se muestran pasivos ante el número de veces que usarían la herramienta de laboratorio remoto e inciden en su preferencia con las tutorías presenciales como herramienta necesaria para el desarrollo de las tareas. Este resultado nos remarca la herramienta de laboratorio remoto como método orientado a la comprobación del diseño. Además, el tiempo de uso de la herramienta remota proporcionado ha sido el adecuado y se ha establecido en un total de 2 horas tal y como se presenta en la figura 7).

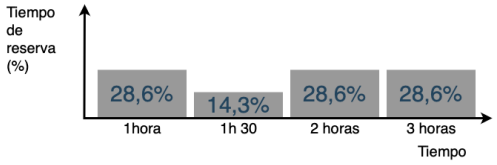


Fig. 7. Resultados obtenidos en la encuesta a los estudiantes participantes sobre el tiempo de uso de la herramienta de laboratorio remoto.

Como puede desprenderse de la Tabla II, las respuestas fueron positivas con respecto a la integración y el uso de la herramienta de laboratorio remoto como recurso de verificación en los diseños de la asignatura. Según se desprende de las preguntas 1 y 2, los alumnos mostraron una gran aceptación por el uso de esta herramienta y consideraron como punto positivo su uso en otras actividades de la asignatura (pregunta 3). Los laboratorios remotos a distancia pueden diferir a los tradicionales, a los que están acostumbrados los estudiantes. No obstante, la pregunta 4 también recibió respuestas positivas con respecto a la facilidad en el acceso al laboratorio remoto. Además, los alumnos consideraron que la plataforma proporciona un manejo fácil y han tenido sensación de control (resultado obtenido de las preguntas 5 y 6). Sin embargo, muchos de ellos han experimentado problemas de acceso, debido principalmente a una configuración errónea inicial con los permisos de acceso (pregunta 7).

Se destaca que gran parte de los alumnos encuestados desconocía la opción del laboratorio en remoto para docencia. Igualmente, la figura del profesor ha sido positivamente valorada a la hora de dirigir la actividad presencial y remota, lo que viene a comprobar el papel del docente en el laboratorio (preguntas 8 y 9). Finalmente, uno de nuestros objetivos eran integrar esta herramienta en el aprendizaje para ayudar en la consecución de actividades propuestas, por lo que las preguntas destinadas a conocer la percepción de los alumnos eran altamente relevantes (preguntas 10-17). Así, los alumnos respondieron como muy valioso el aprendizaje con la herramienta de laboratorio remoto, y les brindó la posibilidad de comprobar el diseño de forma remota.

IV. CONCLUSIONES

Los laboratorios virtuales y remotos tienen la ventaja de ser accesibles 24 horas al día, y los estudiantes tienen la posibilidad de realizar experimentos a distancia a través de Internet desde cualquier lugar. Este trabajo presenta el desarrollo de un laboratorio remoto adaptable y escalable gracias al diseño de un único sistema de reserva y de un sistema de generación y visualización de señales. Sus prestaciones permiten la realización de ejercicios prácticos en diferentes campos, tales como la electrónica digital, control, el diseño

electrónico en FPGAs o SoC, simplemente modificando la tarjeta de desarrollo del usuario. La funcionalidad del laboratorio remoto se ha evaluado gracias a las impresiones recogidas por un grupo de estudiantes de la asignatura de Diseño Electrónico. Los usuarios han podido comprobar el correcto funcionamiento de sus diseños y los resultados muestran una actitud positiva por parte del alumnado hacia esta herramienta. Así, a la vista de dichos resultados, dicha propuesta puede ser relevante en un futuro como herramienta de validación, a la vez que este estudio sirve de base para el desarrollo de experimentos de laboratorio a distancia en la enseñanza de la ingeniería en diferentes áreas docentes. En cuanto a posibles líneas de trabajo futuras, se pretende mejorar la aplicación osciloscopio y generador de señales en una única tarjeta electrónica de hardware reconfigurable.

ACKNOWLEDGMENT

Nuestros agradecimientos van dirigidos al proyecto Erasmus+ DECEL-Digital Electronics Collaborative Enhanced Learning (2021-1-ES01-KA220-HED-000032189) y al proyecto de innovación UAHEV/1440 de la Universidad de Alcalá.

REFERENCES

[1] Balamuralithara, B., Woods, P. C. (2009). Virtual laboratories in engineering education: The simulation lab and remote lab. Computer Applications in Engineering Education, 17(1), 108-118.

[2] Musa, R. Z. (2012). Laboratorios Remotos: Actualidad y tendencias futuras. Scientia et technica, 2(51), 113-118.

[3] García-Orellana, C. J., Macías-Macías, M., González-Velasco, H., García-Manso, A., Gallardo-Caballero, R. (2016). Remote laboratory experiments of Analog Electronics based on 'RedPitaya'. Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE) (pp. 1-7).

[4] Ruiz, A. C., López, S., Ruiz, M., Arriaga, J., Castro, G. D. A., Barrera, E. (2016). Integración de un laboratorio remoto de electrónica en una asignatura de grado. In Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (TAEE) (pp. 134-140).

[5] Hernandez-Jayo, U., Garcia-Zubia, J. (2016). Remote measurement and instrumentation laboratory for training in real analog electronic experiments. Measurement, 82, 123-134.

[6] Yesa, S. R., García-Zubía, J., Temiño, J. L. G., Sáenz, J. V., Martínez, I. A. (2020). Uso de un laboratorio remoto de FPGAs para la realización de prácticas en grados de ingeniería. Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica (TAEE).

[7] Peinado, Ó. O., Ramos, J. C., Durán, J. A. S., González, R. J. N., López, J. A. H. (2022). Mejora de un laboratorio remoto de Electrónica Digital mediante el uso de una Raspberry Pi 4. Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (TAEE).

[8] Peinado, Ó. O., Ramos, J. C., Durán, J. A. S., González, R. J. N., Márquez, A. D., Córdoba, J. A. B. (2020). Laboratorio Remoto de Electrónica Digital Basado en FPGA. In XIV Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica (TAEE) (pp. 285-290).

[9] Morgan, F., Cawley, S., Newell, D. (2012). Remote FPGA lab for enhancing learning of digital systems. ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems (TRETS), 5(3), 1-13.

[10] Cardoso, A., Vieira, M., Gil, P. (2012). A Remote and Virtual Lab with Experiments for Secondary Education, Engineering and Lifelong Learning Courses. International Journal of Online Engineering, 8.

[11] Lerro, F., Roggiano, S. M., Merendino, C. (2016). Innovando Prácticas de Enseñanza y de Evaluación de Aprendizajes con Empleo de Laboratorio Remoto. Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (TAEE 2016) (pp. 91-96).

[12] Stan, C. M., Scripcariu, L. (2023, March). Development of Secure Remote Connection for the Electronics Laboratory Based on Red Pitaya Board. International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE) (pp. 1-6).

[13] Perretti, G., Fernández, R., Mejías, C., Aponte, C. (2018). Development of virtual instrumentation applied to telecommunications laboratories using the Red Pitaya board. Rev. Ing. UC, 25, 266-275.

[14] Stan, C. M., Neacsu, D. (2022). A Remote Laboratory for Linear Electronics Based on the Red Pitaya Board. International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE) (pp. 113-117).

[15] R. G. Vera, J. L. L. Galilea, A. G. Vicente, Á. De-La-Llana-Calvo and I. B. Muñoz. (2024). A Flexible Framework for the Deployment of STEM Real Remote Laboratories in Digital Electronics and Control Systems. IEEE Access, vol. 12, pp. 14563-14579, 2024.

[16] Calvo Gordillo, I., Zulueta Guerrero, E., Gangoiti Gurtubay, U., López Guede, J. M. (2008). Laboratorios remotos y virtuales en enseñanzas técnicas y científicas. Ikastorratza. e-Revista de didáctica.

[17] Stan, C. M., Neacşu, D. (2022). A Remote Laboratory for Linear Electronics Based on the Red Pitaya Board. International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE) (pp. 113-117).

[18] Wan, H., Liu, K., Lin, J., Gao, X. (2019, May). A web-based remote FPGA laboratory for computer organization course. In Proceedings of the 2019 on Great Lakes symposium on VLSI (pp. 243-248).

[19] Pastor, J. S., Gonzalez, I., Lopez, J., Gomez-Arribas, F., Martinez, J. (2004, August). A remote laboratory for debugging FPGA-based microprocessor prototypes. IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (pp. 86-90).

[20] Cruz C. (2023). Estrategias para fomentar la cooperación en la gestión de proyectos tecnológicos en asignaturas de ingeniería. Educación, tecnología, innovación y transferencia del conocimiento. Dykinson (pp. 61-70).

Módulo de radiocomunicaciones digitales para aplicaciones docentes y sensorización remota

Javier Diz-Bugarín
Dep. Electrónica
IES Escolas Proval
Nigrán, España
javier.diz@edu.xunta.gal

José L. Rodríguez-Fernández
Dep. Electrónica
IES Escolas Proval
Nigrán, España
chechu@edu.xunta.gal

***Abstract*—Presentamos un ecosistema de hardware y software de radiocomunicaciones que implementa múltiples esquemas de modulación digital utilizando un mismo módulo transceptor, pensado para prácticas de formación profesional y proyectos reales de innovación tecnológica. Hemos realizado un hardware de diseño propio para poder adaptarlo a nuestras necesidades docentes, y desarrollado programas propios usando bibliotecas existentes en Arduino para cambiar fácilmente el tipo de modulación y los parámetros del sistema. La flexibilidad del conjunto desarrollado permite realizar numerosas experiencias didácticas o proyectos de aplicación. Se han previsto aplicaciones reales como medida remota de parámetros ambientales, detección de inundaciones u otras.**

Keywords—Radiocomunicaciones, modulaciones digitales, transceptores, formación profesional.

I. INTRODUCCIÓN

En este artículo se presenta un ecosistema de hardware y software con capacidad de transmisión y recepción usando modulaciones digitales como OOK, FSK, PSK/MSK y LoRa, pensado para prácticas de formación profesional en asignaturas de comunicaciones, caracterización de antenas (realización del diagrama de radiación usando la capacidad de medida RSSI del receptor), y en proyectos reales de innovación tecnológica y educativa.

En el mercado ya existen numerosos módulos con transceptores y microcontroladores integrados como Moteino [1], ESP32 u otros. Estos módulos son económicos y de fácil uso, pero tienen un hardware cerrado que resulta difícil de modificar para adaptarlo a diferentes tipos de antenas o rangos de frecuencias, con un diseño de circuito impreso poco cuidado, planos de masa insuficientes, cableados largos, conectores y antenas de baja calidad o mal adaptadas.

Hemos preferido realizar módulos hardware de diseño propio (Fig. 1) para poder adaptarlos a nuestras necesidades docentes, basados en un un microcontrolador ATMEGA328P combinado con un módulo transceptor HopeRF [2] que incluye circuitos como el SX1231 (FSK) o el SX1276 (LoRA) de Semtech [3], ampliamente utilizados en sistemas comerciales.

Estos transceptores se utilizan generalmente con un esquema de modulación fijo, pero el mismo módulo puede programarse para implementar diferentes modulaciones digitales como OOK, FSK, MSK o LoRa. De esta forma es posible comparar la eficiencia de las comunicaciones con cada uno de los métodos y definir la configuración más adecuada para una situación en particular.

El diseño de la placa de circuito impreso está optimizado para maximizar el rendimiento del conjunto transceptor-antena (y con ello la distancia de transmisión). Está previsto el uso de diferentes tipos de antenas integradas como monopolo o patch, y también pueden conectarse antenas comerciales (Yagi) mediante un conector RF opcional. El diseño del circuito podrá modificarse por los propios alumnos para adaptarlo a proyectos específicos.

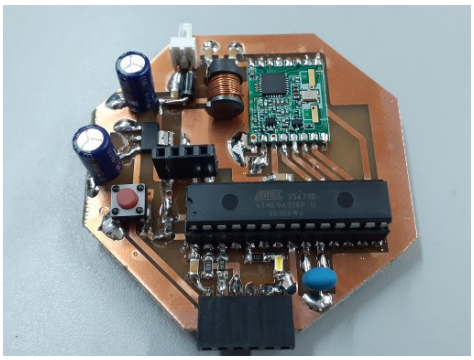


Fig. 1. Ejemplo de prototipo del sistema.

El sistema resultante es compacto y portátil, de bajo consumo, alimentado por usb o con baterías e incluye un conector de programación ISP.

La programación se hace desde el IDE Arduino y se ha desarrollado un programa propio que permite cambiar fácilmente el tipo de modulación y los parámetros del sistema como la frecuencia central, tasa de bits, desviación de frecuencia o ancho de banda. La programación se ha basado en bibliotecas de funciones ya existentes como LowPowerLab o RadioLib modificadas para este caso particular. Este es uno de los puntos fuertes del sistema, ya que sin modificaciones importantes de hardware o software es posible realizar numerosas experiencias didácticas o proyectos de aplicación.

En una primera versión se han utilizado los módulos RFM69 de HopeRF que disponen de modulación OOK/FSK. Estos módulos han permitido la puesta a punto del hardware y una primera versión de software, y tienen la particularidad de ser compatibles en patillaje con los módulos RFM95 del mismo fabricante, que añaden modulaciones adicionales como MSK o LoRa. De esta forma el mismo diseño de placa de circuito impreso puede reutilizarse con distintos módulos. Además está previsto hacer versiones del sistema con módulos de otros fabricantes como RF Solutions, NiceRF, etc.

Como aplicaciones reales se ha pensado en una red de sensores distribuídos, medida remota de parámetros meteorológicos o ambientales como la temperatura del aire o el agua de mar, control remoto de ventilación, la creación de una red comarcal de sensores para aplicaciones como agricultura, detección de inundaciones, etc.

II. ANTECEDENTES

Este proyecto parte de desarrollos realizados anteriormente en el Departamento de Electrónica del IES Escolas Proval, en particular el proyecto de automatización de la estación meteorológica del centro [4,5] que lleva en marcha casi 20 años y se ha mejorado desde entonces en función de los avances tecnológicos. En particular, la irrupción de Arduino y la aparición de nuevos sensores digitales utilizados en nuestras actividades docentes [6-8] han facilitado en gran medida este proceso de actualización. La participación en cursos anteriores en actividades como el Desafío Cansat [9] nos ha permitido experimentar con nuevos módulos de comunicaciones como los transceptores SX127x de Semtech [3], que ofrecen soluciones de elevadas prestaciones a un coste mínimo y con gran facilidad de uso. Estos módulos ofrecen una alternativa a los antiguos módulos FSK RTFQ1/RRFQ1 de RF Solutions [10,11] utilizados en el proyecto original y que siguen en uso desde entonces.

Además, el desarrollo de la Internet of Things (IoT) ha facilitado enormemente el desarrollo de sistemas de adqusición remota de información, alcanzando distancias de decenas de quilómetros con las modulaciones más eficientes como LoRa. El amplio rango de aplicaciones de estos sistemas, tanto en el campo docente como científico o industrial, unido a las oportunidades laborales que ofrecen, hace necesario impulsar la formación de nuestro alumnado en este tipo de tecnologías que favorecerán su integración en el mercado laboral, mediante la realización de proyectos de doble uso, como innovación tecnológica y educativa.

III. HARDWARE DEL SISTEMA

Para la definición del hardware del sistema se ha partido de los requisitos del Desafío Cansat, que establece unas dimensiones máximas y unos requisitos de transmisión concretos. Además el módulo se ha diseñado para la compatibilidad con los equipos de prácticas utilizados por los alumnos en las asignaturas de programación de microcontroladores. Esto ha permitido crear un módulo compacto, portátil y polivalente que podremos reutilizar para usos docentes.

A. *Características generales*

1) El módulo tendrá como base una placa de circuito impreso de doble cara cuadrada (o circular) de 66 mm de lado (diámetro). Esta dimensión corresponde al requisito de CanSat, por lo que para otros usos podría aumentarse el tamaño para mejorar las prestaciones. Sin embargo este tamaño resulta adecuado para diseñar un sistema portátil que pueda alojarse en una carcasa protectora compacta y resistente.

2) Una de las caras del circuito impreso conservará integramente la capa de cobre para funcionar como plano de masa de una antena monopolo o tipo patch. En el centro de esta cara habrá una perforación para la conexión activa de la antena, pero se evitarán huecos en el resto del plano de masa. En lugar de una antena fija también podrá montarse un conector para acoplar otro tipo de antenas comerciales.

3) En el lado contrario se situarán todos los componentes electrónicos, a ser posible de montaje superficial para evitar taladros innecesarios.

4) El esquema electrónico estará formado por un microcontrolador compatible con Arduino como el Atmega328P-PU (preferiblemente en encapsulado DIP sobre zócalo para poder extraerlo fácilmente). Este microcontrolador se ha escogido por compatibilidad con los equipos de prácticas existentes [7]. Puede usarse el oscilador interno de 8 MHz para evitar montar un resonador o cristal externo, reduciendo el número de componentes (en cualquier caso con una tensión de alimentación de 3.3V este microcontrolador no podría funcionar a 16 MHz).

5) El módulo de radio irá soldado directamente en la placa, con la conexión de antena lo más próxima posible al centro de la placa para unión directa con la antena sin tramos de pista largos que introduzcan pérdidas o desadaptaciones.

6) La alimentación de los circuitos será a 3.3V por compatibilidad con la mayoría de módulos de radio existentes, que no toleran una tensión de 5V. La placa llevará un regulador (tipo LM1117-3.3 o equivalente) para reducir la tensión externa cuando reciba alimentación por USB o similar. También habrá un conector tipo Molex-2 para entrada de batería externa 3.6V (LiPo o equivalente).

7) Conexión con ordenador mediante un adaptador serie-usb FT232R o FT231X de FTDI (o compatible) para programación, conexión de datos y alimentación externa. Las líneas de datos llevarán resistencias de 100 Ω para limitar la intensidad en caso de fallo.

8) Estará prevista la conexión de sensores u otros elementos mediante comunicación I2C (conector SIL-4 o similar).

9) La comunicación entre el microcontrolador y el módulo de radio se hará mediante el bus SPI integrado y las líneas adicionales que sean precisas para interrupciones, reset u otros usos. La línea de alimentación del módulo de radio llevará un filtro LC para evitar interferencias y los condensadores de desacoplo necesarios para evitar problemas por picos de consumo elevados.

B. *Selección de módulos de radio*

En el mercado existe una amplia gama de módulos de radiocomunicaciones digitales para las bandas libres de frecuencias ISM de 433/868 Mhz (Europa) o 915 Mhz (EEUU). Hemos seleccionado estas bandas de frecuencia porque permiten alcanzar distancias de transmisión amplias, lo que no sería posible en la banda de 2.4 GHz. Además estas frecuencias también son utilizadas por el sistema de modulación LoRa, que es uno de los que pretendemos implementar. Este requisito obliga a que los módulos utilicen o sean compatibles con circuitos integrados Semtech. Otro requisito es que los módulos sean fácilmente integrables en un sistema Arduino. Y para obtener la máxima distancia resulta conveniente que la potencia de transmisión sea la máxima posible, típicamente 20 dBm o superior. Existen además restricciones en el ciclo de trabajo que típicamente no puede exceder el 1% del tiempo total de transmisión.

Dentro de la tipología de módulos FSK se incluyen los módulos de RF Solutions RTFQ1 (emisor) y RRFQ1 (receptor), que funcionan a 433 MHz con 5 dBm de potencia. De este mismo fabricante son los módulos Alpha (433/868MHz, 7dBm), Zeta y Zeta20 (868MHz, 13/20dBm) o Zulu (transceptor, 868MHz, 20dBm). En sistemas Arduino se utilizan frecuentemente los módulos CC1101 (433/868MHz, 12dBm) o el APC220 (433MHz, 13dBm). Otro fabricante es HopeRF, que dispone de módulos OOK/FSK como el RFM69 (13/20dBm).

Respecto a los módulos LoRa, en muchos casos emplean circuitos integrados de Semtech como el SX1272 o SX1276. Un ejemplo es el RF-LORA-868-SO de RF Solutions, los módulos RFM95/96 de HopeRF (433/868MHz), el CMWX1ZZABZ de Murata o el RN2483 de Microchip.

Entre todas estas opciones nos hemos decidido por los módulos de HopeRF RFM69 (FSK) y RFM95 (LoRa) por motivos de disponibilidad, bajo precio y compatibilidad de dimensiones y patillaje entre módulos. En particular, los modelos RFM69HCW y RFM95W son físicamente idénticos, lo que permite diseñar una misma placa de circuito impreso para aplicaciones en las que sea suficiente un sistema FSK (más económico y rápido pero con menor alcance) en lugar de usar LoRa (con mejores prestaciones pero más caro y con menor velocidad de datos).

El módulo RFM95W resulta enormemente versátil, ya que permite implementar modulaciones OOK, FSK, GFSK, MSK y LoRa simplemente cambiando los parámetros de comunicación. En cualquier caso para futuras versiones hemos previsto rediseñar la placa para otros módulos como los de RF Solutions, NiceRF, Murata o Microchip.

C. *Diseño y construcción de los prototipos*

En base a las especificaciones anteriores hemos construido y probado varias versiones del sistema en las que se han detectado y solucionado diferentes fallos.

La primera y segunda versiones se han realizado con un módulo RFM69HW (FSK) y ha servido para poner a punto una primera versión del software y realizar distintas pruebas de distancia de transmisión. Como resultado se han incluido más condensadores de desacoplo en las líneas de alimentación y modificado las conexiones con el microcontrolador (bus SPI, pin de interrupción y reset) para adaptarlas a los requisitos de las bibliotecas de funciones empleadas.

La tercera versión (y actual) se ha diseñado para los módulos RFM69C/RFM95 y ha servido para hacer pruebas combinadas FSK/LoRa con los mismos módulos. En este prototipo el pin DIO0 del módulo de radio se ha conectado al pin D9 del microcontrolador, RESET a D8 y se ha añadido un led indicador en el pin D4 del microcontrolador. En la Fig. 2 se representa el esquema electrónico del módulo.

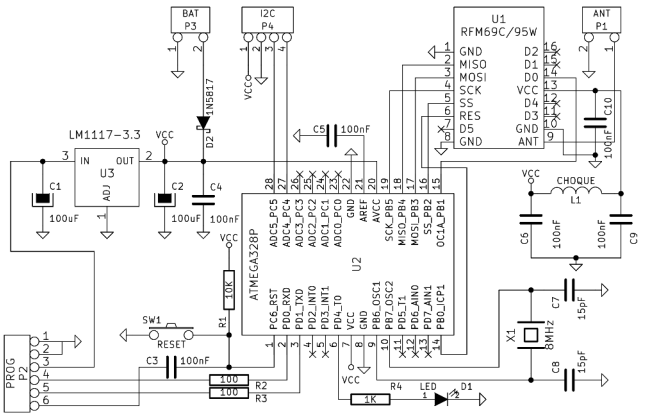


Fig. 2. Esquema electrónico del módulo.

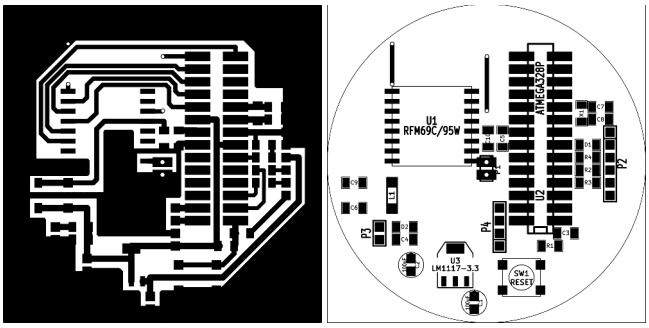


Fig. 3. Trazado de pistas del módulo y plano de componentes.

La Fig. 3 presenta el trazado de pistas y plano de montaje de componentes, y en la Fig. 4 puede verse el aspecto del módulo ensamblado por ambos lados (componentes y plano de masa con antena).

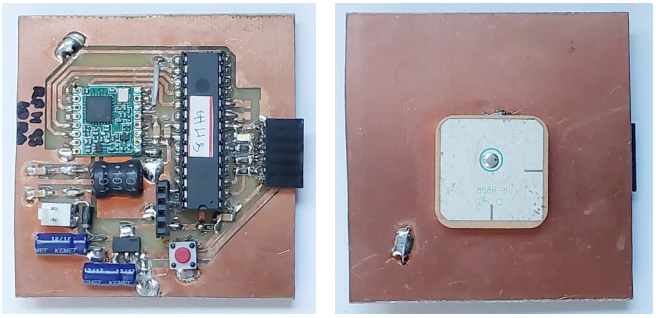


Fig. 4. Módulo ensamblado: a) lado componentes b) lado antena.

IV. Diseño del software

El programa de control de los módulos se ha elaborado bajo el entorno Arduino y está pensado para poder modificar fácilmente el tipo de modulación y los parámetros del sistema como la potencia de transmisión, frecuencia central, tasa de bits, desviación de frecuencia o ancho de banda u otros parámetros específicos de LoRa como el factor de dispersión (SF) o el factor de codificación (CR).

En primer lugar se ha pensado en utilizar la biblioteca de funciones proporcionada por el fabricante de los módulos HopeRF, pero hemos descubierto algunos problemas de funcionamiento y se ha descartado por este motivo y para facilitar la compatibilidad con otros módulos. Hemos realizado una revisión de bibliotecas de funciones disponibles, que se detallan a continuación. El criterio fundamental es que una misma biblioteca permita usar todos los tipos de modulación (y parámetros asociados) con cada tipo de módulo, ya que en muchos casos las bibliotecas se "especializan" en un único tipo de modulación.

A. *Revisión de bibliotecas de radio*

1) LowPowerLab [12]: esta biblioteca está pensada para módulos FSK basados en Semtech SX1231 como el RFM69 de HopeRF. También admite modulación OOK pero no soporta LoRa. Está algo anticuada (2016). El software está bien elaborado y genera programas compactos y eficientes. Esta biblioteca se ha usado para realizar un primer programa de pruebas que ha servido de referencia para las versiones posteriores.

2) Arduino-LoRa [13]: Esta biblioteca vale para módulos Semtech SX127x o compatibles (HopeRF). El código no

está bien elaborado, la documentación y los ejemplos proporcionados están incompletos y resulta dificil de utilizar.

3) LoraRF-Arduino [14]: Vale para módulos Semtech SX126/7x o compatibles. Está actualizada. Sirve para modulación LoRa pero no admite FSK.

4) HopeRFLib [15]: Biblioteca proporcionada por el fabricante de los módulos. Sirve para módulos FSK y LoRa. Como ventajas tiene una estructura de control de parámetros muy clara, pero está bastante anticuada y presenta problemas en la medida de potencia y la sincronización entre transmisor y receptor.

5) RadioHead [16]: Biblioteca polivalente para un gran número de módulos de radio. Tiene el inconveniente de que no soporta los modos OOK/FSK para el módulo RFM95.

6) MySensors [17]: Biblioteca polivalente para un gran número de módulos y sensores, tiene el mismo inconveniente que RadioHead, no admite OOK/FSK para el módulo RFM95.

7) LMIC [18]: Muy completa pero está pensada sólo para módulos LoRa basados en Semtech SX127x. Está algo anticuada pero hay versiones modernizadas.

8) RadioLib [19]: Biblioteca polivalente para un gran número de módulos basados en Semtech SX123x, SX126/7x. Sirve para plataformas Arduino, ESP32, STM32 o Raspberry Pi. Admite el uso de todas las modulaciones en cada sistema. Como inconveniente se puede mencionar que usa una capa de abstracción de hardware (HAL) que complica algo la programación y aumenta el tamaño del código.

De todas las opciones disponibles hemos seleccionado la biblioteca RadioLib, ya que permite utilizar los módulos LoRa en modo OOK/FSK.

B. *Elaboración de los programas*

Actualmente hemos realizado programas para transmisión y recepción FSK para los módulos RFM69 y RFM95 y también una versión LoRa para pruebas de distancia. En particular el programa FSK permite la introducción de órdenes para activar o desactivar la transmisión y recepción, medir la potencia recibida en dBm y enviar la información a un ordenador, o introducir una etiqueta junto con la información recibida (útil, por ejemplo, para indicar un valor de ángulo de la antena cuando se está trazando el diagrama de radiación).

Además se ha añadido un visualizador lcd que permite visualizar los mismos datos cuando el sistema funciona en modo autónomo con batería.

Está previsto añadir más órdenes para modificar la frecuencia, ancho de banda u otros parámetros. También se propone añadir un módulo GPS para almacenar la posición del sistema y mejorar la precisión de medida de la distancia desde el transmisor.

Otra mejora del programa será la implementación del protocolo LoRaWAN para conectar con nodos remotos y enviar información de sensores u otros elementos.

V. ACTIVIDADES DOCENTES

A lo largo de cursos anteriores se han realizado diferentes prácticas y proyectos que han servido como base para la puesta a punto del sistema actual. Por ejemplo, en el curso 2019-20 un alumno creó un telemando con módulos ASK. En el curso 2020-21 otro alumno hizo un sistema de transmisión de sensores (DHT22, BMP180) con módulos FSK RTFQ1-RRFQ1 como proyecto de aplicación. En los cursos 2022-23 y 2023-24 los alumnos han colaborado en el diseño y montaje de las primeras placas con módulos HopeRF (RFM69 y RFM95) y también en las medidas de antenas realizadas con el medidor RigExpert AA-600 que han servido para definir completamente el sistema actual, aprovechando la participación del centro en el Desafío CanSat 2023 de la ESA (en el que este sistema funcionó como prototipo de reserva).

Una vez puesto a punto el nuevo sistema y verificados los módulos está previsto realizar un programa de actividades en los próximos cursos con el alumnado de módulos relacionados con microcontroladores y comunicaciones como “Equipos Microprogramables” o “Mantenimiento de Equipos de Radiocomunicación”. En estos módulos se pretenden alcanzar los siguientes objetivos y resultados de aprendizaje, entre otros: desarrollo de aplicaciones con microcontroladores y periféricos, tanto de hardware como elaboración de los programas de control. Manejo de documentación técnica y selección de la mejor solución para cada aplicación concreta y mantenimiento y reparación de averías en sistemas digitales y microprogramables. En el aspecto de comunicaciones se pretende adquirir competencias en el análisis de sistemas de radiocomunicaciones, optimización de funcionamiento, ajuste de elementos y resolución de averías.

Para alcanzar estos objetivos se proponen, entre otras, las siguientes actividades:

A. *Estudios teóricos y documentación*

Se hará una revisión de los módulos de comunicaciones que existen en el mercado, clasificándolos según sus características: potencia, consumo, distancia alcanzada, velocidad, tipo de modulación u otras. Establecer un criterio de selección para cada aplicación correcta. Prever alternativas en caso de rotura de stock. Se estudiarán los posibles diseños del circuito: esquema, trazado de pistas. Realizar diferentes versiones aportando mejoras. También se estudiarán los diferentes tipos de antenas, sus características, formas de montaje (cables, conectores) y adaptación de impedancia. Se estudiarán las posibles ventajas e inconvenientes para cada aplicación propuesta.

B. *Construcción de módulos de comunicaciones con transceptores integrados*

Se construirán módulos siguiendo el prototipo efectuado o proponiendo modificaciones para adaptarlo a proyectos concretos (módulos de lectura sensores, actuadores para domótica,…). Para cada tipo de módulo se harán al menos dos unidades para realizar pruebas compartivas. Como ejemplo, pueden usarse antenas tipo monopolo hecho con hilo rígido o comerciales, antenas tipo patch, dipolos con adaptación (balun), Yagi, etc. también se verificará el correcto funcionamiento de todos los módulos, solucionando los problemas que se presenten y elaborando informes con las anomalías detectadas.

C. *Programación*

Partiendo de los programas realizados, se elaborarán versiones adaptadas a diferentes aplicaciones (sensores, visualizadores, elementos de control, gps). Estudiar el uso de otras bibliotecas de funciones.

D. *Plan de pruebas*

Para la verificación del correcto funcionamiento del sistema se plantean diferentes pruebas como medida de distancia (utilizando un mismo transmisor para medir la distancia alcanzada para cada tipo de antena receptora, repitiendo las medidas con diferentes parámetros y tipos de modulación).

Para la medida del diagrama de radiación, con el módulo transmisor en modo FSK y potencia constante, medir el nivel de potencia recibido para diferentes ángulos de la antena receptora en el plano horizontal. Repetir para el plano vertical. Con los datos obtenidos trazar el diagrama de radiación aproximado de la antena receptora y comparar con los datos teóricos del fabricante.

También se medirán las características de las antenas utiliando el medidor de impedancias, medidor de campo u otro instrumento disponible. Se estudiarán los resultados para la frecuencia nominal y se localizará la frecuencia óptima de la antena en cada caso concreto. Se estudiará también la influencia de elementos como cables o conectores.

E. *Nuevos prototipos de antenas*

Está previsto diseñar y construir antenas tipo Yagi con diferente número de reflectores y directores y separación entre elementos. Usar un programa de diseño o parámetros proporcionados en la documentación [20]. Puede hacerse con tubos metálicos o sobre circuito impreso. Para cada prototipo de antena se verificará la ganancia obtenida y otros parámetros como impedancia o ancho de banda, y la necesidad de adaptación mediante balun u otros elementos.

VI. Pruebas efectuadas y resultados obtenidos

Durante el curso 2022-23 ya se habían realizado diferentes pruebas con los módulos FSK RFM69HW y programas basados en la biblioteca LowPowerLab. Una vez puestos a punto los nuevos módulos con los transceptores LoRa RFM95W y los programas modificados para usar la biblioteca RadioLib hemos realizado un segundo conjunto de pruebas para verificar su correcto funcionamiento. Estas pruebas se han realizado en modo FSK para disponer de una transmisión de potencia constante y frecuencia estable, lo que no sucede en OOK o LoRa.

A. *Prueba de distancia en campo abierto*

Esta prueba se ha realizado con un módulo transmisor con antena monopolo hecha con hilo rígido de cobre y un receptor con el mismo tipo de antena. Ambos módulos usan el transceptor RFM95W. Los parámetros de transmisión son los siguientes: frecuencia 868.0 MHz, potencia +20 dBm, ancho de banda 25 kHz, desviación de frecuencia 10 kHz, velocidad de datos 4800 b/s.

La máxima distancia alcanzada en estas condiciones ha sido de 2005 m con recepción de datos en forma continua. La información de los módulos comerciales (como los de HopeRF) menciona para FSK distancias en el orden de centenas de metros sin usar antenas direccionales, por lo que este resultado confirma la validez del diseño realizado. En las pruebas anteriores realizadas con el módulo RFM69HW se había alcanzado un máximo de 1200 m en las mismas condiciones y potencia. En la Fig. 5 se indica el plano de situación del transmisor y receptor y la distancia alcanzada en esta prueba.

Fig. 5. Distancia alcanzada con los módulos RFM95W en modo FSK.

B. *Medida de diagrama de radiación y ganancia*

Esta prueba se ha realizado con un módulo transmisor con antena monopolo hecha con hilo rígido de cobre y un receptor dotado de conector tipo N en el que se han conectado sucesivamente una antena Yagi modelo OSCAR 3 de Siretta [21] de 11dBi y un monopolo de hilo rígido de cobre. Los parámetros de transmisión son idénticos al caso anterior.

El transmisor se ha situado en una ventana del piso superior de uno de los edificios del instituto, de forma que no hay obstáculos próximos que puedan distorsionar el frente de onda. El receptor se ha situado a una distancia aproximada de 50 m, en una zona ajardinada que actúa como material absorbente, sirviendo de cámara anecoica natural (Fig. 6).

Fig. 6. Posición de transmisor y receptor para medida de diagrama de radiación.

Las medidas se han realizado en el plano vertical, girando ambas antenas entre las posiciones 0º (eje de la antena Yagi apuntando hacia el transmisor, monopolo totalmente vertical) y ±90º (Yagi vertical, monopolo apuntando hacia el transmisor). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla I.

TABLE I. MEDIDAS DE ANTENAS

TIPO	Potencia recibida (dBm)						
	-90º	*-75º*	*-30º*	*0º*	*+30º*	*+75º*	*+90º*
Yagi-Uda	-50	-61.5	-38.5	-35.5	-38.0	-61.0	-50
Monopolo	-60		-47.0	-46.0	-46.5		-60

De estos resultados se obtienen las siguientes conclusiones:

- el ancho de lóbulo principal (±3 dB) de la antena Yagi es aproximadamente ±30º, lo que coincide con el diagrama de radiación representado en la documentación [21].

- Se ha verificado la existencia de un nulo para el ángulo ±75º (-26 dB) y una ligera subida para ±90º (-14.5 dB), lo que también coincide aproximadamente con la documentación.

- En el caso del monopolo la reducción es progresiva hasta alcanzar un nulo aproximado en ±90º (-14.0dB).

- La diferencia de ganancia entre ambas antenas resulta -35.5 dBm-(-46 dBm) = 10.5 dB. La ganancia teórica de ambas antenas es 11 dBi (Yagi) y 5.2 dBi (monopolo ideal), por lo que la diferencia teórica sería 11 dBi-5.2 dBi = 5.8 dB, lo que no coincide con el valor obtenido.

- Para explicar esta diferencia hay que considerar dos factores: el tamaño del plano de masa del monopolo utilizado y su impedancia. En el primer caso, cuando el plano de masa tiene un tamaño significativamente<λ, la ganancia se reduce en torno a 3dB aproximándose a la de un dipolo o 2.2 dBi [22]. Por otra parte la impedancia de este monopolo puede oscilar entre 20 y 40 Ω según [23], con una pérdida de ganancia por desadaptación superior a 1.5 dB. De este modo la ganancia quedaría reducida a un valor inferior a 1 dB.

- Teniendo en cuenta todos estos factores, la diferencia de ganancia obtenida (10.5 dB) resulta compatible con las antenas utilizadas (monopolo con plano de masa pequeño y mala adaptación).

Los resultados obtenidos en estas medidas preliminares permiten concluir que sería posible utilizar este sistema para obtener un diagrama de radiación completo y realizar comparativas de ganancia entre diferentes tipos de antenas.

En la Fig. 7 se presenta uno de los módulos utilizados en las pruebas con monopolo de hilo rígido y la ubicación de la antena receptora para realizar las medidas.

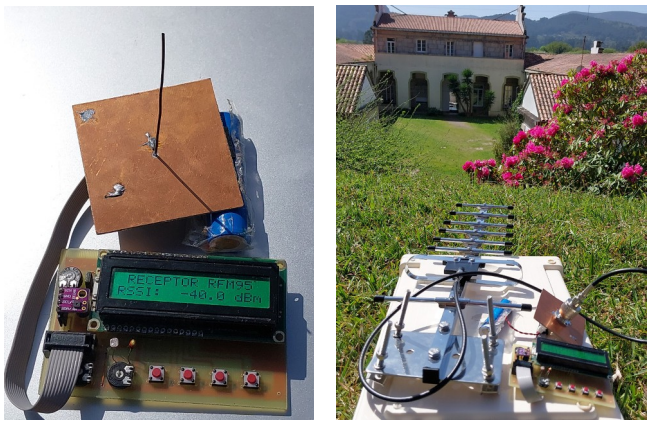


Fig. 7. Módulo de pruebas y ubicación del receptor.

VII. CONCLUSIONES

En este artículo se describe un ecosistema de hardware y software con capacidad de transmisión y recepción de distintas modulaciones digitales pensado para prácticas de formación profesional y proyectos reales de innovación tecnológica y educativa.

Para el diseño del hardware se ha planteado realizar una placa de circuito impreso dedicada compatible con Arduino que incorpore un módulo transceptor de radio conectado directamente a la antena, con un plano de masa completo en la cara posterior de la placa.

Se ha efectuado una selección de módulos de comunicaciones atendiendo a criterios como la compatibilidad de patillaje, disponibilidad y coste.

El programa de control se ha diseñado a partir de bibliotecas de funciones existentes, seleccionando la más adecuada por compatibilidad con diferentes módulos y arquitecturas. El programa permite cambiar fácilmente los parámetros de comunicaciones como el tipo de modulación, frecuencia de transmisión u otros.

Se han realizado pruebas de distancia, ofreciendo unos resultados superiores a los de módulos comerciales en modulación FSK, lo que demuestra la validez de la solución adoptada para el montaje en placa de circuito impreso de doble cara con plano de masa posterior.

También se han realizado pruebas de medida en exterior con antenas monopolo y Yagi, obteniendo resultados similares a las características teóricas de las antenas utilizadas. Queda pendiente la obtención del diagrama de radiación completo, para lo que será necesario construir un soporte de antena con medición de ángulo y un programa de lectura que automatice el proceso en la medida de lo posible.

En los siguientes cursos se pondrá en marcha un programa de prácticas completo basado en el uso de estos módulos para impulsar la formación de nuestro alumnado en este tipo de tecnologías y favorecer su integración en el mercado laboral.

Además este diseño se utilizará como base para la actualización de la estación meteorológica del instituto con nuevos sensores digitales y una arquitectura distribuida.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al alumnado del Ciclo Superior de Formación Profesional "Mantenimiento Electrónico" del IES Escolas Proval de los cursos 2022-23 y 2023-24 que han colaborado en el diseño y construcción de los módulos y la realización de las primeras pruebas. También a la oficina ESERO de la Agencia Espacial Europea (ESA) por la organización de la actividad "Desafío CanSat", que nos ha servido a profesorado y alumnado para adquirir nuevos conocimientos y obtener una importante experiencia práctica.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Moteino Development Platform, 2023. [Online]. Available: https://lowpowerlab.com/guide/moteino

[2] HopeRF Transceiver Modules, 2023. [Online]. Available: https://www.hoperf.com/modules/rf_tranceiver.html

[3] Semtech Wireless RF, 2023. [Online]. Available: https://www.semtech.com/products/wireless-rf

[4] J. Diz-Bugarín, J. F. García-González, J. Darriba-Rodríguez, S. Rodríguez-Muñoz, "El proyecto de estación meteorológica automática del IES Escolas Proval", *XIV Congreso Ibérico y IX Iberoamericano*

de Energía Solar (CIES), Vigo (Spain), 2008, pp. 1199-1206. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2763054

[5] Meteoproval weather station, 2024, [Online]. Available: https://meteoproval.es

[6] J. Diz-Bugarín, F. García-González, J. Domínguez-Balado, "Modular architecture with microcontroller for advanced electronic practices", *in X Technol. Appl. to Electron. Teaching (TAEE), Vigo (Spain),* 2012, pp. 92-97, https://doi.org/10.1109/TAEE.2012.6235415

[7] J. Diz-Bugarín, R. Rodríguez-Paz, "Arduino-compatible microcontroller module for electronics practices and environmental monitoring", in *XIV Technol. Appl. to Electron. Teaching (TAEE)*, Porto (Portugal), 2020, pp. 113-119, http://doi.org/10.1109/TAEE46915.2020.9163728.

[8] J. Diz-Bugarín, J. L. Rodríguez-Fernández, M. Martínez-Méndez, M. Rodríguez-Paz and A. P. Rodríguez, "Network for the continuous monitorization of environmental quality in educational buildings," 2022 Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (XV Technologies Applied to Electronics Teaching Conference), 2022, pp. 1-8, https://doi.org/10.1109/TAEE54169.2022.9840621

[9] J. L. Rodríguez-Fernández, J. Diz-Bugarín, M. Carrera-Martínez, D. de Saa-Suárez, P. Hermida-Rial, A. Pacheco-Rodríguez, D. Pereira-Souto, S. Alonso-Peitieiros, "SETISAT: A Mini Satellite Designed to Search for Signs of Life", Proc. of the 20th International Conference on Hands-on Science, Barcelona (Spain), 2023, pp. 39-48. http://www.hsci.info/hsci2023/images/pdfs/conference_book_hsci2023.pdf

[10] RF Solutions RTFQ1 FSK transmitter module, 2023. [Online]. Available: https://www.rfsolutions.co.uk/radio-modules-c10/rtfq1-433mhz-dil-miniature-high-performance-radio-module-p331

[11] RF Solutions RRFQ1 FSK receiver module, 2023. [Online]. Available: https://www.rfsolutions.co.uk/radio-modules-c10/rrfq1-433mhz-sil-miniature-high-performance-radio-module-p356

[12] LowPowerLab communications library, 2023. [Online]. Available: https://github.com/lowpowerlab/rfm69

[13] Arduino-LoRa communications library, 2023. [Online]. Available: https://github.com/sandeepmistry/arduino-LoRa

[14] LoRaRF-Arduino communications library, 2023. [Online]. Available: https://github.com/chandrawi/LoRaRF-Arduino

[15] HopeRFLib communications library, 2023. [Online]. Available: https://github.com/lupyuen/LoRaArduino/tree/master/libraries/HopeRFLib

[16] RadioHead communications library, 2023. [Online]. Available: www.airspayce.com/mikem/arduino/RadioHead

[17] MySensors communications library, 2023. [Online]. Available: https://www.mysensors.org

[18] LMIC communications library, 2023. [Online]. Available: https://github.com/matthijskooijman/arduino-lmic

[19] RadioLib communications library, 2023. [Online]. Available: https://github.com/jgromes/RadioLib

[20] Antenna Theory: Yagi-Uda Antenna Design, 2023. [Online]. Available:https://www.antenna-theory.com/antennas/travelling/yagi3.php

[21] Yagi-Uda Antenna Siretta OSCAR3 11dBi, 2023. [Online]. Available: https://www.siretta.com/products/antennas/oscar-3a

[22] Monopole Antenna (Wikipedia), 2023. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Monopole_antenna

[23] K. Awadalla and T. Maclean, "Input impedance of a monopole antenna at the center of a finite ground plane," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 26, no. 2, pp. 244-248, March 1978, https://doi.org/10.1109/TAP.1978.1141824 .

Programación concurrente y colas en adquisición de datos basada en computador: casos prácticos

Carlos Medrano Sánchez
EduQTech, EUPT
Universidad de Zaragoza
c/ Atarazana 2, 44003, Teruel
ctmedra@unizar.es

Javier Martínez Cesteros
EduQTech, EUPT
Universidad de Zaragoza
c/ Atarazana 2, 44003, Teruel
javimzcs@unizar.es

Inmaculada Plaza García
EduQTech, EUPT
Universidad de Zaragoza
c/ Atarazana 2, 44003, Teruel
inmap@unizar.es

***Abstract*—Este trabajo realiza una reflexión sobre el uso de la programación concurrente y las colas en el desarrollo de sistemas de adquisición de datos por computador. Se analizan de forma genérica los distintos tipos de transferencias de datos entre tarjetas de adquisición de datos y un computador desde el punto de vista del usuario, y cómo los conceptos indicados aparecen de forma natural. Mediante dos casos prácticos típicos, pretendemos ayudar a profesores y estudiantes a ser conscientes de su importancia en los sistemas de instrumentación basada en computador, especialmente para la utilización eficiente de tarjetas de adquisición de datos.**

***Index Terms*—Instrumentación electrónica, Tarjetas de adquisición de datos, programación concurrente, colas**

I. Introducción

La programación concurrente hace referencia a la separación conceptual entre las tareas que realiza un programa que se pueden desarrollar en cualquier orden. Además de ayudar en el diseño de sistemas, dicha separación puede ser real y en los computadores modernos efectivamente se ejecutan varias tareas a la vez (en paralelo). Pero, por otro lado, aparecen algunos problemas típicos de diseño, como es la separación de tareas, la sincronización o el acceso a recursos compartidos.

Además de la división en tareas concurrentes dentro del desarrollo de una aplicación informática, cuando trabajamos con una tarjeta de adquisición de datos (DAQ por sus siglas en inglés) hay además otra actividad que se realiza en paralelo: la captura de datos en el caso de que se lleve a cabo sin el control directo del programa. En el trabajo repasamos los conceptos que hay detrás de esta adquisición y cómo debe diseñarse una aplicación, dado que dichos conceptos no siempre se abordan en estudios de electrónica. Mostramos dos casos prácticos. El primero se refiere al procesado de una matriz de sensores resistivos con una elevada velocidad de barrido mediante un circuito de adquisición de datos propio. Ha sido necesario realizar la implementación con un lenguaje de bajo nivel, C, pero ha sido posible aplicar con éxito las ideas mencionadas a pesar de que el desarrollo es más complejo. Este caso práctico puede servir de ejemplo para otros similares. En el segundo caso, se mejora una librería en Python de una tarjeta comercial que presentaba ciertas deficiencias. Esto nos ha permitido utilizar de forma más eficaz el modo de actuación de la tarjeta denominado modo *streaming*. La primera aplicación se realizó en el marco de una tesis doctoral, mientras que la segunda se orienta al uso de la tarjeta en clases prácticas de laboratorio de la asignatura de Instrumentación Electrónica. En el trabajo nos referimos a programación con lenguajes en texto (C, C++, Python).

En el resto del artículo se presenta una introducción teórica, apartado II, los dos casos prácticos, apartados III y IV, para finalizar con unas conclusiones y la aplicación presente y futura a las prácticas de laboratorio, apartado V.

Este trabajo ha sido financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por "ERDF A way of making Europe" dentro del proyecto PID2021-125091OB-I00 y por el Departamento de Ciencia, Universidad y Sociedad del Conocimiento del Gobierno de Aragbajo el proyecto T49_23R. Esta iniciativa también se realiza en el marco de los fondos del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, financiados por la Unión Europea (Next Generation).

II. Conceptos teóricos

A. Tipos de adquisición de datos

Desde el punto de vista del usuario, las adquisiciones de datos pueden poseer varias características. Por un lado, se puede prestar atención al número de capturas que se realizan: adquisición única (un solo valor), adquisición múltiple (varios valores) o adquisición continua (en principio sin fin hasta que se da la orden de acabar). Por otro lado, otro aspecto relevante es la forma de inicio de la captura: por software, por un evento externo o interno, o controlada por un temporizador (por ejemplo, una adquisición periódica). Finalmente, la propiedad más interesante que nos interesa en este trabajo es la sincronización con el programa de control [1]. En las capturas síncronas el programa de control se bloquea hasta que se obtiene el valor de la tarjeta. En las capturas asíncronas la captura, una vez lanzada, se realiza sin la intervención del programa de control. Es de suponer que dicho programa recupera los datos que se van capturando para realizar acciones en consecuencia.

Los programas de control tienen el soporte del driver [1], [2], que es el software proporcionado por el fabricante que controla la tarjeta a bajo nivel, por ejemplo, accediendo directamente a los buses de comunicación del computador, mientras que ofrece al usuario una interfaz de programación más genérica y fácil de usar para realizar los programas de control. En particular, el driver se ocupa de realizar transferencias mediante el bus de conexión (PCI, PCI express, USB) a su zona de memoria, de forma transparente para el

usuario. En la figura 1 se muestra un esquema simplificado de los niveles de memoria que aparecen en una adquisición de datos. La tarjeta DAQ incluye su propia memoria donde va almacenando los datos capturados. El control depende de la propia electrónica de la tarjeta. Esta memoria es más limitada que la memoria accesible en el computador, pero permite el almacenamiento de datos temporal y evita realizar transferencias por el bus, que generalmente están optimizadas para realizarse en ráfagas. A través del bus, se realiza una comunicación de bajo nivel con el computador, controlada por el driver. Esta comunicación debe estar optimizada para la transferencia por el bus. El driver tiene su propia zona de memoria, ya en el computador. El computador cuenta con una zona de memoria amplia. Finalmente, el programa de control realizado por el usuario se comunica con el driver a través de la interfaz proporcionada por el fabricante. En esta comunicación, se transfieren los datos ya al programa de usuario, es decir que aparecen ya almacenados en las variables que se haya definido en el programa de control y son aptos ya para ser procesados a alto nivel.

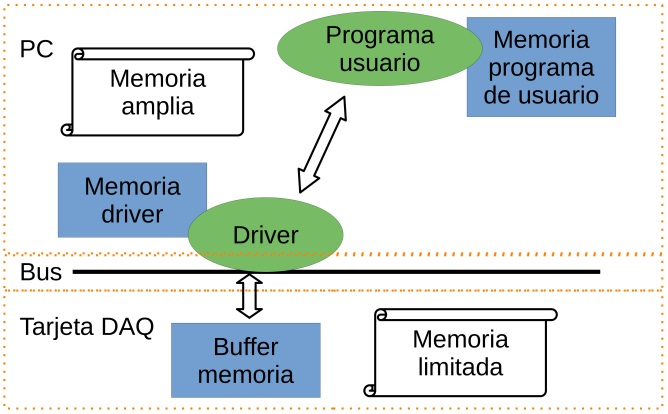


Fig. 1. Esquema simplificado de los distintos niveles de memoria en una aplicación de adquisición de datos.

Las capturas asíncronas están claramente relacionadas con el concepto de programación concurrente. En efecto, están activos tanto el programa de control del usuario como la transferencia de datos a bajo nivel desde la tarjeta al driver. En realidad, hay una tercera actividad que es la controlada por la tarjeta en sí misma.

La nomenclatura utilizada por los fabricantes puede variar. La tarjeta comercial que utilizaremos es uno de los ejemplos es la denominada LabJack U3-HV [3]. En la documentación se pueden encontrar referencias a entradas analógicas que pueden capturarse con una adquisición síncrona iniciada por un comando desde un programa (*command/response software timed*), que puede durar entre 0.6 y 4 ms. Por otro lado esas mismas entradas admiten un modo de adquisición asíncrona (*hardware timed input streaming*), donde el tiempo de adquisición es controlado por la electrónica de la tarjeta y los datos se traspasan directamente al computador (flujo "continuo" o *stream* de datos). Las entradas digitales son similares en cuanto a los tipos de adquisición. En esta tarjeta la adquisición asíncrona se comienza y se detiene por software. La tarjeta alcanza, para un sólo canal, 2.5 kS/s a resolución máxima, 12 bits, o hasta 50 kS/s con una resolución aproximada de 10 bits.

B. Programación concurrente

En las aplicaciones modernas es a menudo conveniente considerar programas en los que varias tareas pueden tener lugar a la vez, es decir que tengan lugar de manera concurrente y puedan cooperar y sincronizarse entre ellas. Hay que tener en cuenta que las tareas se pueden ejecutar en cualquier orden [4]. Es necesario que exista un soporte en los lenguajes de programación y sistemas operativos para que esta visión pueda ser efectiva. En los procesadores actuales, las tareas pueden ejecutarse efectivamente en paralelo, con el consiguiente aumento de las prestaciones.

Centrándonos en sistemas UNIX y programación en C, en un modelo más tradicional, la división en tareas se realiza mediante la ejecución de varios procesos. Una visión algo más avanzada es el uso de hilos (threads). Los hilos son más ligeros que los procesos y requieren menos programación y cargan menos al sistema. De este modo, los hilos se han incorporado a otros lenguajes de programación para funcionar en varios sistemas operativos [5].

En cualquier caso, en el diseño hay que hacer frente a problemas de sincronización, acceso a recursos compartidos, comunicación y planificación de la ejecución en su caso. La sincronización se refiere a la necesidad de asegurar que algunos eventos suceden antes que otros. El acceso a recursos compartidos afecta, por ejemplo, a zonas de memoria comunes a las distintas actividades. Si el acceso no está ordenado, la memoria puede contener información incorrecta en un momento dado. Por ello, es necesario establecer una comunicación entre las actividades para que una de ellas pueda saber, por ejemplo, cuando otra actividad ha acabado de escribir en una zona de memoria.

La programación de sistemas concurrentes puede ser delicada. Afortunadamente, existen una serie de casos típicos que ayudan al diseño. Un ejemplo es el modelo productor-consumidor. En este modelo, una actividad genera unos datos, es el productor. Otra actividad debe recibir los datos, es el consumidor. En el caso de la adquisición de datos en modo asíncrono, hay una actividad que produce los datos, dentro del propio driver, al obtenerlos de la tarjeta. El programa del usuario actuaría como consumidor. No obstante, se puede añadir otro nivel, y el programa de usuario puede tener dos actividades, una actividad que recoge los datos del driver y evita que se pierdan, y otra actividad que los toma de la anterior para propósitos de visualización o procesado. Dado que el productor y el consumidor pueden no ir a la misma velocidad en su papel, hay un buffer intermedio donde se van almacenando los datos por parte del productor, mientras el consumidor los recoge. Este buffer es el recurso compartido en este caso que actúa como una cola, entendida como una memoria de tipo FIFO.

En los siguientes apartados veremos ejemplos concretos de estos conceptos y de su implementación en sistemas de adquisición de datos.

III. Caso práctico: procesado de datos en tiempo real

En este apartado se presenta un caso práctico en el que es necesario realizar un procesado en tiempo real de los datos enviados por una matriz de sensores piezoresistivos.

A. Esterilla sensible a la presión: circuito de adquisición de datos

El dispositivo está formado por una malla flexible de área activa 32x32 cm^2, con una matriz de 16x16 sensores. Para realizarla, se coloca sobre una base flexible impresa en 3D una serie de tiras de cobre adhesivo. Otra base similar pero girada $90\,^\circ$ constituye la otra capa. Entre ellas se coloca una hoja de Velostat, un material piezoresistivo de bajo coste. Una región extra donde se juntan las cintas de cobre (con aislante para evitar cortocircuitos) permite configurar una zona para soldar un conector, en el cual se realiza la conexión del circuito de adquisición de datos, encapsulado en una caja externa. En la figura 2 se muestra una imagen de una de las capas a medio construir y el prototipo final flexionado.

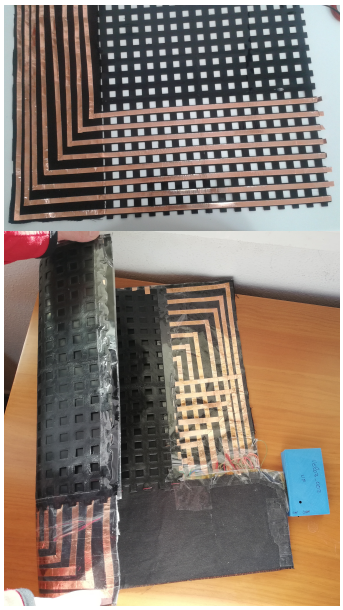


Fig. 2. Prototipo de esterilla sensible a la presión. Imagen superior: capa a medio construir; imagen inferior: prototipo final flexionado.

El esquema del circuito de adquisición de datos se muestra en la figura 3. Un microcontrolador STM32F103C8T6 (integrado en una placa BluePill [6]) realiza un barrido de cada una de las celdas de la matriz a través de un multiplexor y demultiplexor analógicos. La celda seleccionada queda conectada a un divisor resistivo, donde la lectura del voltaje en el ADC del microcontrolador permite deducir la resistencia. El microntrolador tiene un circuito externo para transmisión por Bluetooth o puede transmitir los datos por USB. En este trabajo consideraremos la transmisión por USB, que llega a barrer la matriz completa a una frecuencia de 100 Hz.

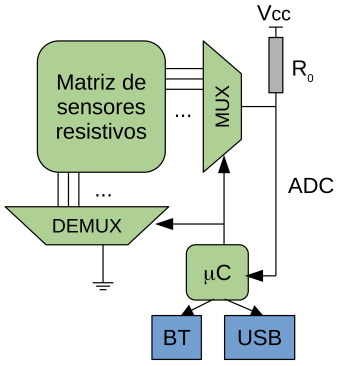


Fig. 3. Esquema del sistema de adquisición de datos para la malla sensible a la presión.

B. Procesado de datos

En realidad, en este circuito de lectura aparece un efecto importante de crosstalk entre celdas. Efectivamente, el circuito presentado no es muy refinado y lo que se mide en realidad es la resistencia equivalente de la matriz completa entre una fila y una columna, pero no la celda deseada [7], [8], ya que la corriente puede fluir por todas las celdas. Por contra, es la solución más simple en términos de componentes y tiene un consumo limitado por la resistencia que se coloca en el divisor. El problema del crosstalk aparece en la imagen de presión claramente, ya que da lugar a imágenes con forma muy rectangular y presión aparente en zonas donde no hay objeto sobre la malla. Por ello, a veces se habla de objetos "fantasma".

Para solucionar el problema del crosstalk manteniendo la simplicidad del circuito se puede recurrir a un algoritmo de post-procesado [8] una vez que se ha realizado un barrido de la matriz completa. Sin embargo este procesado no se puede realizar en tiempo real y debe realizarse a posteriori, lo cual es un inconveniente. En la tabla I se muestran la velocidad de procesado en frames por segundo (fps), entendiendo un frame como una imagen de presión obtenida tras un barrido completo, implementado tanto en C como en Python en un procesado secuencial. Como se puede observar en la primera fila, no es posible llegar en una ejecución serie a una corrección en tiempo real, que debería superar los 100 fps, en correspondencia con la velocidad de transferencia que se consigue a través del bus USB, y que es un valor dentro de los rangos típicos cuando este tipo de sistemas se utiliza, por ejemplo, para analizar movimiento humano [9], [10].

TABLE I
Capacidad de procesado (corrección del crosstalk) en fps.

	Python	**C**
Procesado secuencial	6.1	77.0
Procesado paralelo (4 hilos)	8.3	294

Una vez centrado el problema, en este trabajo indicamos cómo el procesado se puede hacer más rápido utilizando las posibilidades de los procesados modernos y mediante un modelo de un productor (un barrido de la malla) y varios hilos consumidores, que procesan cada uno un frame con el algoritmo de eliminación del crosstalk. En el caso de la implementación en Python, el modulo de threading no asegura que la implementación se ejecute realmente en paralelo en la CPU. Por ello se utilizó el módulo de multiprocesado [11] para implementar una versión paralela del algoritmo de procesado. Para el uso de este módulo se crean nuevas copias de las variables, asignando memoria para ellas. De esta forma, cada subproceso puede modificar las variables de una manera independiente y no es necesario sincronizar la ejecución en paralelo. La gestión del proceso se lleva a cabo por medio de un objeto de tipo *Pool*. De esta manera, cuando un conjunto de imágenes de presión tienen que procesarse, cada subproceso se encarga de tratar solo algunas de ellas, ejecutando el mismo código. Las imágenes entrantes se asignan a diferentes subprocesos.

Aunque esta implementación en paralelo permite mejorar la velocidad de proceso con respecto a la versión secuencial en Python, tabla I, la mejora no es espectacular y el procesado es todavía el cuello de botella del sistema de adquisición de datos. Por ello, la paralelización se llevo a cabo también en C, correspondiendo fielmente en este caso con la figura 4. Se basa en un conjunto de hilos de procesamiento. El programa principal se encarga de capturar los datos y enviarlos a una cola. Cada vez que llega una nueva imagen, la añade a la cola y envía una señal al conjunto de hilos. Si uno de los hilos no está ocupado, retira la imagen de la cola y la procesa para eliminar el crosstalk. Una vez procesada, envía la imagen procesada a la cola de salida. En la figura se considera que otro hilo puede retirar las imágenes procesadas de la cola de salida para almacenarlas o realizar alguna operación rápida como calcular un centro de presión, mientras que para la visualización muchas de las imágenes podrían simplemente descartarse. La implementación sigue las ideas de los modelos productor/consumidor con cuatro consumidores, asociados a cuatro hilos. En este caso hay variables compartidas y se utilizan mutex y variables condicionales siguiendo técnicas de programación paralela para compartir datos entre hilos y sincronizarlos. En la segunda columna de la tabla I se puede comprobar que la implementación paralela en C ya permite operar a una frecuencia muy superior a la del barrido de la malla.

IV. Caso práctico: Tarjeta LabJack U3-HV

La tarjeta LabJack U3-HV [3] es una tarjeta de bajo coste que se conecta al computador mediante un cable USB. Es utilizada en prácticas de laboratorio de la asignatura de Instrumentación Electrónica, dentro del grado de Ingeniería Electrónica y Automática, en la Escuela Universitaria Politécnica de Teruel. Tiene 4 entradas dedicadas que pueden admitir hasta ± 10 V, con conversores ADC de 12 bits, 12 entradas/salidas flexibles y 4 terminales digitales de entrada/salida. Mediante esta configuración pueden obtenerse hasta 16 entradas analógicas o 16 entradas/salidas digitales. Posee además dos salidas analógicas de 10 bits y hasta 2 contadores y timers que puede aparecer en algunos terminales compartidos con las entradas/salidas digitales. Puede muestrear tanto las entradas digitales como analógicas (máxima resolución) hasta 2.5 kS/s.

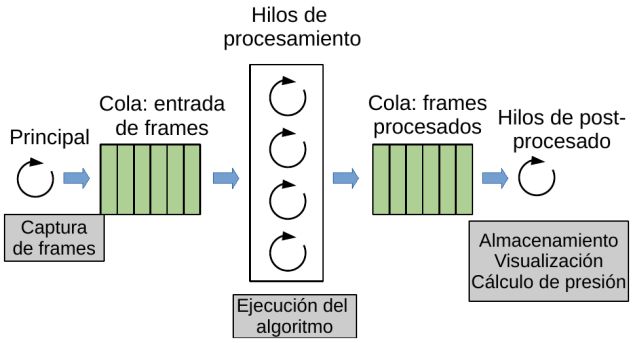


Fig. 4. Esquema del un modelo productor - varios consumidores para mejorar la velocidad de proceso de las imágenes de presión.

A. Librería proporcionada por el fabricante: modo streaming

La librería en Python proporcionada por el fabricante proporciona una interfaz para el modo streaming (captura asíncrona). En el código de la figura 5 se indica de forma esquemática cómo se accede a la tarjeta. Una vez importada la librería e iniciado el acceso a la tarjeta, se configura el modo streaming. Los argumentos indican la frecuencia de barrido deseada así como los canales y su configuración que se quieren utilizar. Después se activa el modo streaming. Una vez iniciado, el objeto que representa el flujo de datos puede ser usado por la función genérica de Python *next*, que devuelve el siguiente dato de la tarjeta. En realidad, y de acuerdo con un lenguaje de alto nivel como Python, se devuelve un tipo de datos llamado diccionario, que permite acceder a los datos de cada uno de los canales seleccionados de forma separada (por el ejemplo, el campo $'AIN0'$ en el diccionario aparece si se está capturando el canal analógico 0). Si bien esta forma de trabajar puede parecer muy elegante, la implementación de la función *next* dada por el fabricante presenta margen de mejora. La función muy a menudo tarda varios segundos en devolver un dato nuevo o ausencia de datos, codificado éste último caso por el objeto nulo en Python (*None*). De esta forma, el concepto básico de funcionamiento asíncrono pierde sentido, ya que el programa de control parece bloquearse durante varios segundos y pierde su eficacia para poder realizar otras tareas mientras espera la llegada de datos.

B. Mejora del acceso a la tarjeta

Para solucionar este problema, se ha decidido implementar una capa superior a la interfaz del fabricante mediante hilos y una forma de cola implementada en Python (*collections.dequeue*). De esta forma la gestión se realiza a través de una clase que hemos denominado *streamReader*. Además de

```
import u3
# Habilitamos acceso a la tarjeta
d = u3.U3()
# Configuramos el modo streaming
d.streamConfig(NumChannels= ..., \
  PChannels=..., NChannels=..., \
  ScanFrequency=...)
# Iniciamos el flujo de datos
d.streamStart()
# Guardamos la variable de alto nivel
# para acceder a los datos
datos = d.streamData()
# Solicitamos un nuevo dato pero
# Se bloquea durante varios segundos !!!
nuevo_dato = next(datos)
# Paramos el flujo de datos
d.streamStop()
```

Fig. 5. Esquema de comandos para el modo streaming en la tarjeta LabJack-U3-HV

los métodos de creación y finalización del objeto, se ofrecen los métodos de inicio de la adquisición, *start*, de fin de adquisición, *stop*, de obtención de un nuevo dato, *get* y un método de conveniencia para limpiar la cola, *reset_input*.

En el método de inicio se activa el modo streaming de la tarjeta y también se crea un hilo. El aspecto clave de esta implementación es que el acceso a la tarjeta lo realiza el hilo creado, que es el que se enfrenta al comportamiento del cuasi-bloqueo de la librería del fabricante. Un esquema se muestra en la figura 6. Este hilo recupera los datos de la tarjeta y los pasa a una cola, en concreto de de tipo *dequeu* dentro del paquete *collections* de Python. Se trata de un tipo de cola preparada para trabajar en entornos multi-hilo y con funciones rápidas para añadir, *append*, o eliminar, *pop*, datos en la cola.

La acción del hilo creado se realiza de forma transparente para el usuario. Para obtener un dato, el usuario utiliza ahora el método *get*, pero dicho método accede directamente a la cola con el método *pop*, no interacciona con la tarjeta, figura 6. El acceso a la cola no se bloquea, y el método *get* devuelve el objeto nulo en Python, *None*, si la cola está vacía. De esta forma, en la implementación realizada, el modo asíncrono es realmente útil y permite al programa de control realizar tareas en paralelo. La clase también gestiona las posibles situaciones anómalas, por ejemplo, si el hilo y la adquisición en modo streaming no están activas a la vez en un determinado momento, así como la finalización correcta de ambas cuando se llama al método *stop*.

C. Cambios en las prácticas de laboratorio

Se han realizado una serie de cambios en las prácticas de laboratorio, que se van a comprobar por primera vez en el curso 23/24. Estos cambios se pueden resumir así:

- Se ha instalado la nueva librería en los equipos de laboratorio. Cuando en las prácticas se requiere el uso del modo streaming, ya se utiliza sólo la nueva librería. No se explica ya el acceso proporcionado por el fabricante.
- Se ha incluido en los guiones de prácticas una explicación del concepto de cola y del funcionamiento interno de la tarjeta en modo streaming. Esta explicación refuerza a la que se realiza en clase sobre las tarjetas DAQ.

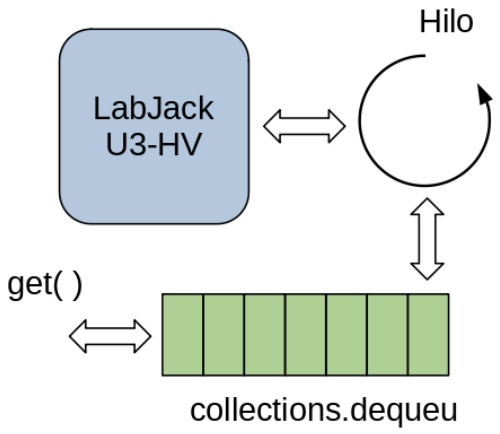


Fig. 6. Esquema de la adquisición de datos en dos niveles en la clase streamReader.

V. Conclusiones y trabajo futuro

Los conceptos de programación concurrente aparecen de forma natural en Instrumentación Electrónica, ya que hay siempre una actividad en paralelo a la que pueda programar el usuario, como es la transferencia de datos. Esta programación concurrente tiene ciertas dificultades, pero hay casos típicos que ayudan a resolver la mayor parte de los problemas. Uno de ellos es el modelo productor consumidor, que es de gran utilidad en Instrumentación Electrónica para recoger los datos de un sistema electrónico conectado a un computador. Existen ejemplos disponibles ya realizados tanto en C como en Python, que permiten realizar una implementación adaptada a nuestros problemas.

El presente trabajo contribuye a facilitar la comprensión del uso de la programación concurrente con dos casos prácticos. Por un lado, los conocimientos indicados en este trabajo han sido de gran valor para el desarrollo de la adquisición de datos con un sistema electrónico propio en el marco de una tesis doctoral, en el que un procesamiento rápido en tiempo real es muy conveniente. La aplicación puede servir de modelo a otras similares. En el otro caso mostrado, se ha mejorado la librería de acceso a la tarjeta DAQ utilizada en una asignatura de grado. A su vez, en el material de prácticas se incluye la información sobre el funcionamiento general del driver y del modo asíncrono, incluyendo el uso de colas. En el futuro, esto va a permitir realizar aplicaciones más ágiles y eficientes en la docencia. También estamos trabajando en la elaboración de plantillas para los problemas típicos, como los que hemos abordado, que permitan escribir con más rapidez aplicaciones de adquisición que requieran el modo streaming.

REFERENCES

[1] (2020) Comedi: Linux control and measurement interface. [Online]. Available: http://comedi.org/

[2] J. Corbet, A. Rubini, and G. Kroah-Hartman, *Linux Device Drivers, 3rd Edition*. O'Reilly Media, Inc., 2005.

[3] (2020) Labjack u3-hv. [Online]. Available: https://labjack.com/products/u3-hv

[4] B. Nichols, D. Buttlar, and J. P. Farrell, *Pthreads programming - a POSIX standard for better multiprocessing*. O'Reilly, 1996.

[5] A. Martelli, A. Ravenscroft, and S. Holden, *Python in a Nutshell, 3rd Edition*. O'Reilly, 2017.

[6] Stm32 base project: Blue pill. [Online]. Available: https://stm32-base.org/boards/STM32F051C8T6-Blue-Pill

[7] J. Wu, "Scanning approaches of 2-d resistive sensor arrays: A review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 4, pp. 914–925, 2017.

[8] C. Medrano-Sánchez, R. Igual-Catalán, V. H. Rodríguez-Ontiveros, and I. Plaza-García, "Circuit analysis of matrix-like resistor networks for eliminating crosstalk in pressure sensitive mats," *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 18, pp. 8027–8036, 2019.

[9] J. Goetschius, M. A. Feger, J. Hertel, and J. M. Hart, "Validating center-of-pressure balance measurements using the matscan® pressure mat." *Journal of Sport Rehabilitation*, vol. 27, no. 1, pp. 1 – 5, 2018.

[10] C. Bickley, J. Linton, E. Sullivan, K. Mitchell, G. Slota, and D. Barnes, "Comparison of simultaneous static standing balance data on a pressure mat and force plate in typical children and in children with cerebral palsy," *Gait & Posture*, vol. 67, pp. 91 – 98, 2019. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966636218314012

[11] Python documentation: multiprocessing - process based parallelism. [Online]. Available: https://docs.python.org/3/library/multiprocessing.html

Tecnología en la universidad de la experiencia. Acercando la electrónica a los mayores.

Inmaculada Plaza
Dpto. Ing. Electrónica y Comunic.
EUPT – Universidad de Zaragoza
Teruel, España
inmap@unizar.es

Mariano Ubé
Dpto. Organización de Empresas
EUPT – Universidad de Zaragoza
Teruel, España
mube@unizar.es

Pablo Díaz
Dpto. de Matemática Aplicada
EUPT – Universidad de Zaragoza
Teruel, España
pablodiaz@unizar.es

Guillermo Palacios
Dpto. Ing. Electrónica y Comunic.
EUPT – Universidad de Zaragoza
Teruel, España
palanava@unizar.es

Eduardo Gil
Dpto. de Informática e Ing. de Sistemas
EINA – Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
edugilh@unizar.es

Raquel Lacuesta
Dpto. de Informática e Ing. de Sistemas
EUPT – Universidad de Zaragoza
Teruel, España
lacuesta@unizar.es

Carlos Sánchez
Dpto. de Informática e Ing. de Sistemas
EUPT – Universidad de Zaragoza
Teruel, España
cstapia@unizar.es

Guillermo Azuara
Dpto. Ing. Electrónica y Comunic.
EUPT – Universidad de Zaragoza
Teruel, España
gazuara@unizar.es

Noemí Gil
Dpto. de Ing. Química y Tecno MA
EUPT – Universidad de Zaragoza
Teruel, España
noemigil@unizar.es

***Abstract*— En el presente trabajo se muestra la experiencia realizada por un grupo de profesores que diseñaron una asignatura en la Universidad de la Experiencia de la Universidad de Zaragoza para acercar la tecnología a los mayores. Tras explicar qué es la Universidad de la Experiencia e introducir el módulo de "Tecnología para una nueva sociedad", se expondrán las diferentes sesiones organizadas. Se hará especial énfasis en indicar cómo se ha acercado la electrónica a los alumnos. La experiencia se realizó en el curso 2022-2023, estando prevista la impartición de una segunda parte.**

Keywords*— *Divulgación, electrónica, mayores, tecnología, tercera edad.)

INTRODUCTION

Según se indica en la Carta de Servicios de la Universidad de la Experiencia de la Universidad de Zaragoza [1]: "El derecho de las sociedades modernas a la educación permanente es uno de los pilares del denominado estado del bienestar, un logro social del que no se puede excluir a las personas mayores como pilar de la sociedad de la que forman parte, hayan finalizado o no su vida laboral.

Con esta premisa, el 31 de mayo de 2001, el Equipo de Gobierno de la Universidad de Zaragoza, acordó poner en marcha el proyecto denominado: "Universidad de la Experiencia". Llevar la Universidad al segmento de la población de mayores de 55 años es el objetivo intrínseco de este proyecto, un proyecto que les permita crecer personalmente a través de la adquisición de nuevos conocimientos.

Finalmente, con fecha 7 de febrero de 2013 se aprobó el Reglamento de Oferta de Formación Permanente de la Universidad de Zaragoza, mediante el cual la Universidad de la Experiencia adquiere entidad equiparable a estudio propio."

Con el fin de aplicar los fundamentos de la formación permanente de las personas mayores de 55 años, desde la Universidad de la Experiencia se marcaron los siguientes objetivos [1]:

1) Ampliar sus conocimientos en diferentes áreas.

2) Hacer partícipe de la vida universitaria a un segmento de la población que, tradicionalmente, no estaba contemplado.

3) Fomentar la participación de los mayores en la vida cultural, social, económica y política de la sociedad actual.

4) Impulsar las relaciones institucionales con entidades afines en sus objetivos con la Universidad de Zaragoza.

Intentando abarcar el mayor número de población y descentralizar la universidad, actualmente cuenta con sedes en Alagón, Alcañiz, Barbastro, Binéfar, Borja, Calatayud, Caspe, Ejea, Épila, Fraga, Huesca, Jaca, La Puebla, Monzón, Sabiñánigo, Tarazona, Teruel y Utebo abarcando, de este modo, las tres provincias aragonesas (Huesca, Zaragoza y Teruel).

Los estudiantes de Zaragoza se pueden matricular en tres programas de actividades: Programa Básico Presencial, Curso de Actualización y Programa Básico Online. En el resto de sedes se propone un Programa conjunto de clases presenciales junto con conferencias on-line que son comunes para todas las sedes.

A modo de ejemplo, en Teruel se imparten 6 cursos presenciales de 20h. de duración cada uno (en horario de martes y jueves de 17:00 a 19:00h.) y 12 conferencias on-line (los viernes a las 12:00h.).

DESCRIPCIÓN GLOBAL DEL CURSO

En el año 2022 se ofreció a un conjunto de profesores de la Escuela Universitaria Politécnica de Teruel (EUPT) la oportunidad de diseñar una asignatura para acercar la tecnología a estos alumnos, mayores de 55 años que pueden estar o no jubilados.

Ya se contaba con una experiencia previa, realizada durante el curso 2014-2015, con el mismo título. Con la experiencia acumulada se diseñó un nuevo programa, distribuido en tres bloques con los siguientes módulos:

- *Desarrollo de la tecnología en los siglospasados:*
    - Tecnología ahora… y también antes: exponentes en el pasado andalusí
    - Tecnología como elemento de desarrollo de la sociedad: los inicios de la Electrónica Digital
- *Tecnología en la sociedad del siglo XXI:*
    - Las matemáticas, el Universo y la belleza
    - Paradigmas de interacción
    - Señales del corazón
    - Simulación computacional de la actividad cardiaca
    - Sistemas de realidad virtual inmersivos para la rehabilitación y el entrenamiento cognitivos
- *Retos y amenazas actuales. Cómo trabajar frente a ellos:*
    - Nuevas tecnologías nuevas amenazas
    - Residuos de nuestro día a día: ¿cómo convertirlos en algo útil?
- *Clausura: Hacia donde caminamos.*

Tras describir brevemente todos los módulos, en el presente documento se explicará cómo se ha introducido la materia en los módulos directamente relacionados con la electrónica.

BREVE DESCRIPCIÓN DE CADA UNO DE LOS TEMAS

Sin ánimo de ser exhaustivos, pero para facilitar mejor la comprensión de los temas impartidos y obtener una visión global del curso, se expondrá muy brevemente el contenido general de cada uno de los temas.

- Tecnología ahora… y también antes: exponentes en el pasado andalusí

Esta sesión perseguía motivar a la reflexión sobre la trascendencia de los avances tecnológicos en su repercusión en la sociedad, considerando su presencia más allá del siglo En concreto, se eligió en detalle un territorio y un amplio periodo temporal: al-Andalus.

Se intentó mostrar algunos de los avances aquí habidos y propiciar un mejor conocimiento, si bien parcial, de esta época y de su trascendencia, en lo que atañe atecnología.

- Tecnología como elemento de desarrollo de la sociedad: los inicios de la Electrónica Digital

Siguiendo con el avance de la tecnología a lo largo de la historia, el recorrido se detuvo en algunos momentos clave para alcanzar la situación actual, caracterizada por el desarrollo de la electrónica y de los dispositivos que la utilizan como soporte tecnológico.

Posteriormente, y debido al peso que tiene actualmente el manejo de sistemas digitales (ordenadores, microcontroladores, etc.) se prestó especial atención al nacimiento y desarrollo de la electrónica digital, también denominada, "electrónica de los computadores".

- Las matemáticas, el Universo y la belleza

La lección versó sobre una mirada al lenguaje matemático y a su sorprendente capacidad para describir el cosmos, para descifrar la música o para crear tecnología. Un lenguaje para construir conocimiento.

- Paradigmas de interacción

Los paradigmas de interacción son los modelos de los que se derivan todos los sistemas de interacción. Los paradigmas de interacción actuales proponen generar escenarios naturales de interacción entre la persona y los ordenadores, y tender puentes entre los objetos del entorno físico y los objetos virtuales, para aprovechar de esta manera los beneficios de ambos mundos.

En este módulo se presentaron los principales paradigmas de interacción para comprender qué son y cómo funcionan, entre otros se verán el paradigma de computadora personal o de sobremesa, la realidad virtual, la computación ubicua y la realidad aumentada.

- Señales del corazón

Se realizó una introducción a la fisiología de diversas señales cardiovasculares como el electrocardiograma y la fotopletismografía y como la ingeniería y en particular el procesado de señal pueden ser de utilidad para extraer información relevante desde el punto de vista clínico.

- Simulación computacional de la actividad cardiaca

Los grandes avances en la capacidad de cómputo de los ordenadores han permitido que la simulación de la actividad eléctrica del corazón en pacientes con enfermedades cardiovasculares sea una alternativa viable tanto para conocer mejor los mecanismos patológicos subyacentes como para elegir los tratamientos más adecuados. En este tema se realizó una introducción sobre este tipo de simulaciones y sus repercusiones a la hora de definir tratamientos médicos.

- Sistemas de realidad virtual inmersivos para la rehabilitación y el entrenamiento cognitivos

Se explicaron las técnicas más novedosas que se están aplicando para el entrenamiento cognitivo para prevenir el deterioro cognitivo. En concreto, se habló sobre su aplicación a colectivos con deficiencias cognitivas como, por ejemplo, enfermedad de Alzheimer y Parkinson.

- Nuevas tecnologías nuevas amenazas

Se realizó un repaso a las principales amenazas de seguridad inherentes al uso de las nuevas tecnologías, centrándose especialmente en los teléfonos móviles. Se indicaron pautas para mitigarlas y se realizó alguna demostración práctica.

- Residuos de nuestro día a día: ¿cómo convertirlos en algo útil?

Aunque no seamos siempre conscientes de ellos, prácticamente todas las actividades que realizamos las personas en nuestro día a día dejan atrás una serie de deshechos y residuos que, durante muchos años, se han considerado inservibles.

Sin embargo, nuestro modelo de vida actual basado en un consumo excesivo de recursos ha puesto de manifiesto la necesidad de alargar al máximo la vida útil de los residuos. En este tema se habló sobre las distintas opciones y tecnología

que tenemos hasta el momento para aportar valor a los residuos y recuperar materiales o energía de los mismos.

- Clausura: Hacia donde caminamos.

A modo de reflexión final se planteó una vision de contexto y dos cuestiones: ¿Qué tecnologías intervienen? y

¿hacia dónde caminamos?

En la primera parte (*Contexto*) se revisaron las diferentes revoluciones que han acontecido a lo largo de la historia: la primera revolución industrial (mecanización – máquina de vapor, energía hidraúlica y mecanización), segunda revolución industrial (electricidad – producción en masa, cadena de montaje y electricidad), la tercera (informática – automatización, tecnologías de la información y la comunicación), la cuarta (digitalización – internet de las cosas, la nube, coordinación digital, sistemas ciberfísicos y robótica).

Para responder a la primera pregunta *¿Qué tecnologías intervienen?* y a modo de repaso y complemento de lo tratado en el curso se habló y aclararon algunos conceptos sobre:

- Inteligencia Artificial (IA)
- Cobots (o robots colaborativos)
- Sistemas de integración
- Internet de las cosas (IoT)
- Cloud Computing (Computación en la nube)
- Big data
- Ciberseguridad
- Realidad aumentada y realidad virtual
- Impresión 3D y 4D

Para finalizar, motivando la reflexión de *¿Hacia dónde caminamos?* se abrió un turno de debate para que los asistentes pudieran expresar sus opiniones sobre la temática.

El curso finalizó con una encuesta de evaluación realizada según el formulario de la Universidad de la Experiencia de la Universidad de Zaragoza y también con un formulario propio de los coordinadores del curso.

Recursos utilizados

Todos los ponentes utilizaron el formato de presentación tipo clase magistral, apoyándose en presentaciones PowerPoint. Sin embargo, la mayoría de los docentes utilizaron también vídeos explicativos de la temática que se estaba abordando.

En algunos casos, se aportaron ejemplos tecnológicos específicos, como gafas de realidad virtual o ejemplos de aplicaciones móviles que utilizaban algunas de las tecnologías explicadas.

Ahondando en la explicación sobre la electrónica

En el curso la electrónica está presente en diferentes aplicaciones de las explicadas a lo largo de los temas. No obstante, y dada su importancia, se decidió ponerla en valor y dedicar un tema entero a su introducción.

Por ello se definió el tema: "Tecnología como elemento de desarrollo de la sociedad: los inicios de la Electrónica Digital"

La explicación se dividió en cuatro partes:

- Contexto
- ¿Cómo comienza todo? Orígenes de la electrónica.
- Avanzando en el tiempo. La electrónica digital
- A modo de conclusión.

Se pasará a describir el contenido impartido en cada uno de estos apartados.

Contexto:

Para empezar, se pidió a los estudiantes que hicieran un repaso sobre lo que confiere poder a los diferentes grupos humanos o sociedades. De la mano de los presentes y de forma muy breve se recorrieron ordenadamente hitos históricos, como los útiles de piedra tallada; el manejo del fuego, la domesticación de los animales, los primeros registros agrícolas, comercio y organización en ciudades, la aparición de la escritura, el comercio de especias, la primera revolución industrial, la segunda revolución industrial, hasta llegar al concepto de Sociedad de la Información y Sociedad del Conocimiento.

De esta forma se introdujo la definición de "Información". En concreto, inicialmente de la mano de la Gran Enciclopedia Larousse [3] "Elemento de conocimiento susceptible de ser representado mediante signos convencionales o símbolos para ser conservado, tratado y comunicado" para finalizar analizando la que nos proporcionó Tomás Pollán [4]: Señales, con significado para un receptor. La definición nos hace plantear la colaboración entre áreas de conocimiento: "Significado" y "Receptor" permiten disertar sobre quién o quienes pueden ser los receptores y como, para un mismo receptor, el significado de unas mismas señales puede cambiar en función de otros parámetros. Entramos de esta forma en el campo de la Filosofía (Lógica) y de la Psicología. Pero en este ámbito interesa centrarnos en la palabra "Señal", ya que nos lleva directamente a la tecnología que la sustenta: la electrónica, entendida como técnica de manejo de la información codificada en señales eléctricas que utiliza dispositivos basados en el comportamiento de los electrones.

Tras explicar las diferencias entre electrónica analógica y digital y las ventajas-desventajas de una frente a otra, este apartado finalizó reflexionando que la electrónica es la técnica que constituye el soporte material de manejo de la información. Y la información es el elemento que en nuestros días (sociedad de la información – sociedad del conocimiento) otorga poder. Esto conllevará también una carga ética sobre su utilización por parte de los profesionales del campo.

¿Cómo comienza todo: orígenes de la electrónica?

Para comprender la electrónica debemos retrotraernos al descubrimiento de las propiedades de los electrones y el origen de la electricidad. Para aumentar el interés de los asistentes se realizó un recorrido histórico divulgativo comenzando por las primeras referencias que se tienen de los fenómenos eléctricos (por ej. textos del antiguo Egipto, alusiones de naturistas y físicos romanos, griegos y árabes, escritos de los primeros colonos de América del Sur y la primera aproximación de la descripción del fenómeno del rayo, de la mano de Abbás Ibn Firnás. A partir de este punto, la historia puede ser más conocida por los asistentes. Se mencionó, entre otros a William Gilbert, Galvani, Volta,

Coulomb, Franking, Ampère, Faraday, Ohm, Maxwell y Hertz.

Resultó de interés la atención despertada por algunos aspectos desconocidos de la vida de estos grandes hombres. Por ej. la dedicación poética de Maxwell (se leyó en el aula el "Poema de amor de un telegrafista a una telegrafista" o se mostró la primera fotografía en color realizada por Thomas Sutton siguiendo las indicaciones de Maxwell en 1861) [5].

Avanzando hacia el campo de las comunicaciones, se describieron muy brevemente las contribuciones de Morse y de Lee de Forest dando lugar a lo que se puede considerar el nacimiento de la electrónica: la construcción del tríodo y posteriores componentes utilizados en los sistemas de radio y, en general, de telecomunicaciones.

La descripción del transistor es un buen ejemplo que ayuda a ilustrar la lucha que debemos mantener los profesionales contra las pseudociencias, ya que en algunos textos se atribuye este invento al ingenio alienígena (ver, por ejemplo [6]). Se narró este ejemplo a los asistentes, para mentalizarles de la necesidad de conocer la historia de la ciencia y de la tecnología antes de leer (y creer) este tipo de informaciones.

A partir de la utilización del transistor, se comentó su posterior proceso de reducción hasta llegar al campo de la microelectrónica, avanzando en paralelo en la implementación de sistemas de control dando lugar a la automatización.

Avanzando en el tiempo. La electrónica digital

Para entender cómo surge la electrónica digital es necesario conocer la figura de George Boole: su formación, intereses personales y matrimonio con Mary Everest. Sólo de esta forma se comprenden las ideas que llevaron a la formulación del Álgebra de Boole. En el curso se mostraron algunos ejemplos muy sencillos de traducción a esta álgebra de frases lógicas, intentando motivar la participación de los asistentes en la resolución.

La figura de Shannon nos permite entender cómo se adapta el Álgebra de Boole al sistema binario de numeración y su implementación a través de conmutadores.

De esta forma, se concluye este apartado reflexionando cómo a través del Álgebra de Boole disponemos de mecanismos físicos capaces de realizar cálculos numéricos y automatizar decisiones lógicas en el marco de la lógica proposicional. Establecemos las bases de la electrónica digital: la electrónica de las computadoras.

A partir de este punto, es fácil entender la evolución conseguida por Turing y Von Neumann y la evolución que han tenido las diferentes generaciones de computadores.

Como ejemplo ilustrativo final, se mostró un vídeo explicativo elaborado por una compañía telefónica [7].

A modo de conclusión

Como conclusiones finales del tema se remarcaron:

- El papel de la tecnología como elemento clave en las revoluciones que han marcado la historia de la Humanidad.
- Como se genera el conocimiento: "a hombros de gigantes". Gigantes con perfil rico y variado.
- La electrónica como soporte material de la información, que es el elemento de poder en la actualidad.
- Aplicaciones en la vida cotidiana:
  - Algunas de las vistas en el resto del curso, especialmente las de medicina.
  - Y en general, la electrónica como base de la tecnología para una nueva sociedad.

RESULTADOS OBTENIDOS

Desde la Universidad todos los años se procede a realizar una encuesta sobre la calidad de las asignaturas impartidas. La Universidad de la Experiencia no es un caso diferente.

En las siguientes gráficas se presentan los resultados obtenidos en el curso que se presenta. Cabe destacar que son resultados globales (del total de los temas tratados y profesores, al no efectuarse encuestas tema a tema). Al cuestionario contestaron 33 personas. En la figura 1 se muestra su rango de edad.

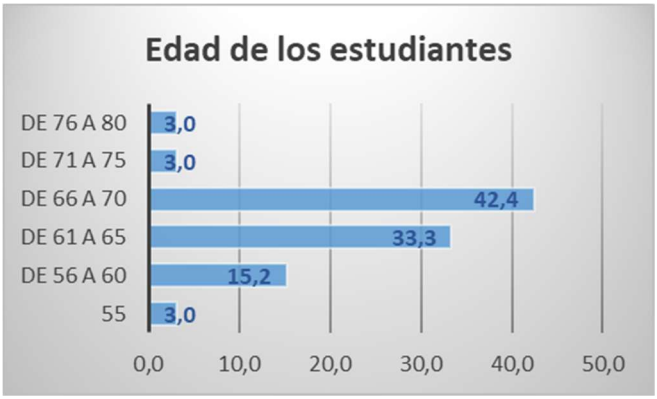


Fig. 1. Distribución de la edad de los estudiantes participantes.

En concreto se evalúa (de 0 – mínima puntuación, a 10 - máxima puntuación) la puntuación para la asignatura (ver figura 2), considerando:

- Contenido
- Interés
- Facilidad de comprensión
- Ajuste del programa al nº de horas

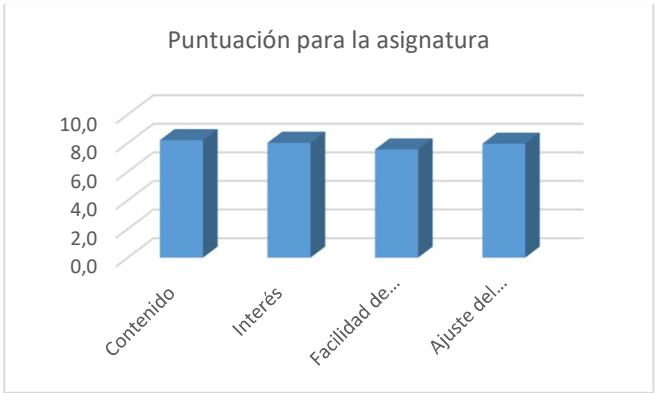


Fig. 2. Valoración de la asignatura por parte de los asistentes (en promedio) en escala de 0 a 10.

Y la puntuación para el profesorado (ver figura 3), en concreto:

- Conocimiento de la materia
- Preparación de las clases
- Claridad de la expresión
- Entusiasmo
- Utilización de materiales y recursos didácticos
- Puntualidad

Fig. 3. Puntuación otorgada por los estudiantes al profesorado (en promedio) en escala de 0 a 10

También se solicita una valoración global de la satisfacción obtenida con la asignatura (ver figura 4). Puede comprobarse que el 61% del alumnado ha quedado bastante satisfecho o muy satisfecho.

Fig. 4. Valoración global de la satisfación en relación con la asignatura.

Cabe destacar que desde la Universidad de la Experiencia comunicaron a la coordinadora del curso (autora de contacto de este trabajo) que la asignatura había sido de las mejor valoradas ese año. Por ello, en el curso 2023-2024 se solicitó a los docentes repetir la experiencia con una segunda parte.

Como principal elemento de mejora los estudiantes solicitaron disponer de mayores recursos sobre el curso en la plataforma habilitada para tal fin (Moodle). Este problema se ha subsanado en la siguiente edición.

A MODO DE REFLEXIÓN FINAL

En el presente trabajo se ha mostrado el diseño realizado para explicar a estudiantes mayores de 55 años la importancia de la tecnología en el avance de la sociedad.

Tras comentar los módulos definidos y una breve descripción de los mismos, el resto del artículo se ha centrado en la introducción realizada a los estudiantes sobre electrónica, y en concreto, ahondando en la electrónica digital.

Se ha remarcado la importancia de la electrónica como tecnología base que permite manejar la información (elemento de poder en la sociedad actual – sociedad de la información/sociedad del conocimiento). De esta forma, se ha puesto sobre la mesa la necesidad de plantear las connotaciones de responsabilidad y ética que conlleva ser profesionales de este campo.

También se ha remarcado (para sorpresa de los asistentes) la necesidad de conocer la historia de la ciencia y de la tecnología como elemento de contraste frente a las pseudociencias.

Ha resultado especialmente interesante para los estudiantes el mostrar a los físicos, matemáticos, ingenieros… como grandes profesionales sobre los que se apoya todo nuestro conocimiento. Pero también como seres humanos, con diferentes facetas que han marcado su forma de trabajar. Por ej. la capacidad poética de Maxwell o el interés religioso de Boole unido a su matrimonio con Mary Everest.

Las claves obtenidas para esta formación también han servido de base para su utilización (de forma resumida) a la hora de introducir la materia de electrónica en la formación de los estudiantes de grado.

A modo de reflexión final, cabe resaltar la importancia y adecuación de incluir conocimiento científico y técnico en lo que se conoce como “cultura general”. En concreto, en este curso que se ha impartido en un marco en el que tradicionalmente predominaban materias humanísticas y sociales, se ha comprobado como al presentarse los conocimientos de forma adecuada, la valoración ha sido positiva.

REFERENCES

[1] Carta de servicios de la Universidad de la Experiencia de la Universidad de Zaragoza. Disponible en la URL: https://juno.unizar.es/juno/cartas-servicios/cs_ICI apartado “Universidad de la Experiencia”. Fecha último acceso: marzo 2024.

[2] UEZ, “Página web de la Universidad de la Experiencia de la Universidad de Zaragoza”. [Online]. Available: https://uez.unizar.es/

[3] Gran Enciclopedia Larousse. También disponible en la enciclopedia on-line: enciclonet.com. Fecha último acceso: marzo 2024.

[4] T. Pollán. Electrónica Digital. I. Sistemas Combinacionales. 1º Ed. 2003.

[5] Wikipedia Commons https://commons.wikimedia.org/wiki/Main_Page Fecha última visita: marzo 2024.

[6] https://www.pressreader.com/mexico/el-sol-de-sinaloa/20180204/282265255876888 Tecnología extraterrestre. El Sol de Sinaloa. 4 de febrero de 20148. Fecha último acceso: marzo 2024.

[7] Grupo Mas Móvil. Cómo viaja tu voz. Disponible en la URL: https://www.youtube.com/watch?v=LI2CmN5pvEs Fecha último acceso: marzo 2024.

Material didáctico en abierto sobre simulación de dispositivos fotovoltaicos con Pspice

J.D. Aguilar-Peña
Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática.
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Universidad de Jaén
Jaén (España)
jaguilar@ujaen.es

C. Rus-Casas
Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática.
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Universidad de Jaén
Jaén (España)
crus@ujaen.es

L. Hontoria
Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática.
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Universidad de Jaén
Jaén (España)
hontoria@ujaen.es

F.J Muñoz-Rodriguez
Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática.
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Universidad de Jaén
Jaén (España)
fjmunoz@ujaen.es

V. Raya-Narváez
I.E.S Las Salinas de Fuengirola
Fuengirola (España)
vraynar983@g.educaand.es

***Abstract*— En este trabajo se presenta el material elaborado, resultado del trabajo desarrollado en los últimos 20 años sobre simulación de célula, módulo y generador fotovoltaico con Orcad-Pspice, como aplicación docente, para impartir clases prácticas en distintos niveles de enseñanza, de manera presencial y semipresencial. El material ha sido puesto a disposición de la comunidad educativa en general en modo acceso abierto mediante una página web.**

Keywords—B-Learning, semipresencial, Pspice, recursos educativos, simulación fotovoltaica.

I. INTRODUCCIÓN

Según datos obtenidos de Red Eléctrica Española (figura1), la potencia renovable en el sistema eléctrico español instalada se ha incrementado en los últimos años, lo que ha permitido alcanzar una potencia instalada que representa un 59,2 % de la potencia total instalada. La integración de esta nueva potencia renovable, mayoritariamente eólica y solar fotovoltaica, representa un fuerte impulso a la transición energética y al cumplimiento de la senda de integración fijada en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), con horizonte 2030.

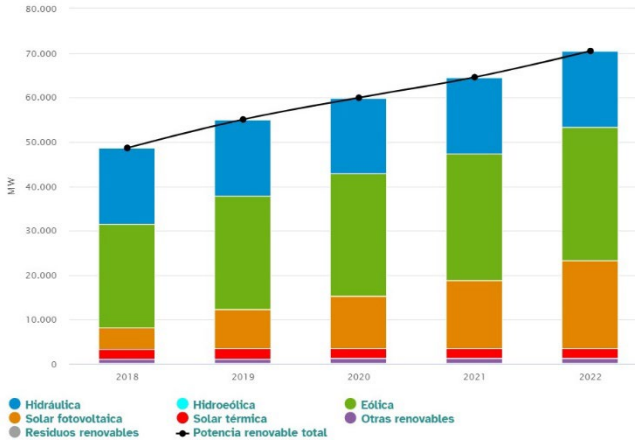


Fig. 1. Evolución de la potencia instalada renovable en España
Fuente: Red Eléctrica Española.

Qué duda cabe que España ocupa una situación geográfica privilegiada en cuanto a radiación solar se refiere, tal y como muestra el gráfico obtenido del Joint Research Centre [1], figura 2, superando a Italia y Grecia, se pueden alcanzar valores de radiación de 1800 kW/h/m^2.

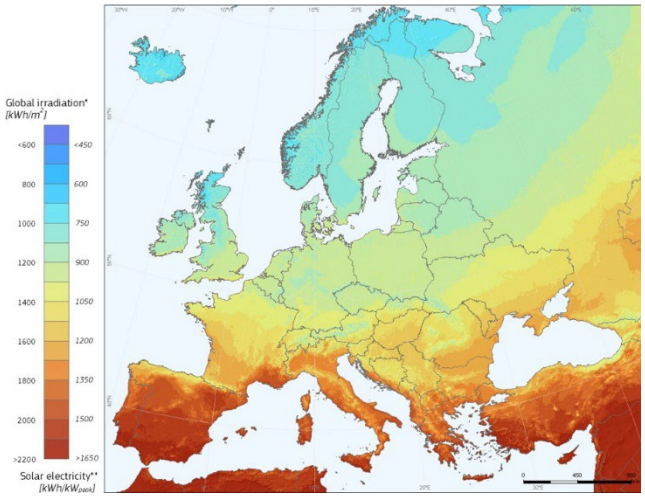


Fig. 2. Potencial solar fotovoltaico en países de europa.
Fuente:Joint Research Centre

En 2022 la energía solar fotovoltaica se ha posicionado como la tecnología con más crecimiento a nivel internacional, tanto entre las renovables como entre las no renovables[2]. Según la Agencia Internacional de la Energía, a nivel mundial, se han instalado 240 GWp de nueva capacidad fotovoltaica, lo que supone un incremento del 137% con respecto a 2021. A pesar de las crisis internacionales, se han alcanzado los 1185 GWp instalados. España ha consolidado su crecimiento, posicionándose como el primer mercado europeo superando este año a Alemania quien ha liderado el mercado europeo durante la mayor parte del tiempo en los últimos 20 años [3].

Este espectacular crecimiento de la energía solar fotovoltaica ha tenido un reflejo en el mercado laboral. Las

previsiones futuras a medio y largo plazo muestran que este desarrollo no sólo se va a mantener, sino que debe incrementarse si queremos cumplir tanto con los objetivos de mitigación del cambio climático como con la transición a la descarbonización de nuestro modelo energético.

En este escenario, y para las próximas décadas, se prevé un incremento en la demanda de especialistas en el sector fotovoltaico que sean capaces de diseñar, evaluar, caracterizar, gestionar y mantener sistemas fotovoltaicos tanto aislados como conectados a red (grandes plantas y autoconsumo).

En los últimos años han sido bastantes las universidades que han incluido en sus planes de estudios de grado, asignaturas optativas sobre fundamentos y diseño de instalaciones solares fotovoltaicas, que complementan o establecen itinerarios de intensificación y master específicos sobre energías renovables o sistemas fotovoltaicos. Basta tomar como ejemplo algunas de nuestras universidades españolas, como es el caso de la Universidad Politécnica de Madrid (Máster Energía Solar Fotovoltaica), Universidad Politécnica de Cartagena (Máster Universitario en Energías Renovables), Universidad Miguel Hernández de Elche (Máster Universitario en Energía Solar y Renovables), Universidad de Almería (Máster en Energía Solar) o la Universidad de Jaén (Grado de ingeniería en electrónica industrial con mención de sistemas fotovoltaicos, Master en Energías Renovables, y Máster en Energía Solar Fotovoltaica), Fig.3.

No se debe de olvidar aquellos centros de enseñanzas medias que imparten ciclos con materias relacionadas con la energía solar o temas específicos tratados en las asignaturas de tecnología, que forman a técnicos del sector y futuros ingenieros que trabajaran en este sector o como profesionales para empresas instaladoras.

Es indudable que la docencia en los distintos niveles de enseñanza, tanto en enseñanza secundaria obligatoria, bachillerato, como en ciclos formativos de formación profesional, o universidad en grado y máster sobre la generación de energía eléctrica con energía renovables en general y sistemas fotovoltaicos en particular, debe de ir acompañada de los recursos docentes necesarios para poder impartir la enseñanza con una calidad adecuada. Estos recursos docentes harán atractivo el aprendizaje al alumnado ayudando a adquirir las competencias necesarias en este campo. Estos recursos deben de ayudar a comprender en distintos niveles conceptos y el funcionamiento de los sistemas, y deberían de poder ser compartidos con la comunidad educativa en general, con licencias en abierto que permitan a otros usuarios una mayor flexibilidad en el aprendizaje para el alumnado y reutilizar y compartir el material elaborado entre el profesorado implicado.

En este sentido, este trabajo se alinea con uno de los fines, de la asociación TAEE. Esta asociación recoge en sus estatutos el objetivo de ”Fomentar el desarrollo de recursos educativos de calidad en abierto y su reutilización y mejora permanente”. Esto ha alentado a los autores a presentar este trabajo en el foro del congreso de Tecnologías Aplicadas a la enseñanza de la Electrónica, como vehículo de difusión de las actuaciones de la asociación.

El objetivo de esta comunicación será mostrar el resultado del trabajo desarrollado en los últimos 20 años sobre ejercicios y prácticas de simulación de célula, módulo y generador fotovoltaico con la herramienta de software Orcad-Pspice. Estos recursos docentes, podrán ser usados para impartir clases prácticas en distintos niveles de enseñanza, de manera presencial y semipresencial. Todo este material tal como: programas complementarios sobre radiación solar, cálculos mediante Excel, ficheros y librerías de simulación con Pspice, manuales de prácticas y libro docente, se ha ordenado y puesto a disposición de la comunidad educativa en general en modo acceso abierto a través de un sitio web en el espacio del equipo de investigación al que pertenecen los autores.

II. CONTEXTO

En la Universidad de Jaén, en el Grado de Ingeniería en Electrónica Industrial, así como en el Máster en Energías Renovables, se pueden encontrar asignaturas con contenidos específicos de sistemas fotovoltaicos.

En la figura 3 se puede apreciar la estructura del Grado de Ingeniero en Electrónica Industrial, Máster de Energías Renovables, y Máster en Ingeniería de los Sistemas Fotovoltaicos, que se imparten en la Universidad de Jaén. En el caso del grado, el estudiante puede cursar una intensificación de 30 créditos, con lo que obtiene la mención en sistemas fotovoltaicos. Para ello, debe eligir entre varias asignaturas optativas ofertadas para cada uno de los Grados. En concreto en el Grado de Ingeniería Electrónica Industrial, existen tres menciones, sistemas electrónicos, automática y sistemas fotovoltaicos.

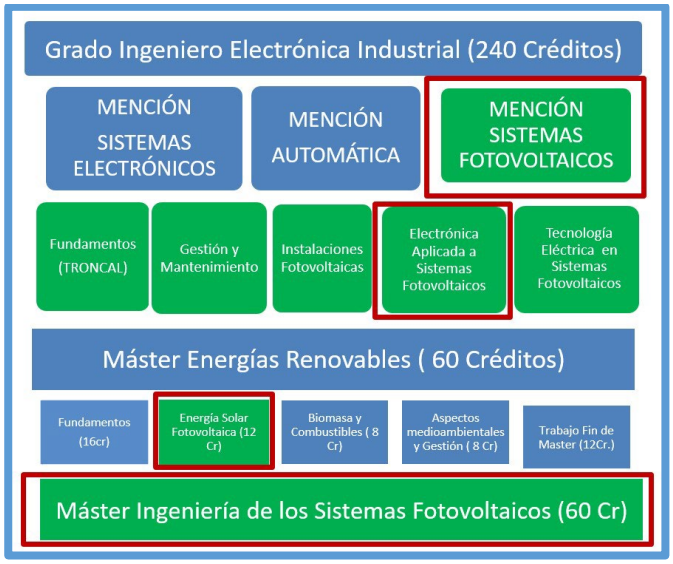


Fig.3. Grados y Másteres en la Universidad de Jaén relacionados con la energías renovables y asignaturas relacionadas, Curso 2023/24 (https://eps.ujaen.es/)

La mención de sistemas fotovoltaicos, además de una asignatura troncal obligatoria para todos los alumnos matriculados del grado “Introducción a los sistemas fotovoltaicos” de 6 créditos, incluye asignaturas optativas específicas de 6 créditos cada una:

- Instalaciones fotovoltaicas
- Gestión y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos
- Electrónica aplicada a los sistemas fotovoltaicos
- Tecnología eléctrica en sistemas fotovoltaicos

Y optativas genéricas, comunes a todas las menciones:

- Sistemas de Adquisición de Datos
- Programación
- Prácticas externas

Así mismo, esta mención puede tener continuidad con el Máster de Energías Renovables en el que existe un módulo específico de Sistemas Fotovoltaicos y un Máster semipresencial de Energía Solar Fotovoltaica (https://www.ujaen.es/estudios/oferta-academica/masteres)

III. ANTECEDENTES

El grupo de trabajo formado por algunos profesores del departamento de Ingeniería Electrónica y Automática, pertenecientes al actual grupo de investigación Ingeniería aplicada y energía solar (ENIAS) de la Universidad de Jaén [https://web.ujaen.es/investiga/enias], lleva trabajando desde hace años en la generación de recursos didácticos aplicados a la enseñanza de la radiación solar [4],[5],[6], fundamentos y simulación de dispositivos fotovoltaicos [7] y programas de ayuda en el diseño y cálculo de la energía suministrada por un sistema [8],[9].

En 2006 [10] se presentó la comunicación sobre estudio de célula solar con ayuda de Pspice, describiendo el modelo eléctrico utilizado para simular el comportamiento de una célula solar, funcionando como generador de corriente descrito en el modelo de M.A.Green [11], formula 1, resultando la diferencia entre la corriente fotogenerada, que es proporcional a la generación de portadores debido a la incidencia de los fotones sobre la célula y la corriente del diodo, que corresponde a la corriente en oscuridad por la recombinación de portadores que produce el voltaje externo [18].

$$I = I_{SC}\left[1 - \exp\left(\frac{V - V_{OC} + I \cdot Rs}{V_T}\right)\right] - \frac{V + I \cdot Rs}{Rp} \quad (1)$$

Donde I_{SC} es la corriente de cortocircuito, V_{OC} la tensión en circuito abierto, Rs es la resistencia serie, Rp es la resistencia paralelo, V_T es el voltaje térmico (Vt=kTc/e; k la constante de Boltzman, Tc la temperatura de la célula en Kelvin y e la carga del electrón).

Este modelo de módulo fotovoltaico se obtiene considerando las células serie y paralelo que lo conforman y considerando las aproximaciones ampliamente aceptadas por toda la comunidad científica en este campo [12]. La validación del modelo utilizado se realiza en la terraza de la Escuela Politécnica Superior de Jaén, sobre un módulo de silicio monocristalino a sol real y pasando posteriormente a condiciones estándar de funcionamiento para comparar con los valores suministrados por el fabricante [10], obteniéndose unos excelentes resultados. Se presenta la descripción de una práctica completa de simulación de célula y módulo solar fotovoltaico, medidas a sol real con trazador de curvas y comparación de los datos obtenidos simulados, con los medidos prácticos y los suministrados por el propio fabricante.

En la figura 4 aparece el Netlist correspondiente para la simulación del comportamiento mediante Pspice que describe el esquema equivalente dado por la ecuación 1, para una célula solar. En este caso con valores de corriente de cortocircuito (I_{SC_STC}) y tensión en circuito abierto (V_{OC_STC}), en condiciones estándar de 3.27 A. y 0.6 V. respectivamente en condiciones estándar de medida (STC). Siendo G_ABM1 un generador de corriente igual a la corriente de cortocircuito I_{SC}, G_G1 un generador de corriente igual a la corriente del diodo, R_R_S la resistencia serie calculada para esta célula, y R_Rp la resistencia equivalente paralelo, considerando idealmente infinito y un valor muy alto en la simulación

```
.subckt Celula_PARAM POS NEG G Ta
G_ABM1  NEG    1 VALUE { 3.27m*V(G)}
G_G1      1  NEG VALUE {
+      3.27m*V(G)*EXP(-(0.6-2.3m*((V(Ta)+273)+33.75m*V(G)-298))/
+      (85.9u*((V(Ta)+273)+33.75m*V(G))))*EXP(V(1,NEG)/
+      (85.9u*(((V(Ta)+273)+33.75m*V(G))))) }
R_Rs     1  POS  17.96m
R_Rp     NEG    1  10Meg
.ends Celula_PARAM
```

Fig.4. Netlist de Pspice que describe el esquema equivalente del comportamiento de la célula solar paramétrica fotovoltaica.

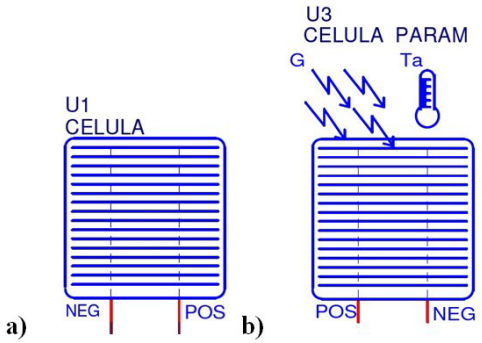


Fig.5. Dibujo diagrama correspondiente al modelo de célula solar y célula solar paramétrica

Para hacer más sencilla la introducción del esquemático en los circuitos de simulación se crea una librería en la que está incluida el modelo de célula solar para el cálculo en condiciones determinadas de irradiancia y temperatura (figura. 5)

Como trabajo en progreso se presenta en [13], la idea del laboratorio virtual de sistemas fotovoltaicos mediante la simulación de los dispositivos y sistemas con Pspice. En este trabajo, se avanza más en la idea original y se plantea la posibilidad de utilizar de una manera adecuada este laboratorio como parte de la docencia on line y docencia semipresencial (B-Learning), aportando como novedad la utilización de datos reales monitorizados de un sistema fotovoltaico montado en la terraza de las instalaciones del laboratorio de energía solar, pudiendo el alumno obtener dichos datos y compararlos con los datos simulados. El alumno extrae posteriormente sus propias conclusiones del estudio, teórico, simulado y experimental. Esta idea se desarrolla de una manera más completa en [14].

Durante la Pandemia de COVID-19, se tuvieron que cortar las clases presenciales y en el curso siguiente se establecieron las alternancias de clases presenciales con clases on line. Se observó la necesidad de impartir la docencia combinando distintas metodologías, y es en este contexto cuando cobra especial importancia la docencia semipresencial, al poder realizar el alumno comprobaciones del comportamiento de estos dispositivos a partir de datos reales monitorizados

suministrados por el profesor o medidos en una sola sesión de trabajo por grupos de alumnos.

IV. Objetivos y metodología desarrollada

Con este trabajo se han planteado los siguientes objetivos:

- Potenciar el desarrollo de técnicas, procesos y estrategias que motiven al profesorado a dinamizar sus clases e impulsar la participación activa del alumnado en escenarios presenciales, híbridos o no presenciales.
- Impulsar acciones orientadas al uso y desarrollo de metodologías, tecnologías, materiales y recursos de utilidad en la enseñanza híbrida o no presencial.
- Promover la utilización innovadora de los recursos y servicios de la Universidad de Jaén (instalaciones de energía solar fotovoltaica utilizados en investigación y docencia).
- Recopilar y ordenar el material docente elaborado en los últimos años relacionado con la docencia on line de sistemas fotovoltaicos y la simulación de este tipo de dispositivos, con su puesta en abierto para libre descarga por la comunidad educativa.
- Colaborar con centros de educación secundaria, realizando algunas actividades con material docente desarrollado, acercando la universidad y las carreras técnicas mediante contenidos de energías renovables.

A continuación, se describe mediante la figura 6 la metodología implementada para alcanzar los objetivos propuestos, desde la realización del manual de teoría básico, a la realización de la página Web integrada en la página del grupo de investigación y que servirá como vehículo a para poner en abierto el material.

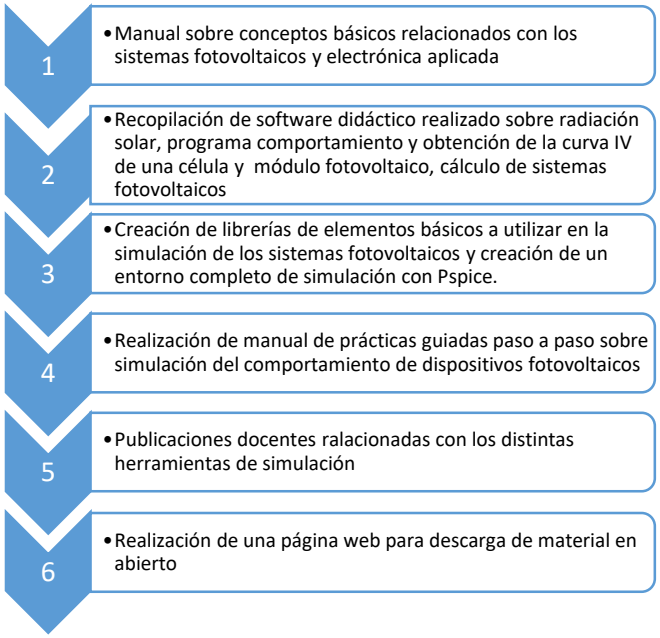


Fig.6. Esquema de la metodología implementada

En los últimos años se ha obtenido material docente relacionado con la creación del laboratorio virtual aplicado a la simulación de dispositivos fotovoltaicos y herramientas de ayuda para la comprensión de conceptos como radiación solar y diseño de sistemas fotovoltaicos. En esta comunicación comentamos el material elaborado y se pone a disposición de la comunidad educativa en general, mediante una página web desarrollada en la que se puede descargar dicho material realizado en modo acceso abierto. Trabajo apoyado por un proyecto de innovación docente financiado por la universidad de Jaén.

V. Resultados

A. Manual de teoría

Se ha realizado un manual de texto que sirve de guía para impartir los distintos temas tratados en una asignatura optativa sobre "Electrónica Aplicada a los sistemas Fotovoltaicos", partiendo de unos conocimientos básicos de energía solar fotovoltaica e instalaciones fotovoltaicas. Los temas tratados son:

Bloque I: Repaso y Conceptos de modelado mediante Pspice de sistemas fotovoltaicos.

Capítulo 1.- Conceptos de célula solar. Modelado por ordenador

1.1. Introducción. Efecto fotovoltaico
1.2. Características eléctricas de la célula
1.3. Modelo eléctrico de una célula solar
1.4. Efectos de la temperatura y radiación en célula solar
1.5. Modelado de célula solar. Característica IV y funcionamiento en régimen transitorio
1.6. Conexión células serie y paralelo.
1.7. Datos suministrados por fabricante. Hojas de características

Capítulo 2.- Problema del punto caliente y diodo de paso

Capítulo 3.- El módulo fotovoltaico

3.1. Características I.V módulo fotovoltaico
3.2. Obtención dela curva IV para condiciones determinadas de irradiancia y temperatura
3.3. Modelado mediante Pspice de módulo fotovoltaico

Capítulo 4: El Generador fotovoltaico

4.1. Generador fotovoltaico y modelado con Pspice
4.2. Seguidor del punto de máxima potencia. Concepto y modelado
4.3. Expresiones método Araujo-Green

Bloque II: Conceptos teóricos de electrónica aplicada a sistemas fotovoltaicos

Capítulo 5.- Diodo de paso y de bloqueo. Sombreado parcial módulo FV.

Capítulo 6.- Reguladores de carga de sistemas fotovoltaicos

6.1. Funcionamiento.
6.2. Algoritmos de carga. Ejemplos.
6.3. Análisis de componentes que configuran el regulador.
6.4. Norma técnica universal para sistemas FV domésticos: Requisitos del regulador de carga

Capítulo 7.- Convertidores DC-DC y algoritmos de control

7.1. Introducción al seguimiento del punto de máxima potencia
7.2. Concepto DC_DC. Repaso
7.3. Convertidor DC_DC como emulador de resistencia variable. Reductor o Buck, elevador o Boost, reductor-elevador
7.4. Comportamiento acoplamiento módulo FV y convertidor DC_DC
7.5. Limitaciones de funcionamiento
7.6. Clasificación métodos de seguimiento. Algoritmos.

Capítulo 8.- Inversores

8.1. Funcionamiento y principios de operación
8.2. Circuitos de potencia
8.3. Estrategias básicas de control
8.4. Configuraciones de circuitos de potencia
8.5. Inversores FV para instalaciones autónomas
8.6. Inversor fotovoltaico conectado a red
8.7. Dependencia de la eficiencia con algunos parámetros de funcionamiento
8.8. Inversores FV comerciales

B. Software didáctico

- *Orientsol 3.0*

Programa didáctico de cálculo de radiación recibida sobre superficies inclinadas [5], [6], [15].

Cuando el alumno aborda el diseño de un sistema fotovoltaico, tanto en sistemas conectados a red, como autónomos, debe determinar los valores de funcionamiento del sistema, por lo que, en primer lugar, hay que tener en cuenta algunas cuestiones relacionadas con la radiación solar incidente. Determinar la situación óptima de los módulos del generador fotovoltaico (orientación e inclinación), calcular la energía anual recibida sobre su superficie con y sin seguimiento, estudiar de manera comparativa las pérdidas de la captación de los casos en estudio, y en su caso determinar inclinación óptima para maximizar la energía recibida del sol.

Para determinar la radiación solar incidente sobre el generador, se debe medir la irradiación diaria media mensual en el plano horizontal o consultar en una base de datos en la que esté disponible. La dificultad de trabajar con gran cantidad de datos, así como con expresiones matemáticas complejas, pueden hacer que el alumno se desmotive, incluso abandone la asignatura.

El programa realiza todos los cálculos de forma transparente para el usuario según la opción seleccionada, ofreciendo la posibilidad de representar los resultados de los cálculos realizados en forma de tabla o gráficamente, obteniendo los valores de la componente de radiación que se desee: global, directa, difusa o albedo. Por último, hay que destacar que el programa permite tanto imprimir los resultados como exportar los mismos a una hoja de cálculo de Microsoft Excel, con la versatilidad que esta opción puede llegar a ofrecer. De este modo, se puede trabajar con más cantidad de datos y realizar las operaciones que se consideren oportunas.

- *PV Excel 4.0*

Este programa, se puede utilizar tanto a modo didáctico para trabajar con los alumnos en el aula, como para cálculo de comprobación para instaladores o profesionales. Es un programa de ayuda al diseño y dimensionado de un sistema fotovoltaico conectado a la red (SFCR). Permite la simulación del comportamiento del mismo, ofreciendo unos resultados que ayudan a conocer y valorar distintos aspectos de este tipo de instalaciones, como son: tensión, corriente y potencia en el punto de máxima potencia de funcionamiento del generador fotovoltaico, valores de energía producida a lo largo de un año, el balance energético, el balance económico, y el impacto medioambiental [8], [16].

El modelado del comportamiento del SFCR se basa en calcular el valor de la corriente y tensión de la célula en el punto de máxima potencia, a intervalos de diez minutos, a partir de los valores diarios medios mensuales de irradiación, temperatura y de los parámetros de la célula en condiciones estándar.

El Software desarrollado, es una GUI (graphical user interface) realizado en la Hoja de cálculo Excel, y plantea tres opciones de diseño:

1.- A partir del módulo fotovoltaico escogido y la ciudad en la que se emplazará la instalación.

2.- Opción basada en la estimación de la contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica que deben incorporar los edificios de nueva construcción, siguiendo el Código Técnico de la Edificación, sección HE 5, según el Real Decreto314/2006.

3.- Permite el diseño a partir de las dimensiones y del tipo de superficie donde se desea instalar

C. Prácticas de simulación dispositivos fotovoltaicos con Pspice guiadas

La distribución de prácticas de simulación de célula, módulo y generador fotovoltaico, junto con convertidores DC-DC y Convertidores DC-AC (Inversores), tal y como aparece en la tabla I consta de una propuesta de 7 sesiones de dos horas de duración cada una. Cada uno de los guiones de manera independiente junto con los ficheros de simulación se encuentras disponibles para su descarga.

Se han realizado para las distintas simulaciones dos librerías para Pspice, la librería generada de modelos de esquemáticos (Solar_part.olb), y la librería de modelos (Solar_part.lib), que deberán de estar previamente instaladas en el programa simulación de Orcad-Pspice.

A continuación, se muestran algunos ejemplos de parte de las prácticas.

En las figuras 7 y 8 se puede observar el esquema de Pspice y el resultado obtenido para analizar la curva I-V y P-V de la colocación de dos células en serie (correspondiendo a una parte de la práctica PS3_1. En las figuras 9 y 10 se observa el esquemático de la colocación de cuatro células serie con un sombreado parcial sobre una de ellas, y la obtención de las curvas corriente y potencia en función de la tensión en extremos de la misma, para poder observar el efecto producido por la colocación del diodo de paso sobre el funcionamiento del sistema. Las células 1, 3 y 4 reciben una irradiancia de 1000 de W/m^2, mientras que la 2 se encuentra parcialmente sombreada y su valor de irradiancia es de 400 W/m^2. La temperatura de célula se considera la misma para todas ellas

con un valor de 25 ºC que corresponde con un valor de -8.75ºC de temperatura ambiente.

TABLA I. TABLA DISTRIBUCIÓN DE PRÁCTICAS

INTRODUCCIÓN. MODELO (2h)
• ***PS1. Introducción a la simulación con Pspice de sistemas fotovoltaicos (SFV)***
CÉLULA FOTOVOLTAICA (2h)
• ***PS2. Modelo de la célula solar: Simulación de curva V-I***
MÓDULO Y GENERADOR FOTOVOLTAICO (4h)
• ***PS3. Simulación del comportamiento de conexión de células serie y paralelo. Efectos del sombreado. Diodo de paso (2h).***
• PS3.1. Simulación del comportamiento de conexión de células serie y paralelo de células solares (1h)
• PS3.2. Simulación del comportamiento baja efectos del sombreado. Diodo de paso (1h)
• ***PS4. Simulación módulo y generador fotovoltaico (2h)***
• PS4.1. Simulación módulo. Conexión serie y paralelo módulos FV. (1h).
• PS4.2 Simulación generador fotovoltaico (1h).
CONVERTIDORES (6h)
• ***PS5. Convertidores DC-DC, aplicación a los SFV: Convertiudor reductor y convertidor elevador(2h).***
• ***PS6. Simulación inversor trifásico (2h).***
• ***PS7. Inversores otras configuraciones (2h)***

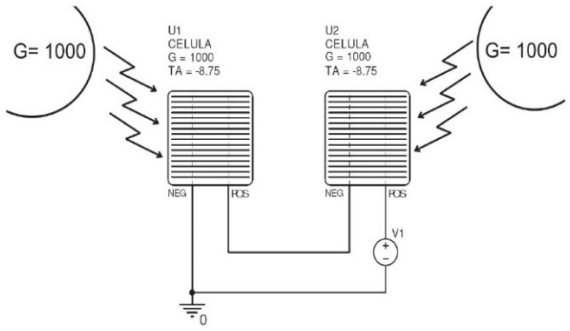


Fig.7. Esquema para el estudio de dos células fotovoltaicas serie

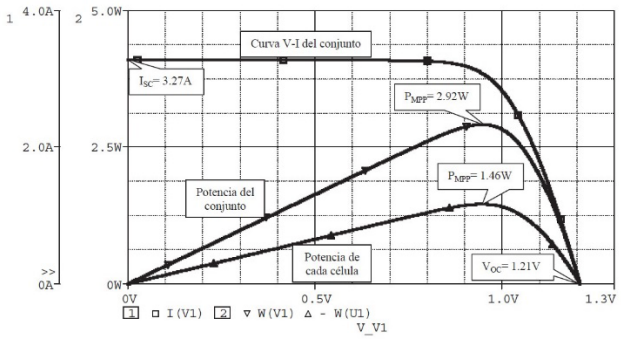


Fig.8. Resultado de la curva IV de dos células fotovoltaicas conectadas en serie

En la figura 10 se aprecia como hay dos máximos en la función de la potencia de valor 1.15 y 2.87 W, lo que podría provocar un falso cálculo en el algoritmo del seguimiento del punto de máxima potencia. Además, se aprecian los dos valores que estima la corriente 3.26 y 1.30 Amperios, cuando entra en conducción el diodo de paso. Estas corresponden a la práctica PS3_2.

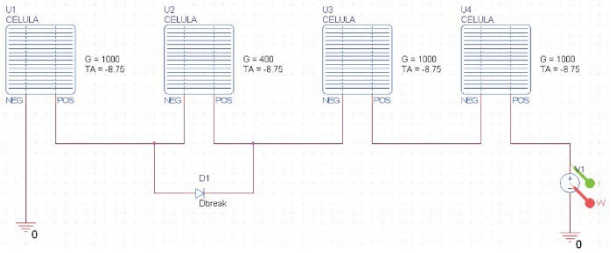


Fig.9. Esquemático para análisis de cuatro células fotovoltaicas serie sombreadas parcialmente y con diodo de paso

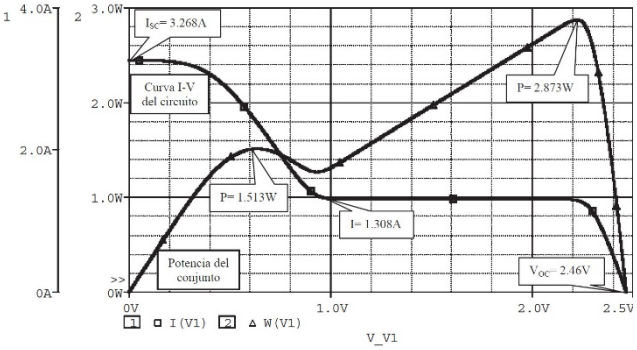


Fig.10. Características de corriente y potencia en función de la tensión en extremos de la célula

D. Página Web

Todo el material como se comentó inicialmente se pone a disposición de la comunidad educativa dentro de la página Web del grupo ENIAS [https://eniasujaen.wordpress.com], y en sección particular para su posible acceso, descarga y su libre utilización. Esta página está dividida en: Publicaciones docentes, apuntes, recursos software, videos docentes, simulación.

En la figura 11 se puede apreciar una captura de la pantalla de la página web a la que se puede acceder mediante la dirección:https://eniasujaen.wordpress.com/docencia-energia-solar/

Fig.11. Captura de pantalla de la página web de ENIAS en la que está recopilado el material docente.

https://eniasujaen.wordpress.com/docencia-energia-solar/

VI. GRADO DE SATISFACCIÓN DEL ALUMNADO

La docencia semipresencial es bien acogida por parte de los alumnos, como se ha podido comprobar en los últimos años. Se ha realizado una pequeña encuesta a los alumnos de las distintas titulaciones y asignaturas en estos últimos años con unos resultados que se muestran a continuación.

En la figura 12 del total de 48 alumnos que han realizado la encuesta, el porcentaje de alumnos de grado de electricidad y electrónica es del 52,2% y 47,8% de alumnos de Máster

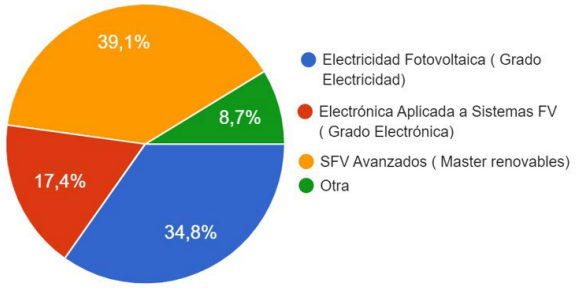


Fig.12. Distribución delos alumnos por asignaturas y especialidad.

En la tabla siguiente se presentan las cuestiones que se han propuesto a los alumnos para determinar el grado de satisfacción y detectar posibles mejoras. Unas relacionadas con el uso, entorno y manejo del programa de simulación (Q1 a Q5), otras relacionadas con la explicación del profesor y material suministrado al alumno (Q6 a Q10), las tres siguientes relacionadas con la aportación de la herramienta al aprendizaje (Q11 a Q13) y finalmente una valoración global de la actividad (Q14). Las cuestiones tienen cuatro elecciones del 1 al 4, siendo el 1 el más desfavorable y 4 el más favorable.

TABLA II. RESULTADOS ENCUESTA ALUMNOS

Nº	Cuestión	media	Desvt
Q1	El uso del recurso ha contribuido en el aprendizaje del funcionamiento de la célula y generador fotovoltaico.	3,31	0,66
Q2	El manejo del programa de simulación te ha ayudado a comprender el comportamiento real de los dispositivos de manera más clara y comprensible.	3,04	0,77
Q3	Este entorno me ha ayudado a comprender mejor la relación entre la teoría y la práctica.	3,13	0,79
Q4	Que valoración daría a la ejecución de la simulación y comparación con valores monitorizados.	3,27	0,68
Q5	El entorno de usuario es intuitivo y fácil de usar.	2,65	0,73
Q6	La presentación realizada en clase ha sido adecuada y clara sobre la herramienta Pspice,	3,13	0,82
Q7	La presentación realizada en clase ha sido adecuada y clara sobre los ejercicios de SFV a realizar.	3,21	0,74
Q8	Los materiales aportados por el profesor para abordar la simulación de los circuitos estudiados han sido claros y me han ayudado al estudio.	3,33	0,81
Q9	Grado de dificultad en la ejecución de las prácticas (4 máxima dificultad).	2,69	0,66
Q10	El material del recurso se presenta en una manera lógica.	3,13	0,79
Q11	Cree usted que aprendió mejor el comportamiento de una célula fotovoltaica gracias al recurso docente que utiliza la simulación con Pspice.	3	0,74
Q12	Cree usted que aprendió mejor el comportamiento de un SFV con seguimiento del punto de máxima potencia mejor gracias al recurso docente que utiliza la simulación con Pspice.	2,9	0,81
Q13	El recurso docente me ha hecho más autónomo en el aprendizaje y será una herramienta de trabajo para el estudio del comportamiento de los dispositivos una vez que termine.	2,9	0,88
Q14	Valoración global de la herramienta aplicada a estas prácticas de SFV.	3,21	0,8

Se pueden realizar algunas consideraciones de los valores presentados en la tabla II. A la cuestión Q1 relacionada con la contribución a la comprensión del concepto de célula y generador fotovoltaico el 89,6 % han respondido positivamente (figura13)

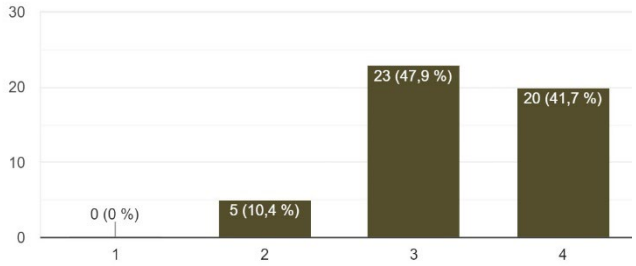


Fig.13. Q1 relacionado con la contribución al aprendizaje del funcionamiento de célula y generador FV

Q2 y Q3 relacionadas con el de la ayuda a la comprensión del dispositivo y a la relación teoría práctica el 77% y el 83,3% respectivamente han respondido valores entre 3-4, con valor medio total de 3, lo que indica que hay una parte de aproximadamente un 17%, que no termina de ver la utilidad real de la aplicación. Esto puede estar relacionado con la cuestión 5 en la que un 37,6 % considera un entorno complicado de utilizar (figura14). Hay que destacar que los alumnos de máster, la mayoría, nunca han tenido ningún contacto previo con este programa de simulación lo que aumenta el grado de dificultad en el manejo y comprensión de la utilidad del mismo. Poco más de la mitad de los alumnos así lo entiende (figura15), cuestión Q9, 4 máxima dificultad).

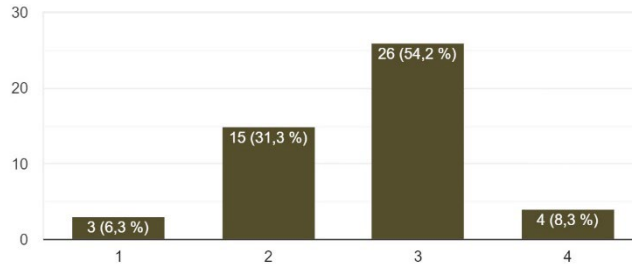


Fig.14. Q5 relacionada con el entorno de usuario es intuitivo y fácil de utilizar

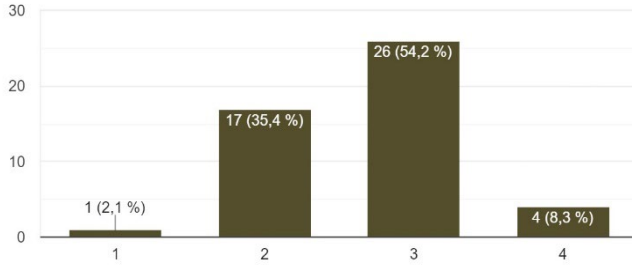


Fig.15. Q9 Grado de dificultad en la ejecución de las prácticas

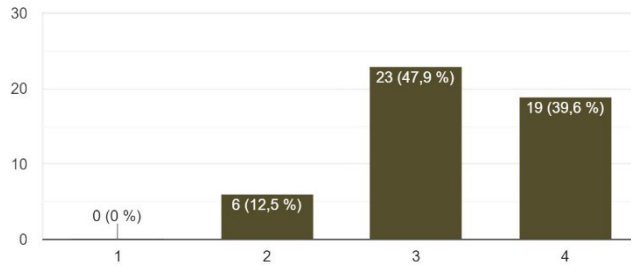


Fig.16. Q4 valoración de la utilización de datos monitorizados y comparación con datos teóricos

Con respecto a la utilidad que los alumnos observan al utilizar valores reales monitorizados para comparar con los valores teóricos (figura 16), el 87,5 % los consideran positivo con valor medio de 3,27.

El grado de dificultad de realización de las prácticas con un 2,69 de media se percibe como alto con más de la mitad, un 54,2% con valor 3 sobre 4, siendo 4 el grado máximo de dificultad, como se mencionó previamente.

En Q14(figura 17) se presenta la valoración global de las prácticas realizadas. Con una media de 3,21, y más del 85% con una valoración 3-4, positiva.

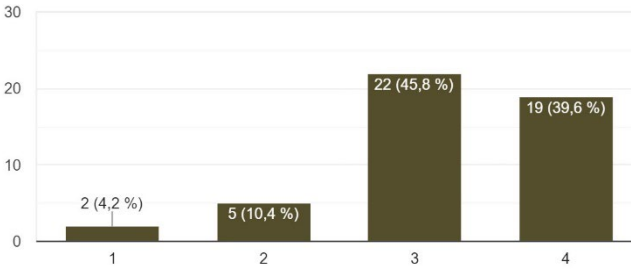


Fig.17. Q14 valoración global de las prácticas

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realiza con la ayuda de la financiación recibida de un Proyecto aprobado y financiado por el Plan de innovación y mejora docente de la universidad de Jaén, titulado "B-learning en el aprendizaje de la ingeniería. Simulación y experimentación". Además, los materiales docentes presentados forman parte de una línea de TFGs en los que destacan los trabajos de J.J. Marín Mera [17] que fue la base del trabajo realizado posteriormente por J.J. Figueroa[18] y J.F. Merino[19].

REFERENCIAS

[1] Joint Research Centre. Photovoltaic Geographical Information System. Country and regional maps [Online]. Disponible en: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index.html]

[2] Renewable capacity statistics 2023. International Renewable Energy Agency. (IRENA) [Online]. Disponible en: https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023

[3] Informe 2023. "Fomentando la biodiversidad y el crecimiento sostenible." Unión Española Fotovoltaica. [Online]. Disponible en: https://www.unef.es/es

[4] C. Rus, et al., "Herramienta software para el cálculo de la radiación solar en superficies con distinta inclinación: ORIENTSOL". Iniciación a La Investigación. Universidad de Jaén. 2011. [Online]. Disponible en:https://revistaselectronicas.ujaen.es/index.php/ininv/article/view/519

[5] C. Rus Casas, et al., "OrientSol: superficies con distinta inclinación Software para el cálculo de la radiación solar". Era solar, Nº. 153, 2009, págs. 64-74

[6] M. Jiménez-Torres, C. Rus-Casas, L.G. Lemus-Zúiga, and L. Hontoria, "The Importance of Accurate Solar Data for Designing Solar Photovoltaic Systems—Case Studies in Spain". Sustainability 2017, 9, 247. [Online]. Disponible en: https://doi.org/10.3390/su9020247]

[7] J.D. Aguilar et al., "Estudio de la célula solar con ayuda de simulador PSPICE y de medidas de módulos fotovoltaicos de silicio cristalino a sol real". Madrid TAEE 2006. [Online]. Disponible en: https://www.asociaciontaee.org/congresos/taee-2006]

[8] J. D. Aguilar-Peña et al., "Herramienta de ayuda al diseño y cálculo de instalaciones de energía solar fotovoltaica conectada a la red_ PV Excel Jaén 3.0". 2014 XI Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica (TAEE), Bilbao, 2014, pp. 1-8. [Online]. Disponible en: http://taee.etsist.upm.es/actas/2014/papers/2014S7BA03.pdf

[9] J. D. Aguilar-Peña, et al., "Uso de herramientas docentes para el fomento del autoaprendizaje. Caso práctico de estudio: Dimex SFCR". XI Tecnologias Aplicadas a la Ensenanza de la Electronica (TAEE), Bilbao, 2014. [Online]. Disponible en: https://taee.etsist.upm.es/actas/2014/papers/2014S3BA03.pdf]

[10] J.D. Aguilar, G.E. Nofuentes, J.de la Casa, F.J.Muñoz, "Estudio de la célula solar con ayuda de simulador pspice y de medidas de módulos fotovoltaicos de silicio cristalino a sol real". Congreso: VII Congreso sobre Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica. TAEE 2006. Madrid. [Online]. Disponible en: http://taee.etsist.upm.es/actas/2006/papers/2006S2F02.pdf]

[11] M.A. Green, Solar cells: Operating principles, Technology and System applications. Prentice-Hall. New Jersey, 1982.

[12] E. Lorenzo et al., Solar electricity: Engineering of photovoltaic systems, Progensa, 1994.

[13] J.D. Aguilar et al., "B-learning of photovoltaics systems using OrCAD PSPICE: "Work in progress"," in Frontiers in Education Conference (FIE), 2014 IEEE, vol., no., pp.1-4, 22-25 Oct. 2014. doi:10.1109/FIE.2014.7044211

[14] J.D. Aguilar-Peña, F.J. Muñoz-Rodríguez, C. Rus-Casas and J. I. Fernández-Carrasco, "Blended learning for photovoltaic systems: Virtual laboratory with PSPICE," 2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE), Seville, Spain, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/TAEE.2016.7528366

[15] C. Rus, et al., "Herramienta software para el cálculo de la radiación solar sobre superficies inclinadas". VIII Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica. Universidad de Zaragoza 2008. [Online]. Disponible en: https://www.asociaciontaee.org/congresos/taee-2008]

[16] J.D. Aguilar, P. J. Perez, J. De la Casa, C. Rus, "Cálculo de la energía generada por un sistema fotovoltaico conectado a red: aplicación docente". [Online]. Disponible en: https://www.asociaciontaee.org/congresos/taee-2006]

[17] J. J. Marín Mera. "Aproximación al Diseño y Simulación de Circuitos Electrónicos de Potencia en Sistemas Fotovoltaicos. Convertidores DC/DC y Algoritmos de Control M.P.P.T." Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Jaén. Escuela Politécnica Superior. 2008. Memoria: UJ/EPS/DE/13.08.

[18] J. J. Figueroa Fuentes. "Simulación de Sistemas Fotovoltaicos con Pspice: Célula, Módulo, Generador y Circuitos de Potencia". Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Jaén. Escuela Politécica Superior. 2011. Memoria: UJ/EPS/DE/ 13.11

[19] J.F. Merino Baena, "Conceptos sobre electrónica aplicada a sistemas fotovoltaicos: teoría y simulación." Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Jaén. Escuela Politécnica Superior. 2013

Initiation to research in new photovoltaic applications: Agrivoltaics

Alejandro Cruz Escabias
AdPVTech
University of Jaén
Jaén, Spain
aescabia@ujaen.es

Álvaro Fernández Solas
Institute of Solar Research - German Aerospace Center (DLR)
Almería, Spain
alvaro.fernandezsolas@dlr.de

José Manuel Fernández López
AdPVTech
University of Jaén
Jaén, Spain
jflopez@ujaen.es

Pedro Jesús Pérez Higueras
AdPVTech
University of Jaén
Jaén, Spain
pjperez@ujaen.es

Florencia Almonacid Cruz
AdPVTech
University of Jaén
Jaén, Spain
facruz@ujaen.es

Genoveva Carmen Martos de la Fuente
Animal Biology, Plant Biology and Ecology Department
University of Jaén
Jaén, Spain
gmartos@ujaen.es

Ana María Fernández Ocaña
Animal Biology, Plant Biology and Ecology Department
University of Jaén
Jaén, Spain
amocana@ujaen.es

Eduardo Fernández Fernández
AdPVTech
University of Jaén
Jaén, Spain
fenandez@ujaen.es

***Abstract*— The integration of photovoltaic systems in agricultural installations, known as agrivoltaics, offers a solution to the land use competition between energy generation and agriculture. The objective of this study is to transfer basic research notions to university students. To achieve this, this work seeks to bring students closer to new trends in photovoltaics through a pilot experience that analyses the impact of different PV materials as amorphous silicon and cadmium telluride on the development of different crop species like tomatoes and green beans within small greenhouse prototypes.**

Keywords— Education, photovoltaic solar energy, agrivoltaics, engineering, thin-film, beans, tomatoes.

I. INTRODUCTION

Traditional agriculture often faces challenges related to the availability and efficient use of land. Agriculture can be vulnerable to changes in climatic conditions and water availability, which can affect crop productivity.

Nowadays, humanity faces a complex set of global challenges, driven in large part by the increase in the world's population. This population surge translates into higher food and energy requirements [1]. Solutions to alleviate these pressing needs should be found without compromising the Earth's sustainability. Within this framework, agriculture, as a fundamental cornerstone of human existence, ought to play a pivotal role in alleviating the repercussions of these challenges. Hence, there is the necessity to promote a transition in the agricultural production paradigm towards a more energy-efficient and fully sustainable model. This shift aims to transform agriculture from being solely an energy consumer to becoming a simultaneous provider of food and energy.

Concerning solar photovoltaic (PV) systems, it is widely known the need for large areas of land for installing the required capacity to meet the sustainability targets of the different countries. In addition, as currently PV energy generation is more profitable and less volatile than crop production, this is leading into farmers preferring to give this use instead of agriculture for their lands, eliminating much or even all of the land used for cultivation.

The integration of PV systems in agriculture, known as agrivoltaics (APV), addresses these challenges by combining food production with solar power generation on the same land [2] while prioritizing production in agriculture. By installing solar panels over agricultural fields, available space can be efficiently utilized without compromising food production. This is especially relevant in areas where agricultural land is scarce or expensive, as it allows maximizing the economic and environmental performance of each plot.

Furthermore, APV can offer additional benefits to agriculture by providing a range of ecosystem synergies. For example, the shade provided by solar panels can help to reduce heat stress on crops and decrease water evaporation from the soil, which can be especially beneficial in areas with hot, dry climates [3], [4]. In addition, the presence of solar panels can provide shelter for wildlife, promoting biodiversity in agricultural areas.

Other studies have been conducted experimentally to prove that APV can be considered as a viable solution to meet growing energy and food demands [5].

This integrative application of PV should involve various fields of study, such as engineering, electronics, biology or chemistry, as a combination of the different approaches required to obtain conclusive results from very different areas and point of views.

The aim of this study is to analyse the impact of different PV materials with different levels of transparency placed over the crops, integrated onto greenhouse covers, to study the effects in their growth. This analysis has to consider the light requirements of the plants in their different phenological stages to optimize the pattern distribution of the PV modules [6].

With this objective in mind, this work seeks to bring research closer to students and future professionals and to promote interest in photovoltaic solar energy and specifically in one of the applications that is currently concentrating a large attention.

In this particular way, this project is a detailed breakdown of the teaching block, which is planned to be implemented in the Master's Degree in Renewable Energies and in the Master's Degree in Photovoltaic Systems Engineering.

Taking this in mind, first, a detailed description of the manufacturing process of the several greenhouse prototypes based on different PV technologies is provided, as well as the monitoring system used to collect the necessary data to be provided to the students. Next, the measurements that the students must carry out during the practical sessions are detailed. Finally, it explains how to analyse the collected data based on the different fields of application, such as photovoltaics, biology, and climatic conditions.

II. Methodology

This project is approached as a teaching block, which consists of the development from the beginning of an experimental system where the performance of different semitransparent PV technologies is analysed and how they affect the development of certain crop species. In this way, both the creation of the system and the development of the corresponding measurements in the different fields to be studied are contemplated. Being multidisciplinary in nature, the collaboration of the different areas of study is sought, so that students from engineering, biology or agriculture could analyse the process and the results from each area to obtain common conclusions about the optimal photovoltaic technology solution for each of the evaluated crop species.

In order to do this, a prototype of a miniature greenhouse has been designed. The selected technology for the prototypes were a-Si (see Fig 1. (a)) and Cadmium Telluride (CdTe) (see Fig 1. (b)), with different levels of transparency (20% and 50% respectively), to analyse how it influences crop development (see Fig 2. (c)). This prototype facilitates the students' approach to experimentation with APV systems using different PV technologies.

The structure of these prototypes was built using aluminum profiles and white opaque methacrylate sheets. The semi-transparent photovoltaic module under study is placed as the roof cover. This way, the only solar radiation that reach the crop inside the prototype is through the PV module so we can analyse the direct effect of the shading on the development of the plant.

In addition to the prototypes described above, another prototype is being developed in whose roof, instead of a photovoltaic module, a transparent methacrylate sheet is incorporated to serve as a control system.

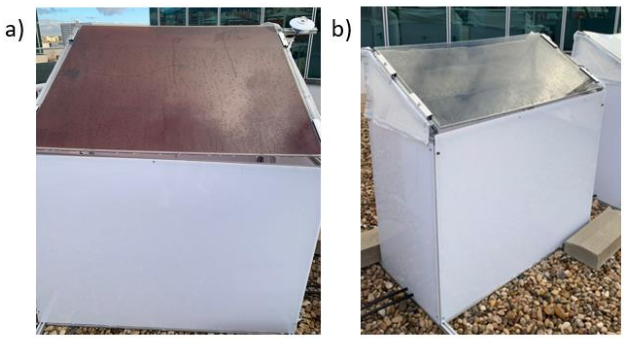


Fig. 1. (a) mini greenhouse prototipe with a-Si technology, (b) mini greenhose prototipe with CdTe technology

A monitoring system has been implemented in the prototypes to collect environmental data as well as data from the substrate where the different studied crops are planted.

Different environmental parameters (temperature, humidity and CO2) and soil parameters (temperature, humidity, electrical conductivity and pH) will be monitored, as well as periodic measurements of size, chlorophyll concentration and photosynthetic response, as shown in Fig 2 (d). To develop the monitoring system, a series of specialized sensors will be used to obtain data for each of the measured parameters. All of them will be connected through a RS485 to Ethernet Converter in order to process the data obtained through the use of *Labview 2021 SP1* software. In this way, the design of the data acquisition system will be carried out by the students. On the other hand, measurements of solar irradiance and generated PV energy will also be recorded with the SFV's own measuring equipment

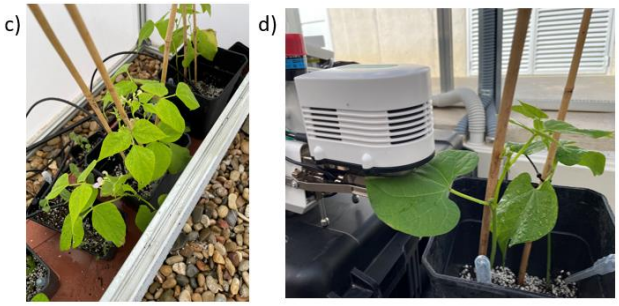


Fig. 2. (c) crops inside of prototypes, (d) measurement of photosynthetic response

A. PV materials

For this purpose, different semitransparent PV modules with various transparency levels are selected to allow the solar radiation fraction that plants use for photosynthesis to pass through. This part of the radiation, usually with wavelengths between 400 nm and 700 nm, is known as Photosynthetically Active Radiation (PAR).

Using a spectrophotometer, the transmittance profile of the modules is measured. In this way it is possible to see what percentage of the solar spectrum the module under study allows to pass through for each of the wavelengths.
The technologies selected for the first experimental cycles have been a semitransparent Cadmium Telluride (CdTe)

module with a transparency index of 50% and an amorphous silicon (a-Si) module with a transparency index of 20%.

Additionally, the I-V curves of the modules are measured using a manual curve plotter, *E-1000* from *Entec Solar*, in order to obtain their real performance and efficiency. Power and energy characterization are also carried out to determine the energy generated by the PV modules studied.

Through the use of these tools, students learn not only how to obtain data, but also how a photovoltaic module behaves from an electronic point of view. Studying its operation when plotting different I-V curves and the difference between the different technologies.

B. Crop analysis

The development of different crops under study is studied in order to analyse their evolution when using different PV technologies.

Crops are selected based on their family and their CO2 assimilation rate. In order to have a wide range of specimens with different rate of CO2 assimilation, to study whether the effect of shading caused by any of the different semitransparent technologies selected have a greater impact on specimens depending on their level of saturation.

For this purpose, and given the physical limitations of this work, different growing cycles with an approximate duration of 28 days each were carried out, where different types of plants are selected for each one of them. The first crop cycle, is carried out with green beans (Phaseolus vulgaris L), while for the second cycle, tomato (Solanum lycopersicum) and lettuce (Lactuca sativa) are both selected at the same time, since they present very different levels of tolerance to shading.

For the first crop cycle, corresponding to green beans (Phaseolus vulgaris), the number of specimens to be incorporated in each of the prototypes is 6, with 2 specimens per pot, making a total of 18 specimens.

For the second cycle, corresponding to tomatoes and lettuce, 6 specimens of each are placed in each prototype at the same time.

In order to appreciate the effects of each of the PV technologies on the selected crops, a series of periodic measurements are carried out on them, studying their evolution in 3 early stages and with a step of 14 days.

To make the experiment as representative as possible, it is carried out from the germination process. This process is developed in germination and cultivation chambers, under optimal conditions of development and they remain there for 14 days, until the plants reach a considerable size and vitality to be able to proceed to transplant them. In this way, it is possible to control that both the seed and the substrate, which are previously sterilized, are free of possible impurities and pathogenic agents such as fungi or harmful bacteria. It is also guaranteed that, from the moment the plants are transplanted, they only receive the radiation that is the object of study in each of the mini-greenhouse prototypes.

The measurements taken every 14 days are:

- Physiological: stem length, number of leaves, average leaf size, number of internodes, internode distance.
- Chlorophyll concentration, using an Apogee MC-100 meter, which is a device that directly and non-destructively measures the chlorophyll content in the leaves. It has an internal datalogger and includes accessories to reduce the measurement area.
- Photosynthetic capacity, by using a photosynthetic analyser, LI-6800 from Li-Cor. The equipment measures CO_2 input and water vapor release by the leaf with a high precision IRGA analyser. It calculates net CO_2 assimilation and transpiration; as well as stomatal conductance, intercellular CO2 concentration by measuring leaf temperature. With an attached fluorimeter, the equipment simultaneously quantifies fluorescence yield and gas exchange in the same leaf area.

Finally, once the cycle is finished, the aerial part is separated from the roots of each specimen and the fresh mass of both is weighed. Once measured, the specimens are placed in an oven and the amount of dry mass is measured again separately to see the growth of both parts. This being a destructive measurement can only be carried out at the end of the process and only once.

C. Microclimate analysis

The study is carried out on the environmental effects of each of the technologies selected for this work. For this purpose, different data are collected from the sensors placed in each of the prototypes and which measure the environmental and substrate conditions.

This system is the same for the different prototypes and consists of:

- An ambient temperature, relative humidity and CO2 concentration sensor.
- A Photosynthetically Active Radiation (PAR) sensor.
- A pyranometer.
- A sensor on the soil for temperature, humidity, pH and electrical conductivity.

In this way, it is possible to identify the difference in temperature between the different prototypes and conclude a greater or lesser need for water between one and the other, which is a key point in the incorporation of PV technology in agriculture.

III. Preliminary Results

Although the experiment is still at an early stage, since the first cycle ended in January 2024 and the second cycle is still under development, it has been possible to extract the first

results corresponding to the first crop cycle with green beans (Phaseolus vulgaris L).

A. PV Results

After analyzing the spectral response of each module under study, the proportion of visible and ultraviolet solar spectrum that each of them allows to pass through (see Fig 3), as well as the analysis of different bands of special interest for plant growth such as PAR (see Fig 4 (b)).

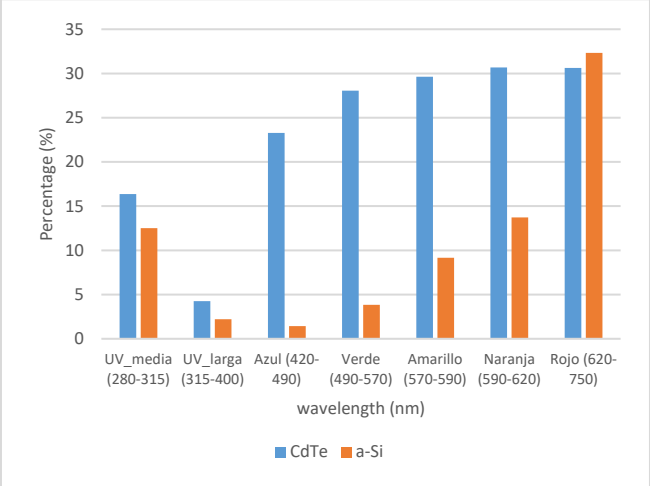


Fig. 3. Percentage of the visible and UV spectrum for each prototype compared to the reference solar spectrum measured in the control prototype

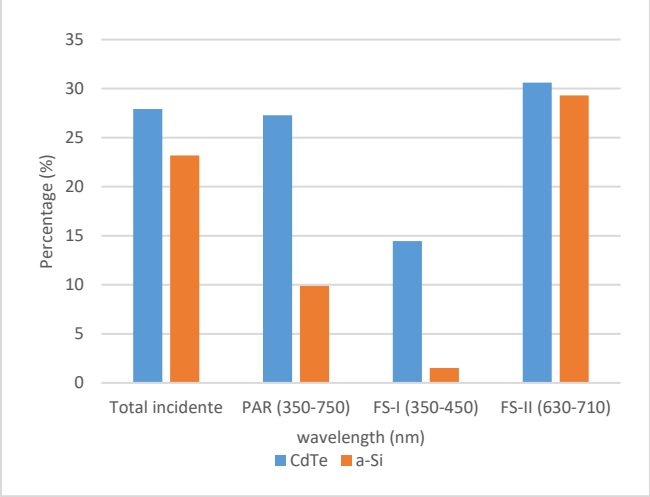


Fig. 4. APV ranges of interest for each prototype compared to the reference solar spectrum measured in the control prototype

B. Crop results

The photosynthetic capacity of the specimens in each of the prototypes is analysed for the first crop cycle, where it can be seen that, for the bean, the PV technology with the highest levels of electron transfer ratio, a process directly linked to photosynthetic capacity, is the CdTe module (see Fig 5).

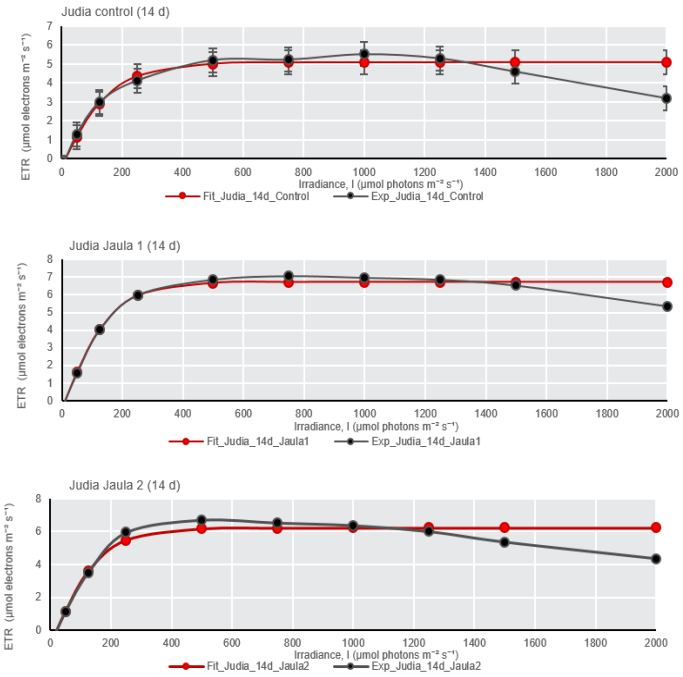


Fig. 5. Photosynthesis capacity measured on day 14 for the different prototypes

Regarding the physiological results, the prototype that obtained the highest fresh mass results was the one corresponding to the amorphous silicon technology, a-Si, as shown in Table 1.

Table 1. Prototype comparison of fresh mass

Prototype comparison	**Fresh mass (%)**		
	Average roots	***average aerial portion***	***average total***
CdTe vs Control	0,36%	6,14%	4,35%
a-Si vs Control	35,28%	5,67%	14,85%
a-Si vs CdTe	34,79%	-0,44%	10,07%

C. Microclimate results

The radiation obtained for the PAR fringe throughout the first growing cycle obtained in each of the prototypes is studied and compared with the radiation obtained by the pyranometer as shown in Fig 6.

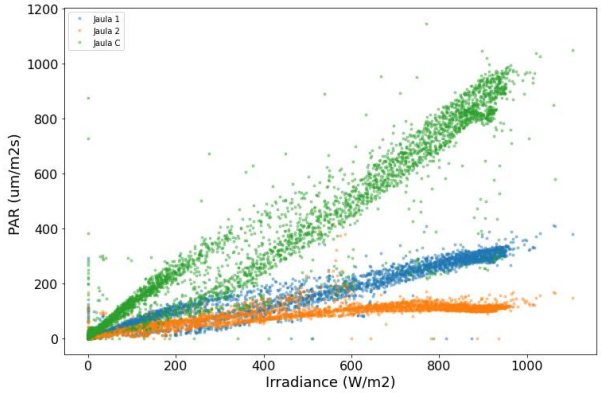


Fig. 6. PAR vs Irradiance comparison for the different prototypes

Compiling the temperature data of each of the prototypes throughout the first growing cycle, we obtained an average temperature reduction of the prototype with amorphous silicon technology with respect to the control prototype of about 5%, this difference being less than 1% for the prototype with cadmium telluride technology.

IV. Conclusions

Certainly, it is a challenge to face a photovoltaic application such as agrivoltaics due to the need to combine knowledge from such different areas as industrial engineering and biology.

The creation of this educational block will allow an approach to the most appropriate selection of photovoltaic technology for each of the crops studied according to their biological parameters and the environment in which they are located.

By carrying out this work, students are approached about how to carry out possible lines of research within the field of photovoltaics, and guidelines are given to collaborate between different areas of knowledge in order to reach common conclusions.

The fact that they can collaborate and provide feedback, allows a multidisciplinary output profile rich in knowledge and with the ability to apply resolutions through transversal thinking with greater skill.

With regard to the results obtained, it is reasonable that a greater amount of fresh mass was obtained in the prototype whose cover included an amorphous silicon technology module, with a transparency index of 20%, since this is the most opaque of all and it is known that a natural reaction of plants to the lack of light is to increase the size of their leaves to increase the surface area that captures radiation and to be able to carry out the photosynthesis process without any problem.

Regarding the results of photosynthetic capacity, the prototypes with photovoltaic technology show better results than the control, this may be due to a significant reduction in UV radiation, harmful to the development of plants, without reaching insufficient levels of radiation in the PAR band to carry out the photosynthesis process correctly. Although it is worth mentioning that these are initial conclusions since this work is still in an initial phase and more iterations must be carried out to obtain conclusive results.

References

[1] S. Amaducci, X. Yin, and M. Colauzzi, "Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production," *Appl Energy*, vol. 220, pp. 545–561, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.03.081.

[2] M. Trommsdorff, I. S. Dhal, Ö. E. Özdemir, D. Ketzer, N. Weinberger, and C. Rösch, "Agrivoltaics: solar power generation and food production," *Solar Energy Advancements in Agriculture and Food Production Systems*, pp. 159–210, Jan. 2022, doi: 10.1016/B978-0-323-89866-9.00012-2.

[3] C. Dupraz, H. Marrou, G. Talbot, L. Dufour, A. Nogier, and Y. Ferard, "Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes," *Renew Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 2725–2732, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.renene.2011.03.005.

[4] Á. Fernández-Solas, A. M. Fernández-Ocaña, F. Almonacid, and E. F. Fernández, "Potential of agrivoltaics systems into olive groves in the Mediterranean region," *Appl Energy*, vol. 352, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121988.

[5] M. V. Martínez, L. M. F. de Ahumada, M. F. García, P. F. García, F. C. de la Torre, and R. López-Luque, "Characterization of an experimental agrivoltaic installation located in a educational centre for farmers in Cordoba (Spain).," *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 20, pp. 111–115, Sep. 2022, doi: 10.24084/repqj20.236.

[6] E. F. Fernández *et al.*, "Global energy assessment of the potential of photovoltaics for greenhouse farming," *Appl Energy*, vol. 309, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118474.

Modelado de componentes magnéticos en convertidores con aislamiento

F. Javier Díaz
Departamento de Tecnología Electrónica, Ingeniería de Sistemas y Automática (TEISA)
Universidad de Cantabria
Santander, España
diazrf@unican.es

Francisco J. Azcondo
Departamento de Tecnología Electrónica, Ingeniería de Sistemas y Automática (TEISA)
Universidad de Cantabria
Santander, España
azcondof@unican.es

Christian Brañas
Departamento de Tecnología Electrónica, Ingeniería de Sistemas y Automática (TEISA)
Universidad de Cantabria
Santander, España
branasc@unican.es

Alberto Pigazo
Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica
Universidad de Cantabria
Santander, España
pigazoa@unican.es

Rosario Casanueva
Departamento de Tecnología Electrónica, Ingeniería de Sistemas y Automática (TEISA)
Universidad de Cantabria
Santander, España
casanuer@unican.es

Paula Lamo
Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología
Universidad Internacional de la Rioja
Logroño, España
paula.lamo@unir.net

***Abstract*—Se presenta el método docente utilizado para el análisis y modelado de componentes magnéticos en dos asignaturas de módulos de especialización de grado. Dentro del tema dedicado a convertidores dc – dc se motiva la necesidad de incluir aislamiento en muchas aplicaciones. Para la realización de un diseño práctico de una etapa de potencia con aislamiento, es importante identificar el efecto de la inductancia de dispersión del componente magnético sobre el funcionamiento del convertidor y calcular su valor. En este trabajo, se presenta el modelado de componentes magnéticos mediante la analogía con los circuitos eléctricos, facilitando el cálculo de la inductancia de dispersión. Posteriormente se utiliza el software FEMM (Finite Element Method Magnetics) para verificar el cálculo de la inductancia de dispersión aproximado mediante el modelado del circuito magnético. Se ilustra el trabajo con un ejemplo práctico de caracterización de un transformador para un convertidor aplicado a la carga de baterías.**

Keywords— Componentes magnéticos, inductancia de dispersión, modelado, convertidores, aislamiento

I. INTRODUCCIÓN

El contenido de las asignaturas para alumnos de especialización en Electrónica de Potencia permite ir más allá de la presentación del funcionamiento básico de convertidores y los fundamentos del diseño de componentes magnéticos. En este caso se aborda el efecto de los elementos parásitos de los mismos. Calcular adecuadamente la inductancia de dispersión en bobinas acopladas y transformadores, mediante ecuaciones diferenciales de Maxwell, aplicadas a la geometría y materiales de los componentes magnéticos resulta arduo para los estudiantes. La aproximación de circuito magnético, obteniendo reluctancias o permeancias a partir de la geometría del componente, para modelar elementos de almacenamiento de energía, permite realizar una aproximación suficiente que puede complementarse con la verificación mediante programas de análisis por elementos finitos, como FEMM [1], con los que extraer los elementos del componente magnético a partir de sus características físicas y realizar un modelo simulable, sin necesidad de trabajar con sus ecuaciones diferenciales [2]-[4]. Este tipo de simulaciones, desde un punto de vista eléctrico y magnético, es coherente con los modelos eléctricos y magnéticos que presenta PLECS [5].

Este trabajo está financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España y la Comisión Europea en el marco del proyecto de investigación PID2021-128941OB-I00 "Transformación Energética Eficiente en Entornos Industriales" y el proyecto 2023-TCN-008 UEATI con fondos del Gobierno Regional de Cantabria y la UE.

En este trabajo, se presenta el método de modelado de componentes magnéticos empleado en asignaturas de especialización de Electrónica de Potencia. Como ejemplo de aplicación se obtiene, y se incluye en el modelo, la inductancia de dispersión de un transformador como el de Fig. 1, utilizado en un rectificador doblador de corriente aplicado en un cargador de baterías.

En el apartado II, se describe el método de enseñanza empleado. A continuación, en el apartado III, se presenta la herramienta de elementos infinitos FEMM. En el apartado IV, se emplea un ejemplo de utilización del método, y se finaliza el artículo con algunas conclusiones.

II. DESCRIPCIÓN DEL METODO DE ENSEÑANZA

Una parte importante de los convertidores electrónicos de potencia son sus componentes magnéticos (inductancias y transformadores) y, por tanto, aprender a diseñarlos, debe formar parte en asignaturas de especialización como: Conversión Electrónica de Potencia, dentro del Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales, y Further Power Electronics, dentro del Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática, que se imparten en la E.T.S. de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación de la Universidad de Cantabria [6]-[7].

Los cursos se inician con una revisión de conceptos básicos relativos al electromagnetismo, haciendo un recordatorio sobre la teoría de los campos electromagnéticos y las leyes fundamentales que relacionan las variables eléctricas y magnéticas. A partir de aquí, se describen los pasos para construir bobinas y transformadores siguiendo el método k_g y k_{gfe} en [5]. A continuación, se motiva a los estudiantes en la necesidad de utilizar aislamiento en los convertidores electrónicos de potencia.

Posteriormente, se modelan los dispositivos magnéticos, con el propósito de aproximar los resultados obtenidos en la simulación de convertidores a los que se deben de obtener en los circuitos reales. En este sentido, el cálculo de elementos parásitos, como las inductancias de dispersión, es necesario.

Las inductancias de dispersión en bobinas acopladas y transformadores producen, entre otros efectos, una sobretensión que debe de considerarse en la selección de los dispositivos del convertidor, ya que tendrán que soportar

mayores niveles de tensión que los previstos en el diseño ideal. Además, la aparición de estas inductancias parásitas dificultará el diseño de los reguladores.

Para evaluar el efecto que tienen las inductancias de dispersión, los programas de simulación son una herramienta de gran utilidad [3][8]. Permiten previsualizar el comportamiento que tendrán el circuito real, y así seleccionar el resto de dispositivos del convertidor de un modo más óptimo.

La inductancia de dispersión resulta del acoplamiento magnético imperfecto del flujo magnético de un devanado sobre otro. Así, cualquier flujo magnético que no enlace el devanado primario con el secundario actúa como impedancia inductiva en serie, por lo que esta "inductancia de dispersión" se muestra en un diagrama esquemático como una inductancia adicional, tal como se muestra en las figuras 1 y 2. En la primera de ellas, se muestran los flujos de dispersión del primario y secundario que producen, respectivamente, las inductancias de dispersión $L_{\sigma 1}$ y $L_{\sigma 2}$, tal como se muestran en modelo de Fig. 2.

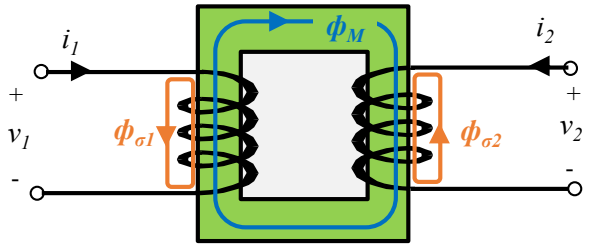


Fig. 1 Flujo magnético por el núcleo y de dispersión en los devanados.

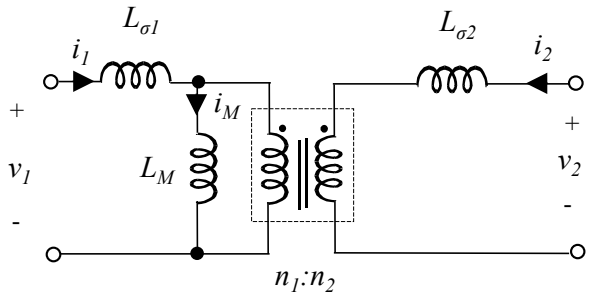


Fig. 2 Modelo de transformador incluyendo las inductancias de dispersión.

A. *Analogía entre circuito magnético y eléctrico*

Basándose en la analogía existente entre los circuitos magnéticos y eléctricos, se puede modelar un elemento magnético como si fuese un circuito eléctrico y simularlo. Así, la corriente que circula por un circuito eléctrico, I, se corresponde al flujo del campo magnético, ϕ, en una trayectoria cerrada y la caída tensión, V, encuentra correspondencia con la fuerza magnetomotriz (FMM), F. En la Tabla I se resumen las principales analogías entre los dos circuitos.

TABLA I. Analogía circuito magnético y eléctrico.

Valor Eléctrico	Equivalencia Magnética
Tensión (V)	FMM (F)= Ni
Corriente (I)	Flujo (ϕ)
Densidad de Corriente (J)	Densidad de Flujo (B)
Resistencia (R) =$\frac{l}{\sigma A}$	Reluctancia (ℜ)= $\frac{l}{\mu A}$
Ley de Ohm $V = IR$	Ley magnética de Ohm $F = \phi\Re$
LTK (ley de tensiones de Kirchhoff): La suma de tensiones en un circuito cerrado es cero	LKT magnética: la suma de FMM en un circuito cerrado es cero
LCK(Ley de corrientes de Kirchhoff): La suma de todas las corrientes en un nodo es cero	LCK magnética: La suma de todos los flujos en un nodo es cero

Empleando estas analogías, se puede partir de un elemento magnético como el que se muestra en Fig. 3a, y así obtener un modelo eléctrico basado en reluctancias, como el que aparece en Fig. 3b. Esta inductancia se alimenta con una tensión v_g, y presenta una bobina de N vueltas por el que circula una corriente i, que genera un flujo ϕ por el núcleo magnético. Además, tiene un entrehierro g.

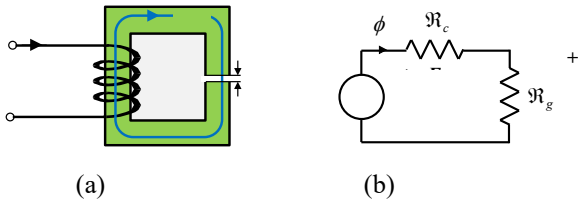


Fig. 3 a) elemento magnético, y b) su modelo mediante reluctancias.

Se modela la inductancia como un circuito en el que la fuente de alimentación equivale a la FMM, F, que alimenta la reluctancia del núcleo, $\Re_c$, y la del entrehierro, $\Re_g$, definidas por (1) y (2), respectivamente. Por tanto, el flujo que circula por el núcleo y entrehierro, viene definido por (3). A partir del circuito análogo, F se puede expresar como en (4), siendo $\Re$ la suma de las reluctancias, que tendrá un valor cercano a $\Re_g$. En valor de la inductancia L, relaciona el flujo que circula por el núcleo magnético con la corriente que lo induce, como aparece en (5).

$$\Re_c = \frac{l_c}{\mu_c A} \quad (1)$$

$$\Re_g = \frac{l_g}{\mu_g A} \quad (2)$$

$$\phi = \frac{Ni}{\Re_c + \Re_g} \quad (3)$$

$$F = \phi\Re \quad (4)$$

$$L = \frac{N\Phi}{i} \quad (5)$$

En un circuito eléctrico, las resistencias disipan energía, mientras en el circuito magnético, las inductancias almacenan energía. La potencia en un circuito eléctrico es $p = vi$. En el circuito magnético encuentra correspondencia en (6).

La energía, E, del circuito magnético se obtiene operando (7), para obtener (8). De esta ecuación se deduce, como la energía almacenada en L se ve reflejada en el circuito análogo a través de la reluctancia. En (9) se deduce que E es la mitad de F·ϕ.

$$p = N\frac{d\phi}{dt}\frac{F}{N} = F\frac{d\phi}{dt} \quad (6)$$

$$E = \int p\,dt \quad (7)$$

$$E = \frac{1}{2}\Re\phi^2 = \frac{1}{2}Li^2 \quad (8)$$

$$F \cdot \phi = 2E \quad (9)$$

En un circuito magnético, se cumple que $\Re_g \gg \Re_c$, por lo que $E_g = \frac{1}{2}\Re_g\phi^2 \gg E_c = \frac{1}{2}\Re_c\phi^2$.

B. Calculo de inductancia de dispersión por modelo

La inductancia de dispersión, L_σ, se calcula a partir de la energía de dispersión, E_σ. El flujo de dispersión,Φ_σ, aparece en paralelo con el principal, y su reluctancia,$\Re_\sigma$, se representa en el circuito análogo tal como se muestra en Fig. 4.

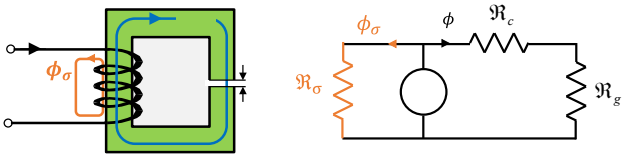


Fig. 4 Modelo con flujo y reluctancia de dispersión.

En el caso de tener múltiples devanados [8], el circuito quedaría como el de Fig. 5.

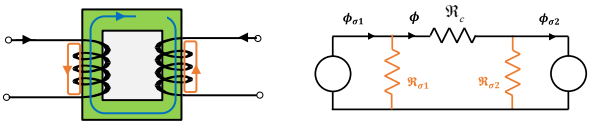
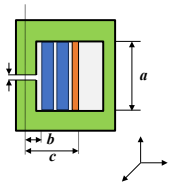


Fig. 5 Modelo con múltiples devanados.

En Fig. 6 se muestra un ejemplo de un elemento magnético con 2 devanados [2] y el cálculo de su inductancia de dispersión mediante ecuaciones. El primero de los devanados tiene 2 capas, y el segundo sólo 1. Calcular el valor de su inductancia de dispersión resolviendo las ecuaciones diferenciales es complejo.



$$E_\sigma = \int v_\sigma i_1 \cdot dt = \int L_\sigma \frac{di_1}{dt} i_1 \cdot dt = L_\sigma \int i_1 \cdot di = \frac{1}{2}L_\sigma i_1^2$$

$$E_\sigma = \int v_\sigma i_1 dt = \int \left[\frac{\partial}{\partial t}\left(\iint B_y(x,t)dxdz\right)\cdot \iint J_z(x,y)dxdy\right]dt$$

$$E_\sigma = \int v_\sigma i_1 dt = \int \left[\frac{\partial}{\partial t}\left(\iint B_y(x,t)dxdz\right)\cdot \iint \frac{dH_y}{dx}dxdy\right]dt$$

$$E_\sigma = \mu_o \iiint \left(\int H_y(x,t)\cdot dH_y(x,t)\right)\cdot dxdydz$$

$$E_\sigma = \mu_o \int_V \left(\frac{1}{2}H_y^2(x,t)\right)dV$$

$$E_\sigma = \frac{1}{2}(MLT)a\mu_o \int H_y^2(x,t)\cdot dx$$

Fig. 6 Elemento magnético con 2 devanados y cálculo de inductancia de dispersión.

Sin embargo, los devanados del ejemplo anterior se pueden modelar con el circuito análogo de reluctancias, obteniendo el esquema de Fig. 7. Cada una de las capas del devanado genera un flujo de dispersión ϕ_x, descrito por la FEM que lo genera y su reluctancia $\Re_x$.

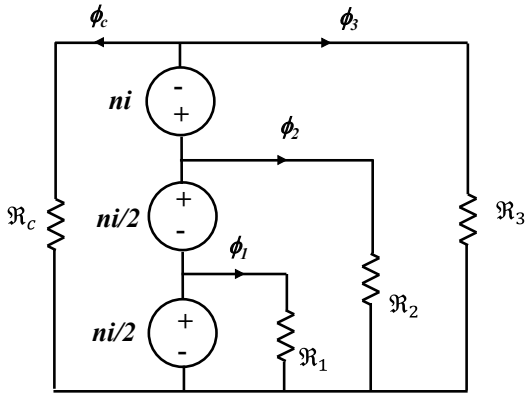


Fig. 7 Modelo análogo de los devanados.

De la resolución del esquema de Fig. 7, se aproxima $\phi_c = \phi_3 = 0$. Las reluctancias de los devanados dependen de *MLT* (mean-length-per-turn), de la anchura del devanado, *x*, y de la longitud del devanado, *a*, tal como se refleja en (10). A partir del circuito equivalente, se puede calcular la inductancia de dispersión aplicando (9) al flujo de dispersión como (11), obteniendo (12) y resolviendo en (13).

$$\Re_1 = \Re_2 = \Re_3 \cong \frac{a}{\mu_o MLTx} \quad (10)$$

$$\sum F\phi_x = 2E_\sigma = L_\sigma i^2 \quad (11)$$

$$2E_\sigma = \frac{5}{4}\frac{(ni)^2}{\Re_1} = L_\sigma i^2 \quad (12)$$

$$L_\sigma = \frac{5n^2}{4}\frac{\mu_o MLTx}{a} \quad (13)$$

III. FEMM (Finite Element Method Magnetics)

Utilizando herramientas de análisis por elementos finitos con los que poder modelar físicamente el componente magnético, como FEMM [1], [10]-[11], permiten resolver el problema de forma aproximada, simplificando el proceso de resolución.

En la figura Fig. 8 se muestra el entorno de trabajo de FEMM. Esta herramienta permite realizar modelos en 2 dimensiones (2D) por el método de elementos finitos (FEM, Finite Element Method). En este tipo de modelo se trabaja con una vista trasversal del elemento magnético que se modela, y se asume que representa el resto del volumen. En este caso, FEMM permite realizar una aproximación 2D planar o asimétrica.

En la ventana que se muestra en Fig. 9.a, se configura el tipo de análisis que se va a realizar, es decir, se define el tipo de problema a resolver, las unidades métricas, frecuencia, etc. A continuación, se introduce la estructura física del núcleo magnético, quedando establecido el tamaño del núcleo magnético y de los devanados, así como el entrehierro, que marcarán las características del dispositivo magnético.

Posteriormente, se definen los materiales de cada una de las partes del elemento magnético, como: tipo de núcleo, devanados, entrehierro, partes de aire, etc. Para configurarlos, se emplea la ventana que aparece en Fig. 9.b. A continuación, se definen los límites de simulación, tal como se muestra en Fig. 10, y se simula para obtener los resultados gráficos y matemáticos, tal como se muestra en Fig. 10.b. La herramienta permite tomar medidas en diferentes partes del elemento, así

como realizar operaciones y obtener gráficos En la Fig. 11 se incluyen los menús con los diferentes tipos de operaciones y resultados que se pueden obtener, tanto de medidas numéricas como gráficas.

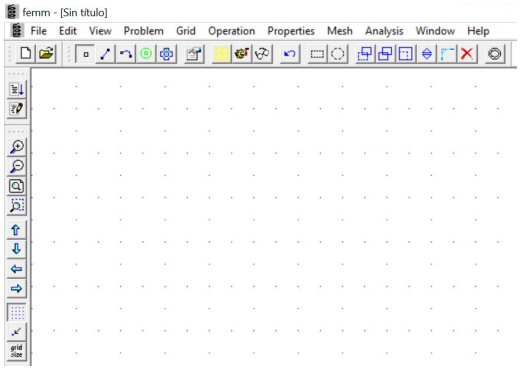
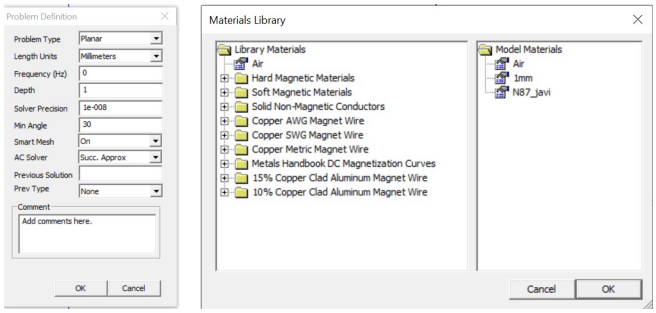
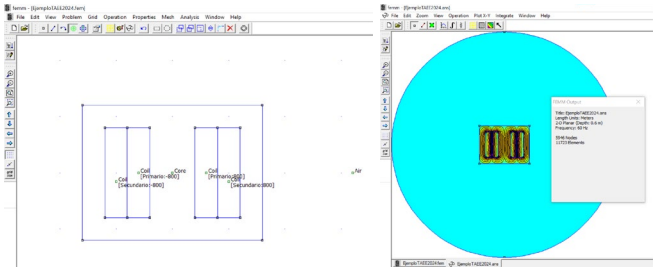


Fig. 8 Entorno de trabajo de FEMM.



a) b)

Fig. 9 Ventanas de configuración de FEMM. En a) definición del problema, y en b) configuración de los materiales.



a) b)

Fig. 10 Ventanas de FEMM. En a) estructura del núcleo magnético y en b) configuración de límites de simulación y resultados de la simulación.

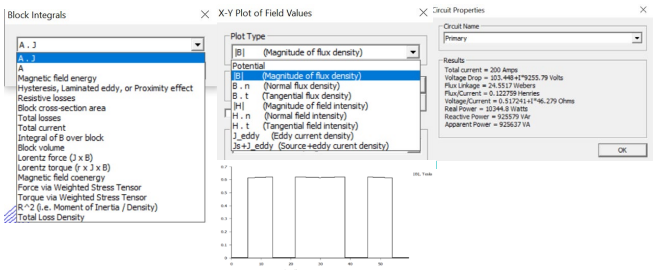


Fig. 11 Menús de toma de medidas y operaciones de FEMM junto con resultados gráficos.

IV. EJEMPLO DE APLICACION

Como ejemplo de aplicación se calcula y modela la inductancia de dispersión de un transformador como el de Fig. 12, utilizado en un rectificador doblador de corriente aplicado en la carga de baterías [12].

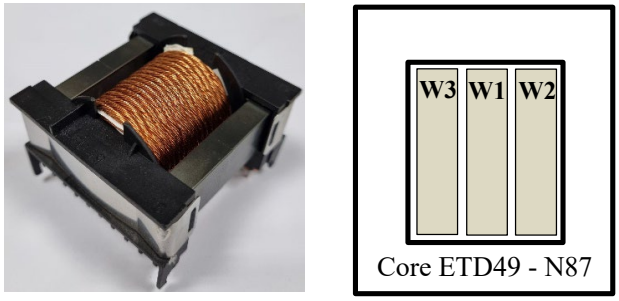


Fig. 12 Transformador utilizado como ejemplo

El transformador se ha construido con un núcleo ETD49 de material N87. Todos los devanados constan de 16 vueltas de 42 hilos trenzados AWG 32. El primario, W1, se coloca en el medio, entre los secundarios, W2 y W3. El transformador de tres devanados se modela utilizando el modelo orden reducido [9] que se muestra en la Fig. 13.

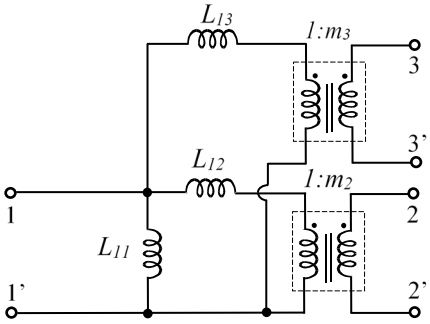


Fig. 13 Modelo de orden reducido del transformador de tres devanados.

Para extraer los parámetros del modelo de orden reducido, se aplican las pruebas de circuito abierto y cortocircuito [6] en los devanados 1-1', 2-2' y 3-3'. Se obtienen seis inductancias, resumidas en la Tabla II, donde L_{xo} es la inductancia vista desde el devanado x-x' con los demás abiertos y L_{xk} es la inductancia medida desde el devanado x-x' con los demás cortocircuitados.

TABLA II. INDUCTANCIAS DE CIRCUITO ABIERTO Y CORTOCIRCUITO

L_{xo}	L_{xk}
$L_{1o} = L_{11}$	$L_{1k} = L_{11}\|\|L_{12}\|\|L_{13}$
$L_{2o} = (m_2)^2(L_{11} + L_{12})$	$L_{2k} = (m_2)^2 L_{12}$
$L_{3o} = (m_3)^2(L_{11} + L_{13})$	$L_{3k} = (m_3)^2 L_{13}$

El resultado de aplicar las pruebas de circuito abierto y cortocircuito se resume en la Tabla III.

TABLA III. INDUCTANCIAS DE CIRCUITO ABIERTO Y CORTOCIRCUITO MEDIDAS

L_{1o}	L_{1k}	L_{2o}	L_{2k}	L_{3o}	L_{3k}
770 µH	0,74 µH	771 µH	1,55 µH	868 µH	1,55 µH

Trabajando con la Tabla II, se obtienen las inductancias del modelo de orden reducido L_{11}, L_{12} y L_{13} así como las relaciones de transformación efectivas m_2 y m_3 en función de las inductancias medidas, L_{1o}, L_{1k}, L_{2o}, L_{2k}, L_{3o} y L_{3k}.

$$L_{11} = L_{1o} \tag{14}$$

$$L_{12} = \frac{L_{1o}L_{2k}}{L_{2o} - L_{2k}} \tag{15}$$

$$L_{13} = \frac{L_{1o}L_{3k}}{L_{3o} - L_{3k}} \tag{16}$$

$$m_2 = \sqrt{\frac{L_{2o}}{L_{1o}}\left(1 - \frac{L_{2k}}{L_{2o}}\right)} \tag{17}$$

$$m_3 = \sqrt{\frac{L_{3o}}{L_{1o}}\left(1 - \frac{L_{3k}}{L_{3o}}\right)} \tag{18}$$

Los parámetros del modelo en voladizo de orden reducido del transformador de tres devanados se resumen en la Tabla IV.

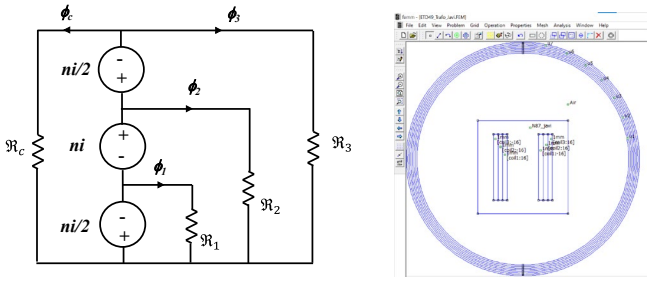
TABLA IV. PARÁMETROS DEL MODELO DEL TRANSFORMADOR

L_{11}	L_{12}	L_{13}	m_2	m_3
770 µH	1,55 µH	1,378 µH	0,9987	1,0607

El valor de L_{1k} se utilizó para verificar el modelo, mostrando una buena concordancia entre el valor medido y el teórico. Las relaciones de espiras efectivas m_2 y m_3 del transformador se pueden medir experimentalmente a partir de las relaciones de tensión del devanado en condiciones de circuito abierto [9]. Este resultado también coincide con los valores teóricos obtenido por el modelo.

Para el cálculo teórico de la inductancia de dispersión, L_σ, se modela el circuito magnético mediante reluctancias y se resuelve (8). En la Fig. 14.a se muestra el circuito que modela el flujo de dispersión de los tres devanados que tiene el elemento magnético empleado en este ejemplo. El cálculo de L_σ se realiza con (19), obtenida a partir de la resolución del circuito equivalente. En este caso los datos son: MLT = 127,65 mm, n = 16, a = 30 mm, x = 3,23 mm, $\mu_0 = 4\pi 10^{-10}$ H/mm. Así se obtiene que L_σ = 2,21 µH.

$$L_\sigma = \frac{n^2}{2}\frac{\mu_o MLT x}{a} \tag{19}$$

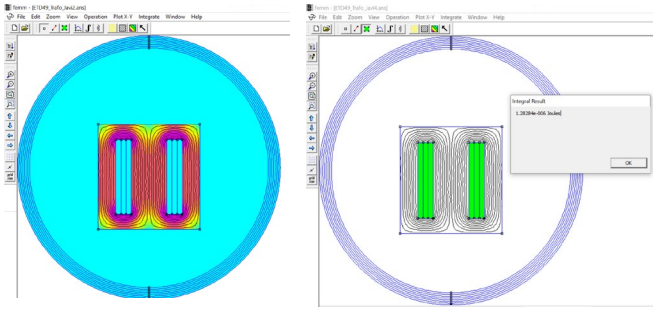


a) b)

Fig. 14 a) modelo de reluctancias de los devanados del transformador, y en b) descripción en FEMM del núcleo magnético ETD49 con material N87.

Para calcular L_σ mediante FEMM, se describe la geometría del núcleo magnético y de los devanados, como se muestra en Fig. 14.b. A continuación, se realiza la simulación y se calcula la energía en los devanados. En Fig. 15.a se muestran la densidad de flujo por el núcleo, y en Fig. 15.b la zona de devanados empleada para calcular la energía, E_σ. Introduciendo el valor de la energía en (20), para un valor de corriente i = 1 se obtienen las siguientes inductancias de dispersión por cada devanado: $L_{\sigma 1}$ = 0,625 µH, $L_{\sigma 2}$ = 1 µH y $L_{\sigma 3}$ = 1 µH, y una inductancia total L_σ = 2,6 µH. Estos valores difieren aproximadamente en 1,5 respecto de los valores reales [13].

$$2E_\sigma = L_\sigma i^2 \tag{20}$$



a) b)

Fig. 15 Resultados de FEMM para el transformador con núcleo ETD49 y material N87, en a) representación de líneas de flujo en el núcleo magnético, y b) zonas de cálculo de energía.

V. CONCLUSIONES

Se ha presentado el método docente utilizado para el análisis y modelado de componentes magnéticos en las asignaturas de especialización: Conversión Electrónica de Potencia, perteneciente al Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales, y Further Power Electronics, que pertenece al Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática, que se imparten en la E.T.S. de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación de la Universidad de Cantabria.

Se particulariza sobre el caso de cálculo de inductancias de dispersión en elementos magnéticos. En este sentido, el cálculo mediante aproximaciones a circuitos con reluctancias

o empleando herramientas de simulación de análisis por elementos finitos con los que poder modelar físicamente el componente magnético, como FEMM, es mejor valorado por los estudiantes que el cálculo mediante ecuaciones diferenciales.

Se finaliza el trabajo con la aplicación del método en la resolución de un caso práctico como es el cálculo de la inductancia de dispersión de un transformador utilizado en un rectificador doblador de corriente aplicado en la carga de baterías.

La caracterización de la inductancia de dispersión mediante el modelo que se obtiene de la estructura constructiva del componente magnético es más intuitiva que mediante la resolución matemática de la integral triple o doble del cuadrado del campo magnético. Esta aproximación es una herramienta docente eficaz y se ha contrastado mediante un simulador de elementos finitos resultando en una aproximación razonable.

REFERENCIAS

[1] https://www.femm.info/wiki/HomePage.

[2] J. M. Lopera, M. J. Prieto, J. Diaz, J. Garcia, "A Mathematical Expression to Determine Copper Losses in Switching-Mode Power Supplies Transformers Including Geometry and Frequency Effects," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 30, No. 4, April 2015, pp. 2219 – 2231.

[3] Christophe Basso, "Modeling The Effects of Leakage Inductance On Flyback Converters (Part 1): Converter Switching," How2Power Today. Nov. 2015, pp. 1-15.

[4] H. H. Cui, S. Dulal, S. B. Sohid, G. Gu and L. M. Tolbert, "Unveiling the Microworld Inside Magnetic Materials via Circuit Models," in IEEE Power Electronics Magazine, vol. 10, no. 3, pp. 14-22, Sept. 2023.

[5] Manual de utilización de PLECS actualizado el 2 de febrero de 2024. https://www.plexim.com/sites/default/files/plecsmanual.pdf.

[6] R. W. Erickson and D. Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics," 3rd Ed. Springer 2020.

[7] Baoxing Chen and Mark Cantrell, Analog Devices, Inc. "Galvanic Isolation for Power Supply Applications," APEC 2013 Seminar. March 2013.

[8] Christophe P. Basso, "Switch-mode Power Supplies. Spice Simulations and Practical Designs," New York, NY. Mc Graw Hill. 2008.

[9] R. W. Erickson and D. Maksimovic, "A multiple-winding magnetics model having directly measurable parameters," PESC 98 Record. 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (Cat. No.98CH36196), 1998, pp. 1472-1478 vol.2, doi: 10.1109/PESC.1998.703254.

[10] S. Zurek, FEM modelling and experimental validation of proximity loss, part 2, Transformers Magazine, Vol. 4 (1), 2017, pp. 102-108.

[11] Z. Ouyang, M. A. E. Andersen, "Overview of Planar Magnetic Technology—Fundamental Properties," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 29, No. 9 Sept. 2014, pp. 4888 – 4900.

[12] C. Branas, F. J. Azcondo, A. Pigazo, R. Casanueva, F. J. Díaz and P. Lamo, "Self-balanced Two-output Battery Charger," *2023 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Orlando, FL, USA, 2023, pp. 1902-1907.

[13] R. Schlesinger and J. Biela:"Comparison of Analytical Transformer Leakage Inductance Models : Accuracy vs. Computational Effort", Proc. of European Conf. on Power Electronics and Applications (EPE ECCE Europe), (2019).

DEMOSTRADORES 1 – SESIÓN DE DEMOSTRADORES

PCI para visualizar problemas de EMC en circuitos electrónicos digitales

Juan Pedro Peña Martín
Dept. Tecnología Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
https://orcid.org/0000-0002-3522-6726

Iván de Los Santos Díaz
Dept. Tecnología Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
ivan.delossantosdiaz@gmail.com

***Resumen*—En una asignatura avanzada de diseño digital, el alumnado debe conocer y saber cómo controlar y limitar los habituales problemas de compatibilidad electromagnética (EMC) que suelen presentarse al implementar los circuitos. Con esta placa de circuito impreso (PCI), buscamos reproducirlos en el laboratorio de prácticas de forma medible y asociable a lo visto en las clases de teoría. El circuito es altamente configurable para reproducir en cada momento solo el fenómeno que busquemos.**

***Index Terms*—EMC, línea de transmisión, diafonía capacitiva, diafonía inductiva, microstrip.**

I. Introducción

Por compatibilidad electromagnética (EMC) nos referimos concretamente a la emisión y la inmunidad de los circuitos ante fenómenos no deseados de naturaleza electromagnética (interferencias electromagnéticas, EMI) que pueden generar fallos funcionales. Su control requiere un diseño cuidadoso tanto de la PCI como del propio circuito [1]. Las grandes y rápidas variaciones de tensión (asociadas a campo eléctrico variable) o de corriente (asociadas a campo magnético variable), son el origen de muchos de esos problemas. Aunque como concepto, la EMC empezó a mencionarse en la década de 1980, los fenómenos eran ya conocidos y tenidos en cuenta en muchos diseños de alta velocidad y corriente. Para diseños con tecnologías lógicas acopladas por emisor (ECL), hay textos clásicos anteriores que analizan cómo mitigar algunos de esos fenómenos más tarde conocidos como EMC [2]. Pero la eclosión de la alta velocidad y alta integración en el diseño electrónico digital, ha forzado a estudiarlos en profundidad para todas las tecnologías. Así, en [3], [4] puede encontrarse todo un tratado sobre la problemática del diseño digital de alta velocidad, aplicable en la práctica a cualquier tecnología y mencionando ya los conceptos de EMC o EMI. Los fenómenos de EMC específicamente relacionados con la integridad y distribución del circuito de alimentación están bastante bien tratados en [5], [6], y una buena orientación al diseño de las placas de circuito impreso (PCI) puede encontrarse en [7].

El objetivo de este diseño de circuito digital sobre PCI, Fig. 1, es la reproducción por el alumnado en el laboratorio de prácticas de los problemas más usuales que suelen presentar los diseños digitales respecto a la EMC, particularmente cuando usan circuitos rápidos o con alta capacidad de corriente. Por limitación del formato de esta comunicación y para que sean distinguibles, los esquemas electrónicos correspondientes se presentan por partes a lo largo del documento. Mientras que la teoría electromagnética suena siempre lejana y algo mágica, nuestro objetivo es acercar al alumnado algunos fenómenos teóricos y que puedan generar y medir por ellos mismos.

El alumnado para el que van dirigidas estas prácticas está en segundo ciclo (3º o 4º) de grado en una ingeniería electrónica, y se le presupone ya suficientemente familiarizado con la electrónica digital y con el electromagnetismo a un nivel básico. Se trata de asignaturas de electrónica digital a un nivel avanzado, donde se estudian los fenómenos físicos que afectan a los circuitos digitales. El circuito es altamente configurable para poder seleccionar un problema cada vez y dispone, además de un subcircuito astable que proporciona una señal repetitiva, de dos *drivers* TTL seleccionables que reúnen las características deseadas: el 74S38 (colector abierto) y el 74F244 (triestado). El alumnado solo tiene que configurar cada prueba mediante *jumpers* y medir con el osciloscopio. Se ha buscado agrandar los efectos para que puedan visualizarse con un osciloscopio que no requiera altas prestaciones. Los fenómenos que pueden evaluar son:

1. Medida de impedancia característica de líneas de transmisión *microstrip* (Fig. 2) con distintas características (por el método del coeficiente de reflexión).
2. Diafonía capacitiva en líneas cercanas.
3. Diafonía inductiva en líneas cercanas (estas, no serán *microstrip* para agrandar el fenómeno, Fig. 3).
4. *Ground bouncing* con el 74F244 si conmutan a la vez 7 de las 8 puertas con corriente elevada.

Si bien no representan, en absoluto, la totalidad de fenómenos relacionados con la EMC que pueden encontrarse en un circuito de electrónica digital, sí que constituyen un grupo muy representativo de los fenómenos que aparecen más habitualmente.

II. Requisitos

II-A. Requisitos constructivos generales

El uso que se le va a dar a esta PCI por el alumnado en el laboratorio conlleva una serie de requisitos que nos hemos fijado para su diseño.

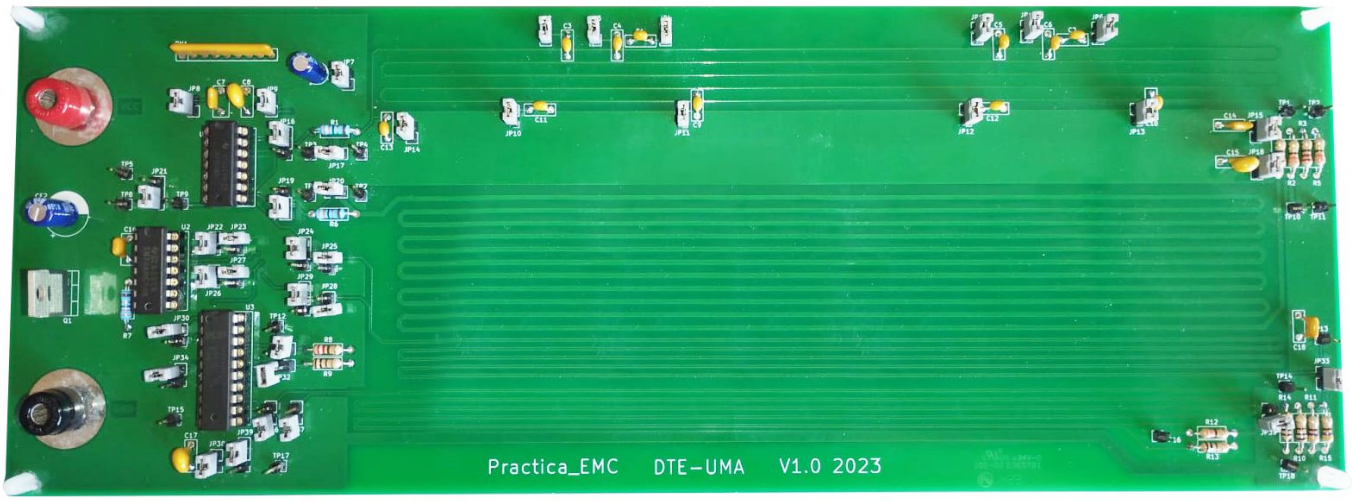


Figura 1. Fotografía de la PCI, cara de componentes.

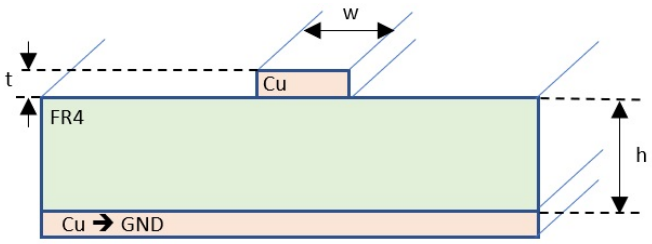


Figura 2. Parámetros constructivos de las líneas de transmisión *microstrip* utilizadas. Todas ellas tienen una longitud aproximada de 1 m.

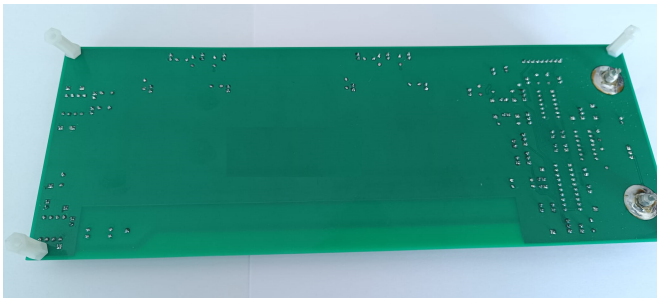


Figura 3. Fotografía de la PCI, cara de soldadura. En general corresponde a plano de masa excepto en la parte inferior usada para diafonía inductiva, donde las pistas no son microstrip y el retorno se ha alejado de la señal para forzar mayor inducción.

II-A1. Fenómenos observables en el laboratorio docente: Un puesto habitual está dotado con una fuente de alimentación, multímetro digital, generador de señal que no será necesario usar, aunque se contempla esa opción, y un osciloscopio digital con reducido ancho de banda (50 o 100 MHz). Obsérvese que muchos de los fenómenos que tratamos de identificar están asociados a los flancos de puertas TTL rápidas, cuyos espectros superan los 500 y hasta los 1000 MHz, por lo que debemos intentar exagerar los fenómenos para que sean visibles.

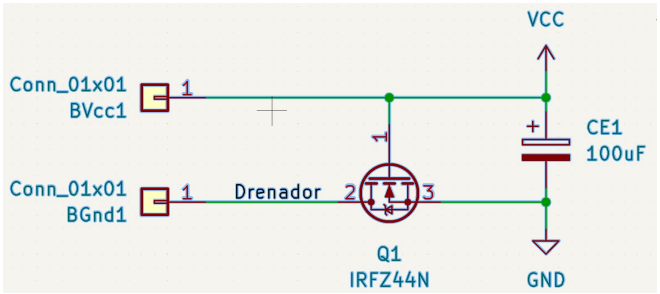


Figura 4. Circuito de protección ante inversión de la alimentación.

II-A2. Contención en el coste: Como consecuencia, nos fijamos que la PCI fuera bicapa y lo más estandarizada posible, con dieléctrico FR4 (el más habitual) y con un tamaño reducido dentro de las necesidades marcadas por el resto de los requisitos. También tratamos de minimizar el número de semiconductores y de poder reconfigurar cada parte de la PCI para varias opciones de prueba distintas. Esto conlleva que las líneas de transmisión que usemos solo podrán ser, en su caso, de tipo *microstrip*.

II-A3. Protección ante mal uso: Ante cualquier circuito de uso docente, debemos considerar un posible mal uso, aunque las protecciones que incorporemos deben ser coherentes en la relación coste / beneficio. Por ello solo nos planteamos una protección *hardware* contra la inversión de polaridad en la alimentación, Fig. 4, y en su caso, facilitar la sustitución de posibles dispositivos dañados mediante uso de zócalos. Estos zócalos aumentan la captación de ruido en el circuito, pero permiten las sustituciones sin deterioro de la PCI por el nuevo proceso de soldadura.

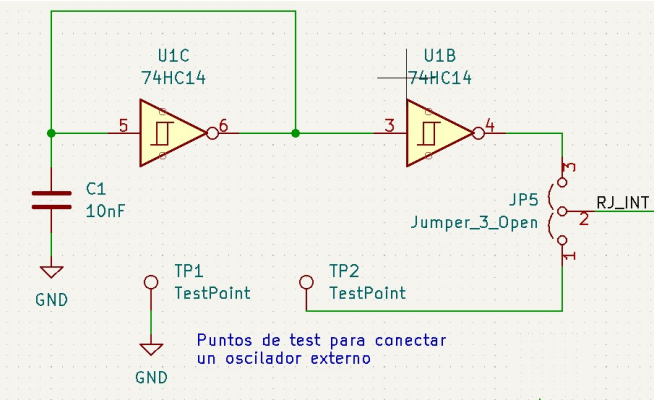


Figura 5. Circuito para generación o recepción de la señal de estímulo.

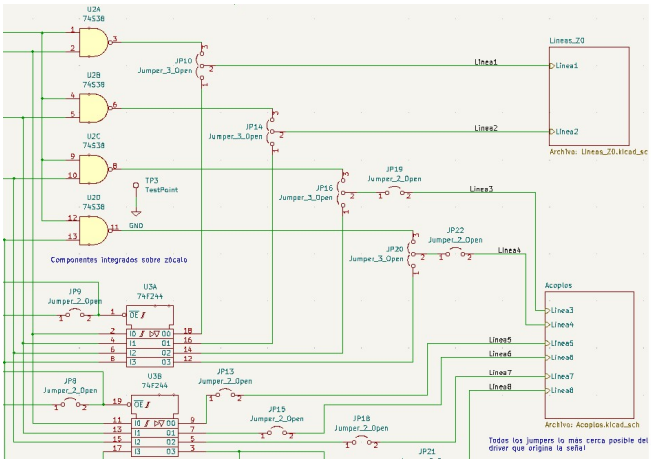


Figura 6. *Drivers* seleccionables.

II-A4. Facilitar la colocación de sondas: Las medidas de frecuencias altas requieren que la medida de cada señal lleve asociada una referencia cercana, en este caso el plano de tierra. Por ello hemos de dotar a la PCI de múltiples puntos de test de señal por todos los lugares donde queramos hacer medidas, y puntos de test de tierra cercanos a estos lugares. Por las diferentes zonas donde hay consumo específico de la alimentación, se han colocado condensadores de desacoplo que estabilicen la referencia de tierra en lo posible. Obsérvese que el plano de tierra de la PCI será la referencia para todos los circuitos y los instrumentos, pero no para la fuente de alimentación cuyo 0V de referencia está separado del plano por el circuito de protección de polaridad.

II-A5. Soporte mecánico: La PCI debe estar dotada de patillas aislantes para separarla de la mesa durante su uso y evitar así posibles cortocircuitos.

II-A6. Mecanismos de reconfiguración: En esta versión se ha buscado obtener un producto mínimo viable al menor tiempo y coste posible, por lo que la reconfiguración del circuito se hace mediante puentes (*jumpers*) de 2 o 3 contactos para que actúen como interruptor o conmutador, según el caso.

II-B. Requisitos específicos para la práctica

Considerando los fenómenos que queremos observar, nos planteamos los objetivos específicos del diseño que se describen a continuación.

II-B1. Señal de prueba externa / interna: La PCI lleva un circuito astable simple con el que generamos la señal de estímulo para el resto de los circuitos (Fig. 5). En general, nos interesan las transiciones por lo que la frecuencia no es, en principio, importante, y la ponemos como una señal cuadrada compatible TTL, de 50 MHz aproximadamente, pero con amplia tolerancia. No obstante, se puede configurar para que la señal de prueba provenga de un generador externo, con lo que se puede controlar la forma de la señal. En ambos casos la señal se regenera con una puerta 74HC14 (inversor *schmitt-trigger*).

II-B2. Selección de drivers: Para aumentar los defectos de EMC en un circuito digital nos conviene usar *drivers* de transición rápida y gran corriente de salida. El circuito ofrece dos opciones con etapas de salida bien distintas (Fig. 6): 74S38 (salida en colector abierto) y 74F244 (salida *totem-pole* triestado), ambos con intensidad de salida máxima superior a 60 mA, y tiempos de transición típicos inferiores a 5 ns aunque, por supuesto, dependen de las cargas.

II-B3. Caracterización de líneas de transmisión: Vamos a caracterizar dos líneas de transmisión con distinto ancho (líneas 1 y 2). Además, en una de ellas podremos modificar la capacidad distribuida con algunos condensadores uniformemente distribuidos que pueden conectarse o no (Fig. 7). Para hacer más visibles las formas de onda, las líneas tendrán ambas una longitud aproximada de 1 m.

II-B4. Efecto de la reflexión en líneas de transmisión: Para evaluar los efectos de las reflexiones en las líneas, colocamos otras dos líneas (líneas 3 y 4) con opción a tener diferentes resistencias de terminación y cierta capacidad de cambio mediante *jumpers*.

II-B5. Efecto de diafonía capacitiva: El ruido que se propaga por diafonía capacitiva es proporcional a la capacidad mutua entre la línea agresora y la víctima. Para aumentar ese efecto, situamos dos líneas paralelas y muy cercanas durante todo su recorrido, una con la señal y la otra con alta impedancia (Fig. 8).

II-B6. Efecto de diafonía inductiva: El ruido que se propaga por diafonía inductiva es proporcional a la inductancia mutua entre la línea agresora y la víctima. Para aumentar ese efecto, situamos dos líneas paralelas y muy cercanas durante todo su recorrido, una con la señal y resistencia de terminación baja que aumente el consumo, y la otra con alta impedancia (Fig. 9). En este caso no son de tipo *microstrip*, ya que el plano de masa queda lejos para forzar un mayor bucle de retorno que aumente el acoplo inductivo.

II-B7. Visualización de ground bouncing: El fenómeno de *ground bouncing* representa el ruido que puede aparecer en una salida que no conmuta en un chip cuando sí lo están haciendo gran parte de las demás salidas. En casos extremos puede provocar un pulso espurio. Es muy importante en circuitos de alta o muy alta integración, que no son nuestro caso, pero

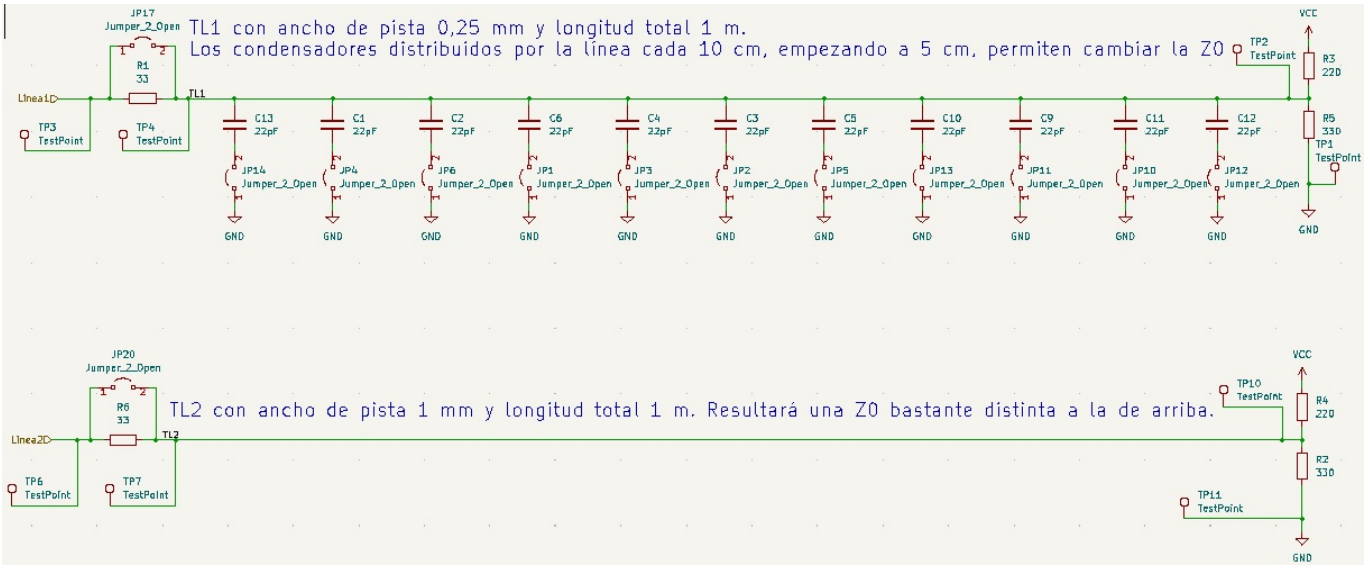


Figura 7. Líneas de transmisión 1 y 2, usadas para caracterizar sus parámetros característicos, con opción de incrementar la capacidad distribuida.

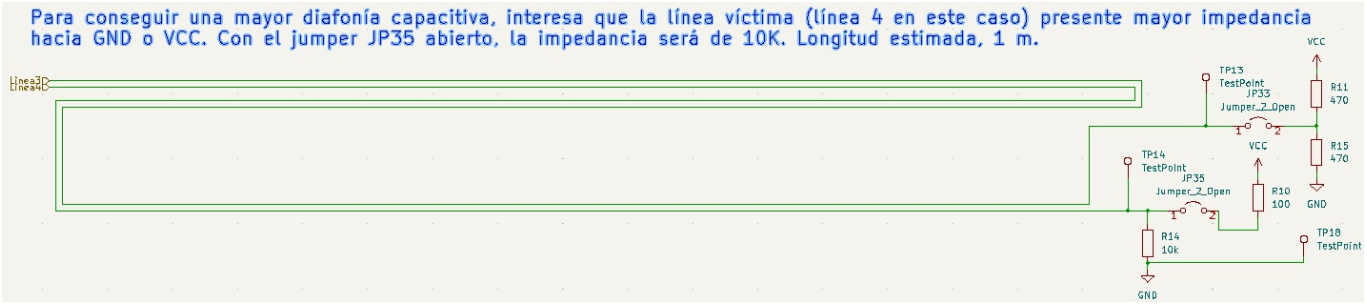


Figura 8. Líneas de transmisión 3 y 4, usadas para visualizar la diafonía capacitiva.

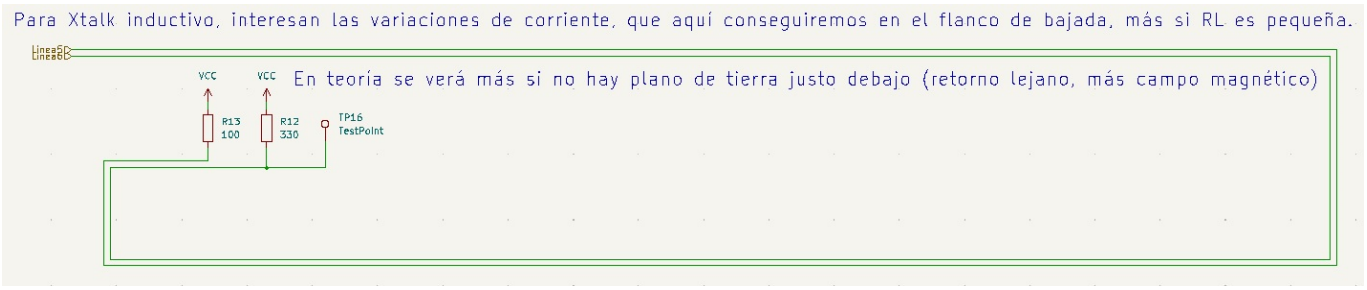


Figura 9. Líneas de transmisión 5 y 6, usadas para visualizar la diafonía inductiva. No lleva el retorno (plano de masa) debajo para aumentar el flujo magnético.

algo es posible apreciar en un componente como el 74F244 si se da la circunstancia de que 7 de sus 8 salidas conmutan a la vez mientras la octava permanece en un estado estacionario. El diseño debe contemplar esa posibilidad.

III. Medidas y resultados

Todos los requisitos de la sección anterior se cumplen en esta PCI y han sido probados. Aparte de los verificables por simple inspección visual en los que no nos detendremos, se presentan a continuación algunos resultados de las medidas y observaciones realizadas. Los datos constructivos de la PCI que aporta el fabricante nos informan de que las líneas *microstrip* esquematizadas en la Fig. 2 presentan estos valores: $h = 1,6\,mm$, $t = 0,035\,mm$, $\epsilon_r \approx 4,5$ para *microstrip* sobre fibra FR4, y $w = 0,25\,mm$ en todas las lineas excepto en la

línea 2 que tiene $w = 1,0\,mm$.

Un valor teórico aproximado de la Z_0 de una línea de este tipo es [1],

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{1,41+\epsilon_r}} ln \quad \frac{5,98h}{0,8w+t} \quad , \tag{1}$$

lo que puede usarse para comparar con los resultados experimentales. En [8] puede encontrarse un estudio más profundo y expresiones más exactas para el cálculo de Z_0.

III-A. Caracterización de líneas de transmisión

Para no tener que distinguir procedimiento entre los dos drivers, utilizamos siempre el flanco de bajada para el disparo. En una línea de transmisión ideal como suele considerarse en electrónica digital para este tamaño de línea, se desprecia el efecto resistivo. La línea se caracteriza con su impedancia característica (Z_0) y su velocidad de propagación (v_p) o, equivalentemente, por su capacidad característica (C_0) y su inductancia característica (L_0). La relación entre estos parámetros viene dada por [4]

$$Z_0 = \sqrt{L_0/C_0}, \tag{2}$$

$$v_p = \sqrt{1/L_0C_0}. \tag{3}$$

Con el osciloscopio solo podemos medir formas de onda en tensión y tiempo, por lo que los anteriores parámetros han de ser calculados indirectamente. Así, para la v_p medimos el tiempo de propagación (t_p). Nótese que este tiempo debe medirse aproximadamente entre la mitad de los flancos de señal. Sabiendo que la longitud aproximada de la línea es de 1 m, calculamos $v_p = longitud/t_p$. Esta medida se repite en la línea 1 (*microstrip* de 0,25 mm de ancho, Fig. 10), la misma pero con carga de 220 pF distribuidos a lo largo de su recorrido, y con otra línea de 1,0 mm de ancho. Cuando a la línea 1 le conectamos los condensadores de carga distribuidos el resultado práctico puede asimilarse a incrementar en (2) y (3) la C_0 por un nuevo valor $C_0' = C_0 + C_c$, donde C_c es la capacidad añadida por metro de línea. Esta aproximación será tanto mejor cuanto más distribuidas estén las capacidades de carga. Obviamente, la repercusión va a ser una menor impedancia característica equivalente y una menor velocidad de propagación. De la misma forma, la línea más ancha va a presentar con el plano de masa una mayor capacidad C_0, lo que tendrá el mismo tipo de efecto.

Sobre esas mismas tres configuraciones, medimos indirectamente la Z_0 equivalente de la línea por el método del coeficiente de reflexión en el extremo (ρ_L). Si la línea termina una resistencia R_L que la conecta con el camino de retorno (plano de GND, generalmente), entonces [4]

$$\rho_L = \frac{R_L - Z_0}{R_L + Z_0}. \tag{4}$$

Nótese que la línea solo muestra sus efectos característicos ante señales variables, por lo que una terminación de *pull-up* a Vcc con una resistencia R_1 y un *pull-down* a GND con una resistencia R_2, equivalen realmente a una única resistencia $R_L = R_1||R_2$, (Fig. 11). Si llamamos ΔV_A al escalón que se

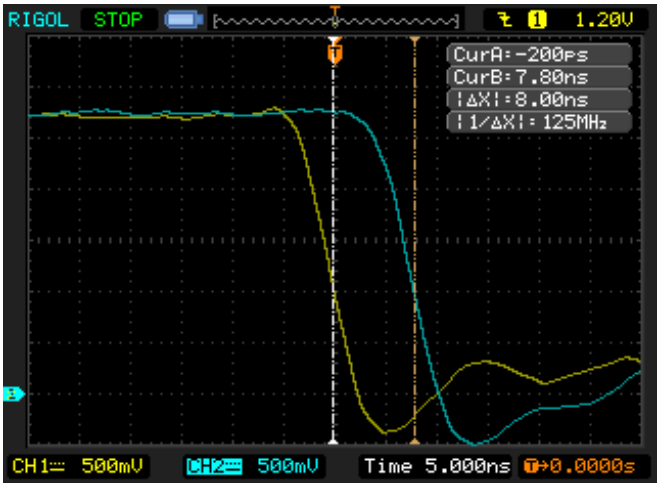


Figura 10. Medida de t_p en un *microstrip* de 1 m con ancho 0,25 mm y sin cargas capacitivas distribuidas.

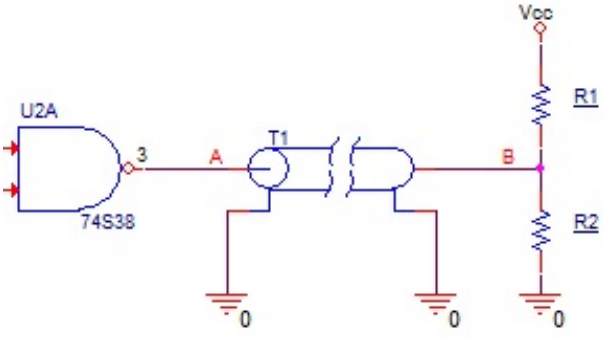


Figura 11. Esquema eléctrico de una línea con terminación para calcular la Z_0.

produce en el punto origen A, y ΔV_B al primer escalón que se produce en el punto extremo B, la relación entre ellos viene dada por el coeficiente de reflexión en B, $\Delta V_B = \Delta V_A(1+\rho_L)$. Sustituyendo en (4) obtenemos

$$Z_0 = R_L \frac{1-\rho_L}{1+\rho_L}. \tag{5}$$

En Fig. 12 se ve la imagen de los escalones en la línea de 0,25 mm, sin cargas capacitivas. Siempre aparece tras la bajada un *overshoot* debido a efectos inductivos locales que debemos descontar, ajustando los cursores al valor medio tras ese *overshoot* inicial, y antes de que aparezca el siguiente pulso reflejado, como se muestra en la figura.

III-B. Reflexiones en líneas desadaptadas

Como se observa en Fig. 8, en algunas líneas podemos modificar bastante las resistencias de terminación, consiguiendo así reflexiones de tamaño muy diferente, apreciables con el osciloscopio. Habiendo evaluado previamente la Z_0 de la línea, puede evaluarse si esas nuevas reflexiones se corresponden con lo esperado teóricamente.

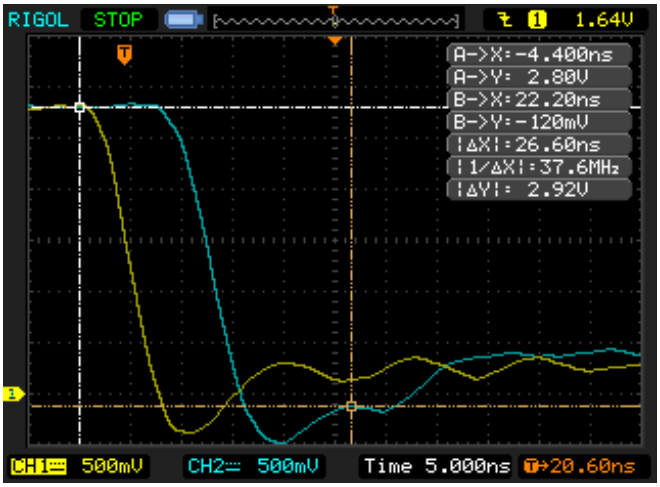


Figura 12. Medida de ΔV_A y ΔV_B en un microstrip de 1 m con ancho 0,25 mm y sin cargas capacitivas distribuidas.

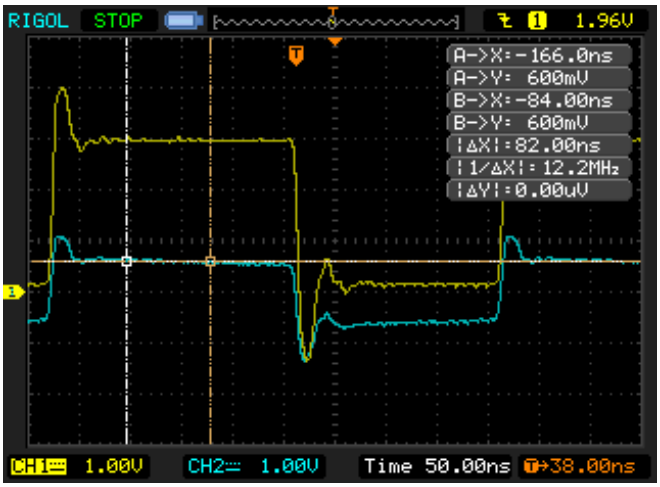


Figura 13. Diafonía capacitiva entre dos líneas microstrip. La longitud paralela es de 1 m, ancho de pista 0,25 mm y distancia entre pistas también 0,25 mm aproximadamente. en amarillo puede verse la señal TTL agresora mientras que la azul corresponde a la línea víctima.

III-C. Diafonía capacitiva

Volviendo de nuevo sobre la Fig. 8, dejamos ahora la línea 4 en alta impedancia, comunicada con GND solo a través de una resistencia de 10K que, en teoría, debería asegurar una tensión de 0 V en toda la línea. Mientras, la línea 3 se deja bien adaptada y transmitiendo un tren de pulsos rectangulares. La capacidad mutua entre esas dos líneas va a permitir que una parte de la señal pase a la línea 4, como se aprecia en la Fig. 13.

Obsérvese que, mientras que la señal inductora es TTL con una componente continua (*offset*) de +1,5 V aproximadamente, la señal inducida a través de esa capacidad mutua parásita filtra la componente continua, resultando simétrica respecto a 0 V. El acoplo se produce realmente en los flancos (señal variable), por lo que si los semiperiodos de corriente continua inductora duraran lo suficiente, veríamos decaer la tensión inducida hasta 0 V.

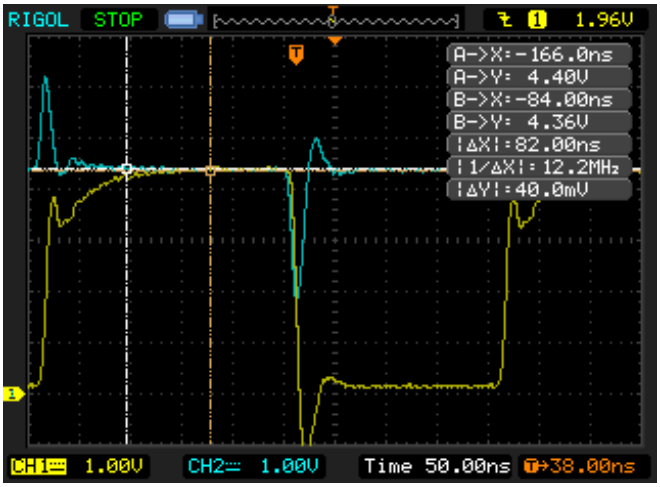


Figura 14. Diafonía inductiva entre dos líneas paralelas. La longitud paralela es de 1 m, ancho de pista 0,25 mm y distancia entre pistas también 0,25 mm aproximadamente. El retorno está separado para formar bucles de corriente con área superior a los 40 cm^2 cada una. En amarillo vemos la señal TTL inductora mientras que en azul se aprecia el efecto inducido.

III-D. Diafonía inductiva

La medida realizada sobre la Fig. 9 presenta el resultado que se muestra en la Fig. 14.

A diferencia de la diafonía capacitiva, en este caso los picos de tensión inducidos sí tienen una componente de corriente continua bien definida, coincidente con el flanco al que van asociados. Aunque la tensión de pico que hemos conseguido es mayor, su duración temporal es mucho menor porque también lo es la resistencia de terminación por donde se disipa el ruido.

III-E. Ground bouncing

Dada la simplicidad de los componentes utilizados, este fenómeno es menos acentuado que los anteriores, ya que aparece más frecuentemente en semiconductores de muy alta integración. No obstante, utilizando el 74F244 en condiciones límite ha sido posible reproducirlo. Para ello, 7 de sus 8 puertas se han hecho conmutar simultáneamente requiriendo en casi todas ellas corrientes de salida que suman más de 140 mA en el momento de la conmutación. La octava puerta permanece en estado estacionario (Fig. 15). Esa variación de corriente por el pin de GND del componente provoca, por efecto autoinductivo, una variación en la referencia de tierra que altera también la tensión estacionaria en la salida que no conmuta. Como se aprecia en la figura, la salida estacionaria llega a superar los 0,8 V que marcan el umbral de un nivel bajo válido en tecnología TTL, con los consiguientes problemas que podrían aparecer.

IV. Conclusiones

IV-A. Limitaciones de este diseño

La condición de sencillez y fácil manipulación de este circuito nos ha obligado a algunas limitaciones en los estudios realizados. Por ejemplo:

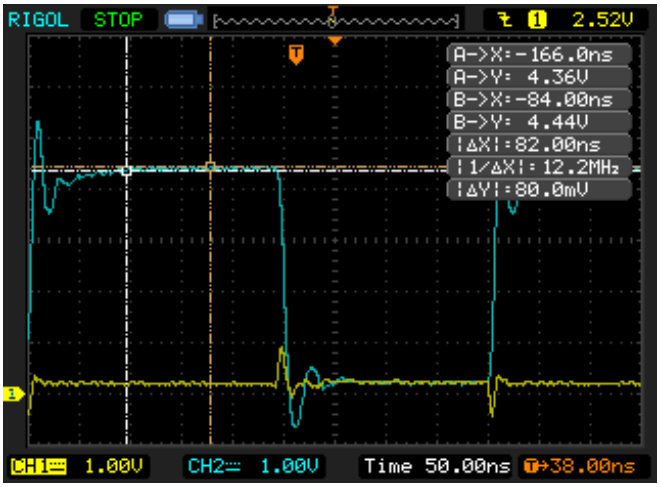


Figura 15. Visualización del *ground bouncing*. La línea azul muestra una de las siete salidas del 74F244 que conmutan simultáneamente, mientras que la línea amarilla muestra los efectos correspondientes sobre la octaba salida, teóricamente en reposo.

1. El efecto de los condensadores de desacoplo no llega a ser apreciable, pese a que el diseño permite conectarlos o desconectarlos. El principal motivo es que la densidad de componentes es demasiado baja.
2. En una PCI multicapa pueden aparecer líneas de transmisión de otros tipos, principalmente *strip*, que se caracterizan por estar rodeadas del mismo dieléctrico y de planos de alimentación por arriba y por abajo. Las características de estas líneas cambian un poco respecto al *microstrip*, que está rodeado tanto de FR4 como de aire. Ese tipo de líneas no se han podido mostrar.

Por lo demás, los objetivos que nos marcamos inicialmente para el diseño se han cubierto adecuadamente.

IV-B. Realización de la práctica

La práctica fue realizada por los alumnos de tercer curso del grado en Ingeniería de Sistemas Electrónicos, en la ETSI de Telecomunicación. Para las medidas y copia de los resultados dispusieron de 2 horas que fueron, en general, suficientes. Aparte, tuvieron que dedicar tiempo en casa para el procesado de los datos y realización de la memoria que habían de entregar, estimado en unas 3 horas de media.

La realimentación que nos han transmitido estos alumnos ha sido bastante positiva, en el sentido de que han comprendido y fijado mejor los conceptos de EMC estudiados en clases teóricas. Más allá de esta opinión cualitativa, se ha corroborado una mejor comprensión durante los exámenes escritos de la asignatura.

IV-C. Líneas futuras

La mayor dificultad que hace más lenta la realización de la práctica ha sido la configuración del circuito para cada caso de prueba mediante los *jumpers*. Las siguientes versiones deberían simplificar esto, posiblemente utilizando microinterruptores centralizados y numerados.

Otra mejora interesante sería la introducción de algún componente de alta integración, donde pueda apreciarse mejor la ausencia o no de condensadores de desacoplo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado con el presupuesto docente del Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad de Málaga.

REFERENCIAS

[1] P. López Veraguas, “Compatibilidad electromagnética y seguridad funcional en sistemas electrónicos,“ Marcombo, Barcelona, 2010.
[2] W. R. Blood Jr., “MECL system design handbook,” 2nd ed., Motorola Semiconductor Products, Inc., 1972.
[3] H. Johnson, and M. Graham, “High speed digital design: A handbook of black magic,” Prentice Hall PTR, New Jersey, 1993.
[4] H. Johnson, and M. Graham, “High-speed signal propagation,” Prentice Hall PTR’s Modern Semiconductors Design Series, Pearson Education Inc., New Jersey, 2003.
[5] E. Bogatin, “Signal and power integrity – Simplified,” 2nd ed., Prentice Hall Modern Semiconductors Design Series, Pearson Education Inc., Boston, 2010.
[6] M. Swaminathan, and A. E. Egin, “Power integrity modeling and design for semiconductors and systems,” Prentice Hall Modern Semiconductors Design Series, Pearson Education Inc., Boston, 2007.
[7] D. Brooks, “Integrity issues and printed circuit board design,” Prentice Hall Modern Semiconductors Design Series, Pearson Education Inc., Boston, 2003.
[8] D. M. Pozar, “Microwave Engineering,” 4th ed., John Wiley and Sons, Inc., 2012.

Prototipado de una cerradura de combinación digital en un circuito FPGA

1: Javier Vázquez del Real
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial
Universidad de Castilla-La Mancha
Ciudad Real, España
Javier.Vazquez@uclm.es

2: Alfonso Parreño Torres
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial
Universidad de Castilla-La Mancha
Albacete, España
Alfonso.Parreno@uclm.es

3: Emilio José Molina Martínez
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial
Universidad de Castilla-La Mancha
Ciudad Real, España
EmilioJose.Molina@uclm.es

4: Francisco Javier López Alcolea
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial
Universidad de Castilla-La Mancha
Ciudad Real, España
FJavier.Lopez@uclm.es

5: Jaime García Jiménez
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial
Universidad de Castilla-La Mancha
Ciudad Real, España
Jaime.Garcia@uclm.es

6: Pedro Roncero-Sánchez Elipe
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial
Universidad de Castilla-La Mancha
Ciudad Real, España
Pedro.Roncero@uclm.es

***Resumen*—Las placas de desarrollo basadas en circuitos FPGA facilitan el diseño de experimentos orientados al prototipado en el laboratorio docente de lógica configurable mediante lenguajes HDL. Una de estas placas es la Basys3, que incorpora una FPGA Artix-7 conectada a numerosos módulos de entrada/salida. Este trabajo muestra la implementación en dicha plataforma de una cerradura de combinación digital diseñada de forma modular en VHDL que emplea, además de los elementos de interfaz disponibles en la placa, un teclado externo USB. Se propone un diseño por etapas de creciente complejidad, que incluye tanto simulación como síntesis.**

***Index Terms*—FPGA, VHDL, Xilinx, cerradura de combinación, laboratorio docente**

I. Introducción

Actualmente son varias las alternativas existentes para implementar un circuito lógico digital desde que los primeros circuitos integrados comenzaron a comercializarse en la década de 1960. La forma tradicional de abordar el problema de la implementación de un diseño lógico, y que sigue siendo válida actualmente para circuitos de moderada complejidad, consiste en cablear entre sí componentes estándar de pequeña, mediana e incluso alta escala de integración. Una segunda opción pasa por la fabricación de dispositivos totalmente adaptados o bien semiadaptados a las especificaciones de diseño. El primer caso, que resulta laborioso y caro, era la única alternativa en los primeros microprocesadores y circuitos de memoria que se lanzaron al mercado; mientras que la irrupción de los diseños semiadaptados, llamados con frecuencia circuitos ASIC (*application-specific integrated circuit*), contribuyó a reducir las etapas de desarrollo al utilizar dispositivos prediseñados. Una alternativa más reciente, que está consiguiendo eclipsar a las estrategias clásicas de implementación para un número cada vez mayor de aplicaciones debido a su versatilidad, altas prestaciones y moderado coste, consiste en escoger circuitos digitales configurables avanzados, entre los que destacan los circuitos CPLD (*complex programmable logic device*) y sobre todo los conjuntos configurables de puertas, o circuitos FPGA (*field-programmable gate array*) [1]. Por citar algunas de las múltiples aplicaciones que explotan su capacidad inherente de procesamiento en paralelo, los circuitos FPGA se han utilizado en el diseño de controladores borrosos [2]–[4]; en la implementación de protocolos de comunicación serie como son I2C y SPI [5], [6]; y en la ejecución de redes neuronales [7], [8]. No es casual, por tanto, que los circuitos digitales configurables, y concretamente los circuitos FPGA, encuentren un lugar cada vez más destacado en los programas docentes de asignaturas relacionadas con los sistemas electrónicos digitales impartidas en las escuelas de ingeniería.

Los elementos constitutivos de los circuitos FPGA son los bloques lógicos CLB (*configurable logic block*), de cuya interconexión surgen complejas arquitecturas multinivel que se diferencian claramente de las arquitecturas de solo dos niveles que son típicas de los dispositivos SPLD (*simple programmable logic device*) a partir de los cuales evolucionaron. La arquitectura de los bloques CLB no es común para todos los circuitos FPGA, sino que depende tanto del fabricante como de la familia a la que pertenece un circuito FPGA dado. En cualquier caso, e independientemente de su estructura, los bloques CLB se pueden configurar para implementar lógica tanto combinacional como secuencial, y contienen típicamente varias tablas LUT (*look-up table*), multiplexores y registros [9].

Este artículo describe la implementación de una cerradura de combinación digital en el circuito FPGA de la familia Artix-7 de Xilinx disponible en la plataforma de prototipado Basys3 de Digilent. Dicha plataforma es una versión evolucionada de la Basys2, cuyo circuito FPGA pertenece a la familia

Spartan-3E, también de Xilinx. Una colección de ejemplos clásicos que permiten introducirse en el diseño digital con VHDL utilizando una plataforma Basys2 y el entorno de desarrollo ISE se recopila en [10]. La cerradura propuesta se diseña de forma modular en VHDL utilizando el entorno más actual Vivado para sintetizar el código. Se propone un diseño por etapas adaptado de [11] que incluye tanto simulación como síntesis, enfocado de menor a mayor complejidad para facilitar al estudiante la asimilación gradual de los diferentes elementos lógicos que van incorporándose al diseño de la cerradura digital. La Basys3 cuenta con los recursos de entrada y salida típicos de este tipo de plataformas de prototipado, entre los que destacan interruptores, pulsadores, ledes de usuario, visualizadores de 7 segmentos y dos puertos USB, por ser los que se emplearán en las diferentes implementaciones de la cerradura. Una enumeración exhaustiva de todos los elementos de interfaz incluidos en la Basys3, así como una descripción de las prestaciones de su circuito FPGA, puede consultarse en [12] y [13].

El contenido se estructura como sigue: en primer lugar se propone un diseño lógico combinacional elemental con el fin de mostrar el funcionamiento básico del sistema en un contexto de simulación. En una segunda fase se implementa este diseño inicial en la Basys3, para pasar a una primera versión secuencial síncrona más sofisticada basada en un autómata de estados finitos que permite la actualización de la contraseña accionando interrupores. La última versión implementa el mencionado autómata añadiendo además un teclado USB externo, con el fin de facilitar tanto la introducción de la contraseña como su eventual modificación. Una vez presentada la cerradura digital de combinación en todas sus versiones se describe el contexto docente en el que se han realizado demostraciones de su funcionamiento en los tres últimos cursos académicos, para terminar con un breve resumen y las conclusiones del trabajo.

II. Cuatro implementaciones de la cerradura

El diseño de una cerradura de combinación digital puede ser tanto combinacional como secuencial, dependiendo de las especificaciones de funcionamiento. Un enfoque basado en lógica secuencial asíncrona, que resulta especialmente interesante en un contexto docente, consiste en la detección de una secuencia determinada de pulsos que reciben las diferentes líneas de entrada de una máquina secuencial carente de un reloj de sincronismo. Solo si dicha secuencia de pulsos es la correcta, la cerradura se abre. Se trata de un diseño que no resulta excesivamente complicado de implementar empleando para ello unos pocos biestables, algo de lógica combinacional adicional e interruptores para generar los pulsos, siempre y cuando el número de líneas de entrada se limite a dos o a lo sumo tres, como se argumenta en [1]. Sin embargo, esta cerradura no resulta especialmente versátil, puesto que si se pretende modificar su clave (es decir, alterar la secuencia única de pulsos no sincronizados en sus entradas que permite su apertura), es necesario rediseñar el circuito completo. Si se opta por alternativas síncronas al diseño de la cerradura basadas en lógica configurable, como es el caso de dos de las versiones que se proponen seguidamente, comprobaremos que la mencionada limitación que surge al querer cambiar la clave ya no supone problema alguno si se implementa un autómata de estados finitos que tenga en cuenta esta posibilidad. Las diferentes implementaciones de la cerradura digital sobre un circuito FPGA se plantean de forma gradual mediante cuatro versiones de creciente complejidad, tanto combinacionales como secuenciales.

II-A. Diseño de la versión 1

La primera versión, que es la más elemental, consiste en un circuito combinacional que muestra mediante simulación el funcionamiento de una cerradura digital, diseñada con una contraseña predefinida e inalterable de 4 bits y utilizando para la verificación de su funcionamiento un banco de pruebas programado igualmente en VHDL. El circuito cuenta con cuatro entradas para introducir una palabra digital de 4 bits, que debe coincidir con la contraseña para abrir la cerradura. Si hay coincidencia bit a bit entre ambas, la única salida del circuito pasa a nivel lógico 1. De lo contrario, se mantiene en un 0 lógico. El diseño hace uso de una primera etapa comparadora implementada con cuatro puertas lógicas XOR que acepta como operandos la palabra digital de entrada y la contraseña predefinida. Una segunda etapa invierte las salidas entregadas por las puertas XOR y aplica la función lógica AND a los 4 bits del resultado (lo que equivale a la funcionalidad de una puerta NOR de cuatro entradas). La síntesis resultante es de tres niveles y consta de cuatro puertas XOR en el primer nivel, cuatro puertas inversoras en el segundo y una puerta AND de cuatro entradas en el tercero. Solo si la clave introducida es correcta se tendrá un 0 lógico en las salidas de todas las puertas XOR, lo que se traduce en un 1 lógico en las cuatro entradas de la puerta AND debido a la acción de las puertas inversoras. En este único caso la puerta AND entrega un 1 lógico y la cerradura por tanto se abre. Si un solo bit de la clave introducida es distinto del esperado, la salida de la puerta XOR correspondiente será un 1 y a su vez la salida de la puerta AND se mantendrá en 0, permaneciendo cerrada la cerradura. Denominando *key*[3:0] al vector que contiene la clave introducida por el usuario, *pass*[3:0] a la contraseña de 4 bits y *lock* a la variable binaria de salida, la expresión lógica que determina el estado de la cerradura es la siguiente:

$$\begin{aligned} lock = & \overline{key(0) \oplus pass(0)} \cdot \overline{key(1) \oplus pass(1)} \cdot \\ & \cdot \overline{key(2) \oplus pass(2)} \cdot \overline{key(3) \oplus pass(3)} \end{aligned} \quad (1)$$

Su descripción de flujo de datos en VHDL se muestra en la Fig. 1. El vector de entrada *key*[3:0] y la salida *lock* forman parte de la entidad denominada *digital_lock*. Como puede comprobarse en el código, la contraseña establecida es la cadena de bits 0111, definida como una constante.

Para esta primera versión de la cerradura se utilizan dos ficheros fuente VHDL, uno con el código correspondiente a la implementación de la expresión lógica (1) y otro con el perfil de simulación escogido para el banco de pruebas, que

Figura 1. Código VHDL de la cerradura digital (versión 1).

contiene una secuencia de tres palabras digitales distintas de 4 bits con las que poner a prueba el correcto funcionamiento de la cerradura. Ejecutando un análisis RTL (*Register Transfer Level*) en el entorno de desarrollo Vivado se obtiene la implementación mediante puertas lógicas de la función lógica (1) mostrada en la Fig. 2, que es equivalente al diseño de tres etapas XOR-NOT-AND propuesto. La síntesis del código VHDL realizada automáticamente por Vivado requiere una única LUT con 4 entradas, como refleja la Fig. 3.

Para definir el banco de pruebas se parte de una réplica de las variables iniciales que se crean añadiendo el sufijo *t* (de

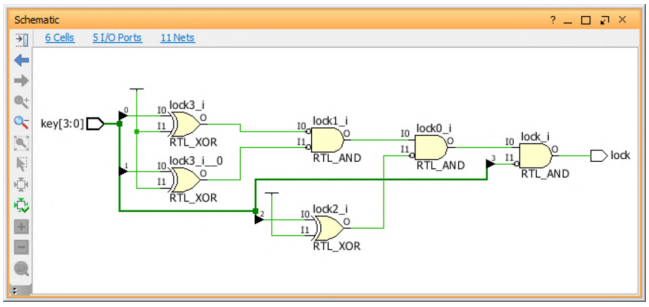


Figura 2. Esquemático RTL (versión 1).

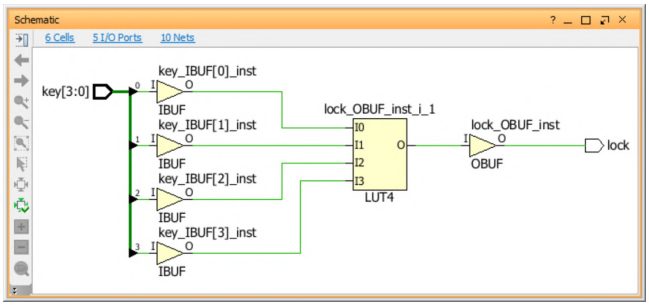


Figura 3. Síntesis realizada por Vivado (versión 1).

a los nombres originales con el fin de poder distinguirlas. rimer lugar se prueba como contraseña de entrada la na de bits 0000 y, transcurridos 10 ns, se sustituye por , siendo ambas diferentes de la contraseña predefinida. En rcer intento se prueba con la contraseña 0111, que esta í es la correcta y en consecuencia se abre la cerradura. onograma obtenido, que es de tipo comportamental, se tra en la Fig. 4 y reproduce correctamente el funciona- to esperado de la cerradura digital.

Diseño de la versión 2

segunda versión consiste en la implementación del ito lógico combinacional del apartado anterior utilizando os de los recursos de usuario de la Basys3. Concreta- e, se hará uso de un led para señalizar el estado de la dura, encendiéndose solo cuando esta se abra; y de cuatro interruptores con los que introducir la contraseña solicitada. Tanto el led como los interruptores escogidos son los primeros que están disponibles en la placa empezando por la derecha; es decir, el led 0 y los interruptores *sw*[3-0].

El diseño del hardware de la cerradura digital se basa en una descripción VHDL que es modular y jerárquica. Existe un fichero fuente situado en la parte superior de la jerarquía que incluye una entidad con el módulo de cabecera (denominado comúnmente *top module*), cuya arquitectura cuenta con un único componente llamado *digital_lock*. Su código se encuentra ubicado en un segundo fichero fuente y coincide exactamente con el mostrado en la Fig. 1, que fue empleado anteriormente en la primera versión. Además de estos dos ficheros fuente que contienen todo el código VHDL necesario, existe un fichero de restricciones adicional (*constraint file*) donde se define la interfaz entre la Basys3 y la implementación en VHDL. Esta interfaz asigna puertos de entrada y de salida al subconjunto de elementos periféricos disponibles en la placa que han sido empleados en el diseño.

El esquemático resultante del análisis RTL consta únicamente del componente *digital_lock*, como muestra la Fig. 5. La síntesis realizada automáticamente por Vivado es una réplica de la correspondiente a la primera versión, con la diferencia de que en el presente caso la única tabla LUT utilizada es sustituida por un módulo lógico equivalente dotado de cuatro

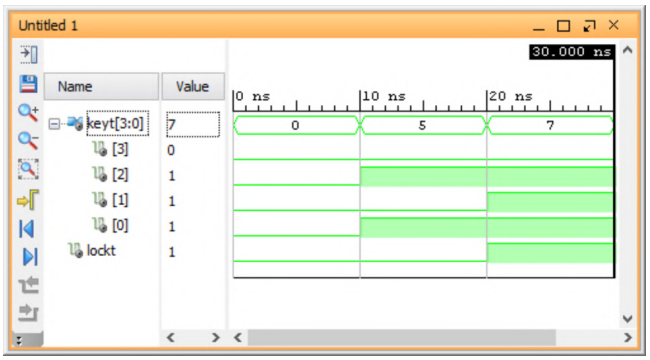


Figura 4. Respuesta comportamental ante una secuencia de estímulos.

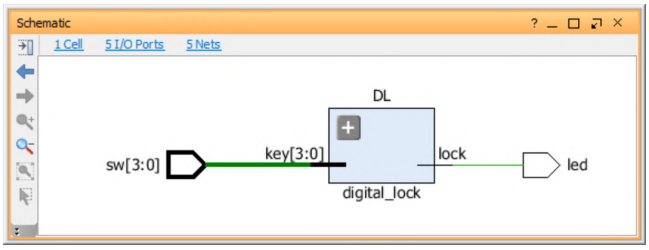


Figura 5. Esquemático RTL (versión 2).

entradas y una salida con la funcionalidad del componente *digital_lock*, como ilustra la Fig. 6.

La Fig. 7 muestra la Basys3 en funcionamiento configurada con esta segunda versión de la cerradura digital. Como indica el testigo visual led 0 encerrado en un círculo, la cerradura se encuentra abierta tras haber introducido la clave correcta 0111 mediante el posicionamiento de los cuatro primeros interruptores de la placa involucrados en la implementación.

II-C. Diseño de la versión 3

El diseño de la tercera versión de la cerradura digital parte de un autómata de estados finitos cuya implementación en la Basys3 necesita un segundo led que añadir al ya utilizado

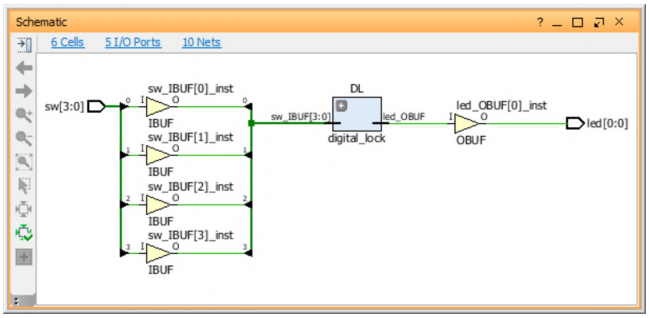


Figura 6. Síntesis realizada por Vivado (versión 2).

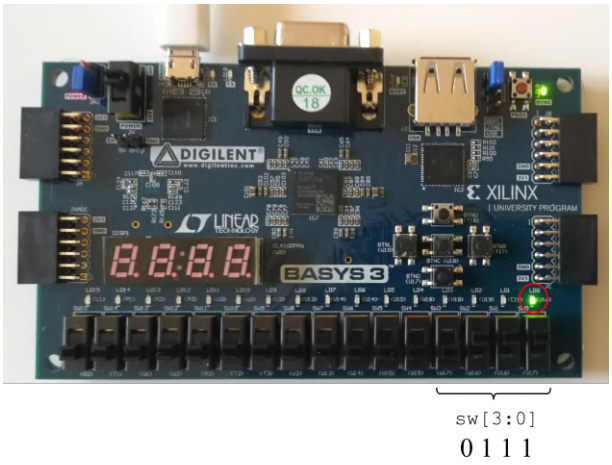


Figura 7. Implementación de la versión 2: la cerradura se encuentra abierta tras introducir la contraseña correcta mediante cuatro interruptores.

previamente, así como la totalidad de los 16 interruptores de usuario disponibles en la placa para introducir la clave de apertura (y no únicamente cuatro como en la versión anterior). La ampliación del número de interruptores a 16 permite introducir una clave de cuatro dígitos hexadecimales predefinida en el código VHDL. Se hace uso además de tres de los cinco pulsadores disponibles para gestionar la dinámica de los cambios de estado en la máquina secuencial, que contempla la posibilidad de actualizar la clave inicial. También se incorporan al diseño los cuatro visualizadores de siete segmentos disponibles en la Basys3 para facilitar el seguimiento del estado de la cerradura mientras esta se manipula, ya sea accionando los pulsadores o bien introduciendo una contraseña.

El módulo lógico que constituye el núcleo central de la cerradura digital en esta tercera versión consta de cinco entradas y una salida. Las entradas son *clk* (señal de reloj); *passinput* (clave de 16 bits); *pass_set* (cambio de la clave); *pass_reg* (almacenamiento de la nueva clave); y *pass_lock* (bloqueo de la cerradura tras un cambio de clave). La salida es el vector de 2 bits *lockstate*, utilizado para indicar el estado en el que se encuentra la cerradura en todo momento, y que puede ser uno de los cuatro siguientes: cerrada (00); abierta (01); introducción de una clave nueva (10); y almacenamiento de la clave actualizada (11). El estado de ambos bits se monitoriza mediante dos ledes de usuario, el led 0 y el led 1. De forma adicional, cuando la cerradura está abierta se muestra de forma simultánea en los cuatro visualizadores el dígito 0, por su similitud con la letra O (*open*); o bien la letra C (*closed*), en caso de estar cerrada.

De los cinco pulsadores que incorpora la Basys3 mostrados en la Fig. 7, dispuestos en forma de cruz, el pulsador situado más arriba (*btnU*) ha sido el escogido para iniciar el cambio de clave una vez desbloqueada la cerradura. Los cuatro dígitos hexadecimales de la nueva clave se muestran en los visualizadores a medida que se accionan los 16 interruptores para introducirla. Una vez seleccionada la posición deseada de todos ellos, la nueva clave generada y mostrada en los cuatro visualizadores se guarda en memoria accionando el pulsador situado más abajo en la placa (*btnD*). Tras su pulsación se muestra el dígito 5 en los cuatro visualizadores disponibles, por su similitud con la letra S de *set*. Finalmente, el pulsador central (*btnC*) sirve para bloquear de nuevo la cerradura. Su próximo desbloqueo tendrá lugar introduciendo la clave actualizada, no la original.

Todas estas entradas y salidas se muestran en el esquemático RTL de la Fig. 8. Como puede verse, cada uno de los tres pulsadores utilizados tiene vinculado un módulo antirrebotes independiente (*debounce*). En el esquemático RTL los dos bits de la salida *lockstate* se almacenan en sendos biestables D de un registro, cuyas salidas se conectan a los ledes 0 y 1 respectivamente. Esta pareja de bits determina, además, la entrada de selección de cuatro multiplexores. Cada multiplexor cuenta con cuatro entradas de 4 bits cada una, y con una salida que es igualmente de 4 bits. Su misión es encaminar hacia cuatro registros de 4 bits construidos con biestables

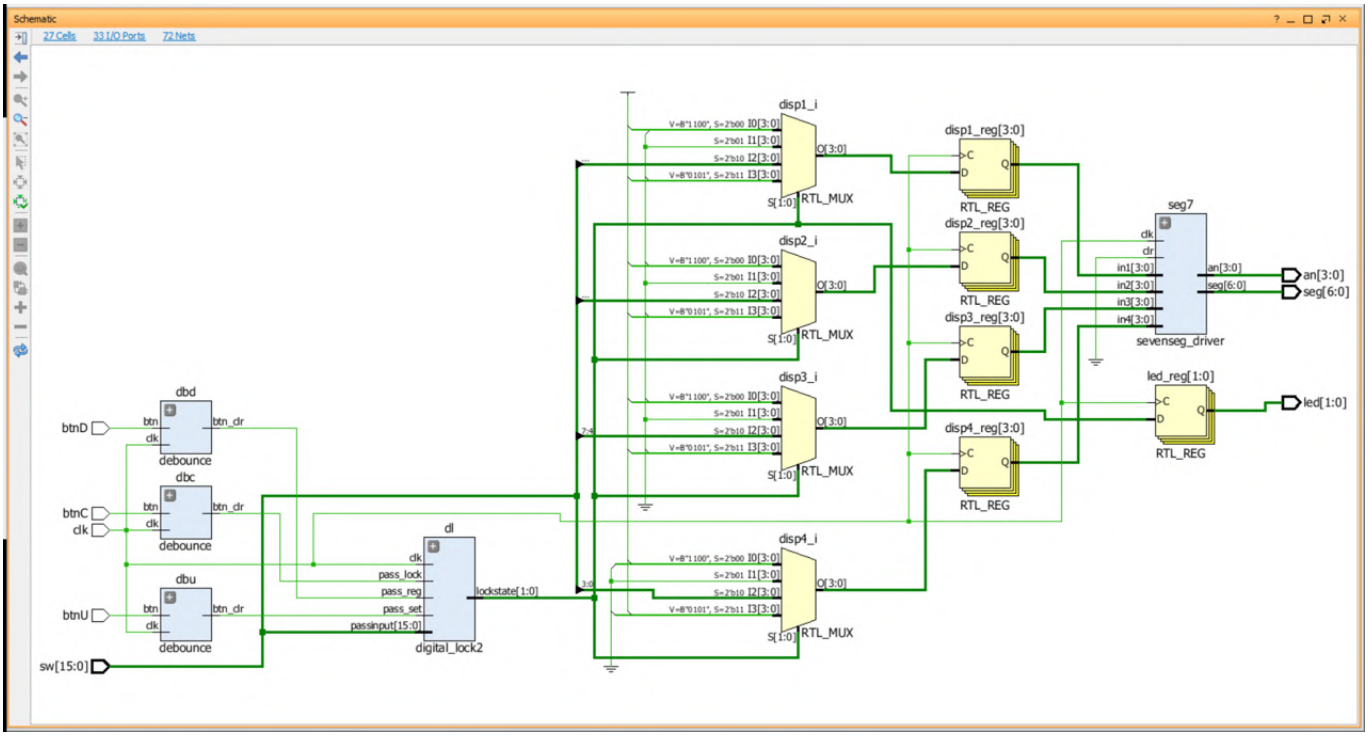


Figura 8. Esquemático RTL (versión 3).

D la codificación de los dígitos hexadecimales que deben representarse en los visualizadores. En el caso de la entrada de datos de los multiplexores denominada *I2*[3:0], cada uno de ellos vuelca en su registro asociado la codificación del dígito correspondiente a la clave de cuatro dígitos almacenada en el vector *sw*[15:0]. Las tres entradas de datos restantes simplemente contienen la codificación de los dígitos escogidos para representar los diferentes estados de la cerradura digital (*open*, *closed* y *set*). Los registros, a su vez, proporcionan al módulo controlador de los visualizadores, denominado *sevenseg_driver*, el dígito a mostrar en cada uno de los cuatro visualizadores. Dicho módulo cuenta con dos salidas, que son *seg*[6:0] (los siete segmentos de los visualizadores) y *an*[3:0] (los nodos comunes donde confluyen los ánodos en cada uno de los cuatro visualizadores).

El autómata de estados finitos, que se representa en la Fig. 9, cuenta con dos estados: ENTERPASS y SETPASS. Las entradas de interés que provocan un cambio de estado se muestran en azul y las salidas en rojo. Los cambios de estado, si han de producirse, tienen lugar tras el flanco positivo de la señal de reloj, cuyo período es de 10 ns. Al iniciar el sistema se parte del estado ENTERPASS, donde se permanece indefinidamente siempre que no se desee actualizar la contraseña de la cerradura e independientemente de si la clave introducida mediante los 16 interruptores coincide o no con la contraseña predefinida. Si se pretende cambiar la contraseña, la clave introducida no solo tiene que ser la correcta sino que además la entrada *pass_set* debe ser asertiva, lo que tiene lugar al pulsar el botón *btnU*. Si se verifican ambas condiciones se pasa al estado SETPASS, que permite la actualización de la contraseña. Tras confirmar el usuario la nueva contraseña mediante la pulsación del botón *btnD*, la entrada *pass_reg* pasa a ser asertiva y se procede a actualizar el valor de la contraseña residente en memoria. El paso siguiente consiste en bloquear la cerradura, lo que se consigue pulsando el botón *btnC*. Su pulsación hace asertiva la entrada *pass_lock*, lo que devuelve el autómata al estado inicial ENTERPASS.

La síntesis llevada a cabo por Vivado utiliza, entre otros recursos, 200 tablas LUT y 165 registros, lo que supone un salto cuantitativo considerable con respecto a la implementación del diseño puramente combinacional de la versión previa. Por lo que respecta a la descripción hardware, se sigue la misma estructura jerárquica anterior basada en un módulo de cabecera, que referencia en este caso a los cuatro ficheros siguientes: el módulo de la cerradura digital, el módulo antirrebotes, un controlador de los cuatro visualizadores y un módulo decodificador, que resulta necesario para representar los dígitos hexadecimales en los visualizadores de la placa.

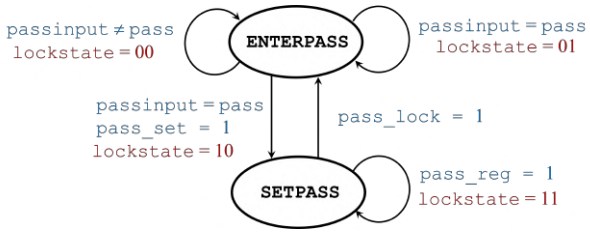


Figura 9. Autómata de estados finitos de la cerradura (versión 3).

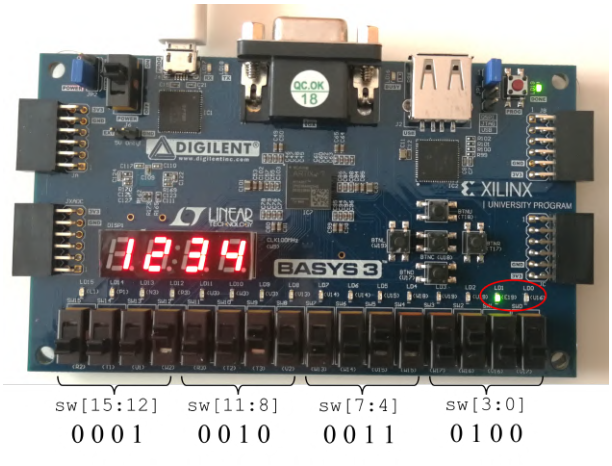


Figura 10. Implementación de la versión 3: se muestra en los visualizadores la contraseña original 1234H tras su introducción mediante 16 interruptores.

La Fig. 10 es una fotografía de la Basys3 donde la máquina secuencial se encuentra en el estado SETPASS tras haber seleccionado correctamente la clave por defecto una vez iniciado el sistema, que es 1234H, como reflejan tanto los visualizadores como el estado de los 16 interruptores. Los testigos led 0 (apagado) y led 1 (encendido) indican que el sistema está preparado para el cambio de contraseña al ser asertiva la entrada *pass_set*.

Tras seleccionar mediante los 16 interruptores la nueva contraseña 5BF2H mostrada en la Fig. 11, se está en condiciones de confirmarla presionando el pulsador *btnD*. Los testigos led 0 y led 1 mantienen el estado anterior, puesto que aún no se ha aceptado el cambio. Al hacerlo pasarán a estar ambos encendidos y en los cuatro visualizadores figurará el dígito 5, que corresponde a la S de *set* como ya se ha mencionado previamente.

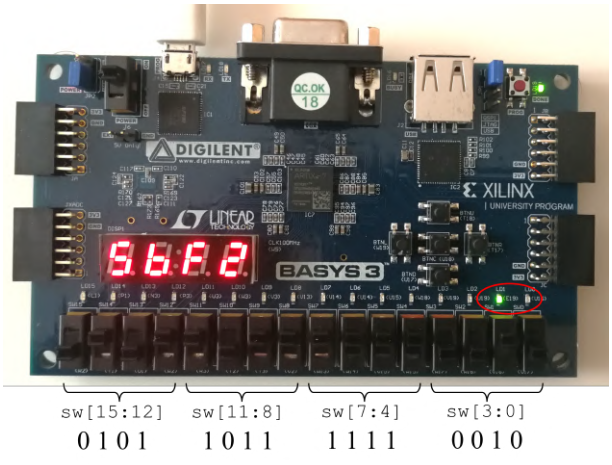


Figura 11. Implementación de la versión 3: se muestra en los visualizadores la nueva contraseña 5BF2H que sustituirá a la inicial 1234H.

II-D. Diseño de la versión 4

La última versión se basa en el mismo autómata de estados finitos que el caso anterior, si bien en su implementación se sustituyen los interruptores utilizados para introducir la clave de apertura de la cerradura digital por un teclado externo conectado al puerto USB HID de la Basys3. El firmware de un microcontrolador de 16 bits PIC24FJ128 incluido en la placa se encarga de implementar la interfaz PS/2 para establecer la comunicación entre el circuito FPGA y el teclado USB.

Si se desea actualizar la contraseña vigente en esta implementación, al introducir una contraseña diferente por teclado se van mostrando en los visualizadores los dígitos correspondientes a la nueva clave pulsación tras pulsación, de forma similar a como sucedía en la versión anterior a medida que se modificaba la posición de los 16 interruptores. En la variante con teclado hay, sin embargo, algunas diferencias: por un lado, la totalidad de los 16 ledes disponibles se emplea para mostrar la codificación binaria con 4 bits correspondiente a cada uno de los dígitos de la nueva contraseña mientras estos se van introduciendo por teclado (restringidos esta vez a los caracteres numéricos del 0 al 9); y por otro, se habilita un cuarto pulsador, *btnR*, que añadir a los tres ya utilizados previamente, cuya finalidad es la de reiniciar el proceso de actualización de la clave en caso de introducir un dígito erróneo.

En el esquemático RTL de la Fig. 12 correspondiente a esta cuarta versión se identifican, en su parte derecha, la mayoría de los elementos constitutivos de la versión anterior ya mostrados en la Fig. 8. El resto del esquemático implementa el algoritmo que procesa la lectura de las pulsaciones del teclado, y que se describe brevemente a continuación.

Al presionar una tecla cualquiera de un teclado que se comunica conforme al protocolo PS/2 se envía un código de 8 bits, denominado *make code*, que identifica inequívocamente la pulsación. Tras dejar de presionar dicha tecla se transmite un segundo código, llamado *break code*, consistente en un código específico de 8 bits (que es F0H para caracteres y números) seguido del mismo código *make* correspondiente a la pulsación. El algoritmo contempla además que una tecla se pueda mantener pulsada, en cuyo caso se espera a que finalice la pulsación para mandar el código *make* correspondiente al carácter pulsado una única vez. Sin embargo, lo habitual ante una pulsación sostenida es optar por reenviar el código *make* de la tecla pulsada cada 100 ms aproximadamente. La implementación del algoritmo en VHDL está basada en una máquina secuencial de cuatro estados cuyo funcionamiento se describe con detalle en [11]. Una relación de dichos códigos puede consultarse en [12] y [14], mientras que una sencilla aplicación gratuita que los muestra por pantalla tras la pulsación de las teclas del teclado en uso es *Keyboard Key Info* [15].

La complejidad extra que supone contar con un teclado se traduce en una síntesis que consume bastantes más recursos del circuito FPGA que la implementación anterior. En este caso la información referente al uso de elementos físicos

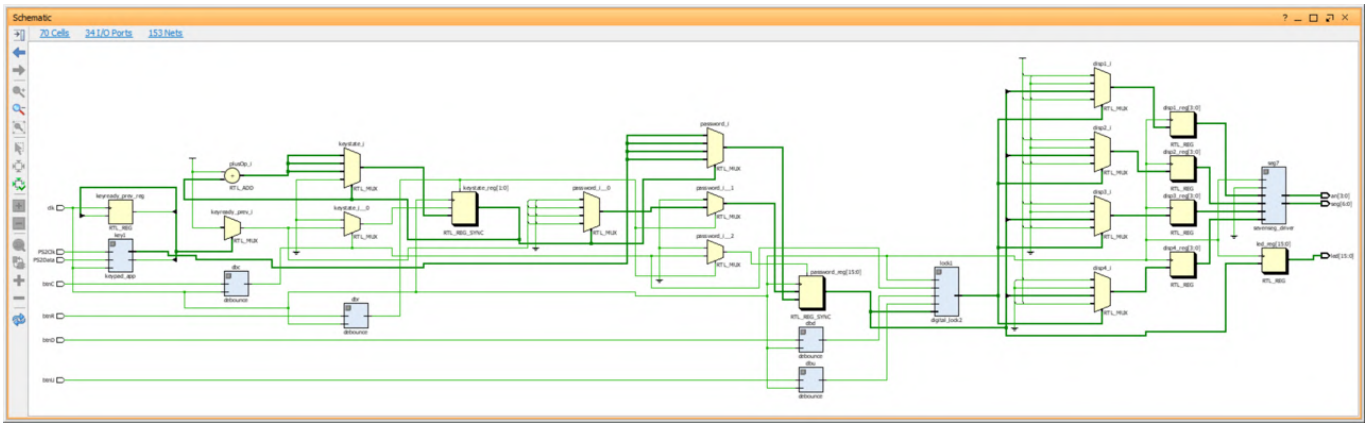


Figura 12. Esquemático RTL (versión 4).

proporcionada por Vivado eleva a 342 y a 308 el número de tablas LUT y de registros empleados, respectivamente. Por lo que respecta al diseño del código VHDL, se ha estructurado de nuevo a partir de un módulo de cabecera del que esta vez dependen cuatro de los ficheros ya empleados en la versión 3 y dos ficheros más que resultan necesarios para la gestión de la lectura de los códigos correspondientes a las pulsaciones del teclado USB.

En la Fig. 13 se muestra una fotografía de la Basys3 con el teclado utilizado conectado a su puerto USB HID. Los cuatro visualizadores indican que se ha almacenado en memoria una nueva contraseña, cuya codificación binaria 1001 1000 0111 0110 es visible en los 16 ledes y se corresponde con los dígitos decimales 9876.

III. Demostración del prototipo en el aula

Se llevó a cabo una demostración del funcionamiento del prototipo de cerradura digital, bien de la versión 3 o de la 4, a los estudiantes que cursaron de forma presencial en el campus de Ciudad Real de la Universidad de Castilla-La Mancha, en los cursos académicos 2021/22, 2022/23 y 2023/24, la asignatura Sistemas Electrónicos e Instrumentación del máster en Ingeniería Industrial impartido en la ETSI Industrial. La mayoría de los estudiantes matriculados en dicha asignatura cursaron con anterioridad un grado en Ingeniería Mecánica, en Ingeniería Eléctrica o bien en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática. Con un alumnado tan heterogéneo hay que tener en cuenta los limitados conocimientos en electrónica de algunos estudiantes, especialmente de los que aportan una formación previa en Ingeniería Mecánica. La demostración práctica despertó la curiosidad de los alumnos de todas las promociones mencionadas, que formularon preguntas sobre las posibilidades reales de la lógica digital configurable en el diseño electrónico, así como sobre las ventajas e inconvenientes que presenta la lógica configurable basada en circuitos FPGA frente a la lógica programada típica de los sistemas empotrados basados en microcontrolador. Este prototipo u otros similares pueden utilizarse también para complementar la formación de los estudiantes del grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática, puesto que al contar con una buena base en lógica digital están en condiciones de asimilar en profundidad el diseño lógico basado en circuitos FPGA. En este caso el enfoque ya no se limitará a realizar una demostración del funcionamiento del prototipo, sino que se podrá plantear el diseño del código fuente, de naturaleza modular, así como la descripción de la interfaz FPGA-puertos VHDL en las diferentes etapas de la implementación de la cerradura digital.

Figura 13. Implementación de la versión 4: los visualizadores indican el almacenamiento en memoria de una nueva contraseña (*set*) cuya codificación binaria se muestra en los 16 ledes.

IV. Resumen y conclusiones

Se ha propuesto el desarrollo por etapas de un prototipo de cerradura de combinación digital implementada en VHDL sobre el circuito FPGA Artix-7 de Xilinx que forma parte de la plataforma de prototipado de bajo coste Basys3 del fabricante Digilent. En las dos versiones más elaboradas, que parten de una máquina de estados finitos idéntica, es posible actualizar la contraseña almacenada en memoria. En uno de los casos la nueva contraseña se codifica mediante la posición de los 16 interruptores de usuario disponibles en la Basys3; mientras que en el segundo caso se recurre a un teclado externo conectado a uno de los puertos USB de la placa para facilitar la

introducción de la contraseña mediante la pulsación de cuatro teclas. En ambas versiones se recurre a varios de los pulsadores disponibles en la placa para actualizar el valor lógico de las entradas del sistema que condicionan un cambio de estado de la máquina secuencial. También se utilizan visualizadores de siete segmentos y ledes para facilitar el seguimiento del estado de la cerradura de combinación digital. Este prototipo, junto a otros diseños lógicos implementados en la misma plataforma, se puso a prueba en el aula en los cursos académicos 2021/22, 2022/23 y 2023/24. La demostración práctica resultó muy formativa para los estudiantes y contribuyó a ilustrar de forma práctica el potencial de la lógica configurable en el diseño digital, reforzando de esta forma los conceptos expuestos previamente en las clases teóricas.

REFERENCIAS

[1] V. P. Nelson, B. D. Carroll, H. T. Nagle, and D. Irwin, *Digital Logic Circuit Analysis and Design, 2nd Edition*. Pearson, 2021.

[2] S. Sanchez-Solano, A. Cabrera, I. Baturone, F. Moreno-Velo, and M. Brox, "FPGA implementation of embedded fuzzy controllers for robotic applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 4, pp. 1937–1945, aug 2007.

[3] C.-F. Juang, C.-M. Lu, C. Lo, and C.-Y. Wang, "Ant colony optimization algorithm for fuzzy controller design and its FPGA implementation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 3, pp. 1453–1462, mar 2008.

[4] A. Messai, A. Mellit, A. Guessoum, and S. Kalogirou, "Maximum power point tracking using a GA optimized fuzzy logic controller and its FPGA implementation," *Solar Energy*, vol. 85, no. 2, pp. 265–277, feb 2011.

[5] A. Oudjida, M. Berrandjia, R. Tiar, A. Liacha, and K. Tahraoui, "FPGA implementation of I2C & SPI protocols: A comparative study," in *2009 16th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems - (ICECS 2009)*. IEEE, dec 2009.

[6] S. Saha, M. A. Rahman, and A. Thakur, "Design and implementation of SPI bus protocol with built-in-self-test capability over FPGA," in *2014 International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology*. IEEE, apr 2014.

[7] M. Samragh, M. Ghasemzadeh, and F. Koushanfar, "Customizing neural networks for efficient FPGA implementation," in *2017 IEEE 25th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM)*. IEEE, apr 2017.

[8] F. Ortega-Zamorano, J. M. Jerez, and L. Franco, "FPGA implementation of the c-mantec neural network constructive algorithm," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 2, pp. 1154–1161, may 2014.

[9] C. Maxfield, *FPGAs: Instant Access*. Elsevier Science and Techn., Apr. 2011.

[10] C. Castro and J. B. Castro, *VHDL sintetizable para estudiantes de ingeniería*. Servizo de Publicacións, Universidade de Vigo, 2018.

[11] C. Ünsalan and B. Tar, *Digital System Design with FPGA: Implementation Using Verilog and VHDL*. McGraw Hill Education, Jul. 2017.

[12] "Basys3 FPGA board reference manual," Digilent, Documento número 502-183, Rev 2019.

[13] J. Vázquez, A. Parreño Torres, F.J. López Alcolea, E.J. Molina Martínez, and P. Roncero-Sánchez, "Implementation of a sensorized home alarm prototype on an FPGA platform," in *2022 Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (XV Technologies Applied to Electronics Teaching Conference) - (TAEE 2022)*. IEEE, jun 2022.

[14] P. P. Chu, *FPGA Prototyping by VHDL Examples*. Wiley, jul 2007.

[15] https://dennisbabkin.com/kbdkeyinfo/, [Online; acceso 19-02-2024].

Metodología basada en Proyectos para el desarrollo de Sistemas IoT

1st Germán Cano-Quiveu
Dept. Tecnología Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
germancq@dte.us.es

2nd Manuel J. Bellido
Dept. Tecnología Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
bellido@dte.us.es

3rd Julián Viejo-Cortes
Dept. Tecnología Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
julian@us.es

4th Paulino Ruiz-de-Clavijo-Vázquez
Dept. Tecnología Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
pruiz@us.es

5th Jesús Barrionuevo-Vallecillo
Dept. Tecnología Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
jesbarval@alum.us.es

***Abstract*—En este artículo se presenta una metodología en el Aprendizaje Basado en Proyectos que permite a los alumnos a desarrollar una serie de capacidades que culminan con el desarrollo de un sistema domótico así como herramientas para desarrollar proyectos sobre el Internet de las Cosas (Internet Of Things). Esta metodología permite que el alumno aprenda los conocimientos básicos y aplicarlos en un entorno real así como premiar a los alumnos que tengan inquietudes por crear nuevos diseños en el marco de la asignatura.**

***Index Terms*—Open-Source, Internet of Things, Aprendizaje basado en proyectos.**

I. Introducción

Este trabajo se enmarca dentro de la asignatura "Laboratorio de Desarrollo Hardware" impartida en el Grado de Ingeniería Informática – Ingeniería de Computadores de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática (ETSII) de la Universidad de Sevilla. Se trata de una asignatura obligatoria, de 6 ECTS, impartida en el penúltimo cuatrimestre del grado. Los créditos de aprendizaje están repartidos en 2 ECTS para actividades en aula de teoría (20 horas presenciales de teoría) y 4 ECTS para actividades de laboratorio (40 horas presenciales de laboratorio). Es una asignatura eminentemente práctica, orientada al desarrollo de sistemas informáticos dentro del campo del Internet of Things (IoT). Uno de los aspectos principales que se han pretendido cubrir en la asignatura es que el alumno pueda trabajar en el desarrollo del sistema IoT tanto en las horas presenciales como en las horas no presenciales. Para ello, se han buscado alternativas abiertas (Open Source y Open Hardware) de bajo coste, que nos han permitido adquirir suficiente material para poder realizar el préstamo de material básico a cada uno de los alumnos durante el tiempo que dura el cuatrimestre.

En esta asignatura se ha optado por aplicar un Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) [1], en el cual los alumnos deberán aprender a organizar sus tareas. Durante el transcurso de la asignatura se evaluará y se ayudará adecuadamente a los alumnos durante las horas de laboratorio.

La metodología docente aquí presentada habilita un acercamiento al mundo IoT de forma escalonada, la cual proporciona el conocimiento mínimo necesario para construir un proyecto IoT y permite a aquellos que así lo desean profundizar en cada una de las diversas tareas que constituyen el proceso. Todo esto, además, se realiza al ritmo que marque el propio alumno, permitiéndole así aprender a organizar el tiempo requerido para un proyecto de esta envergadura. Otra vertiente que persigue esta metodología es hacer entender al alumno que el desarrollo IoT no es prohibitivo en coste, lo que ha llevado a utilizar siempre que fuera posible software Open-Source y plataformas Open-Hardware, frecuentes en este tipo de proyectos por su favorable relación coste-rendimiento.

Por todo ello, esta asignatura representa la primera aproximación para el alumno de Ingeniería de Computadores al mundo IoT, trabajando tanto con software específico, como es MySensors [2], como aprendiendo a diseñar y soldar una Printed Circuit Board (PCB). Debido a que la asignatura está enfocada al diseño de nodos IoT, se ha optado por reducir el número de clases teóricas para aumentar las clases de laboratorio, permitiendo así que el alumno disponga de más horas presenciales en el laboratorio para realizar las tareas requeridas en el diseño de un sistema IoT.

II. Herramientas

El planteamiento de esta asignatura es partir de cero para materializar un sistema IoT completo, utilizando para ello herramientas Open-Source y Open-Hardware. Este proceso se lleva a cabo a través de ciertos *milestones*, elegidos por su carácter pedagógico.

Como se explicó en la Introducción, siendo una asignatura basada en ABP, se proporcionan manuales y hardware de forma individual a cada alumno. A continuación, se detallarán

las herramientas y materiales fundamentales para llevar a cabo la propuesta IoT planteada.

A. MySensors

La principal herramienta en la que se basa este proyecto IoT es la librería MySensors.

MySensors es un proyecto Open-Source que establece un protocolo de comunicación inalámbrica entre diversas plataformas. Existen varias alternativas para esta comunicación, desde usar MQTT a través de TCP/IP hasta radiofrecuencia con protocolos propios, como los módulos nRF24l01 y RF69. MySensors soporta arquitecturas como ATMEGA328T, ESP32 [3], ESP8266 [4], Raspberry Pi y Orange Pi, entre otras.

Este protocolo distingue entre dos actores: los dispositivos nodos, conectados a diversos sensores y/o actuadores, y los dispositivos Gateway, que controlan los datos en la red de nodos. El Gateway suele estar equipado con un software, denominado Controlador, que permite al usuario interactuar con los datos provenientes de los nodos y enviar información a estos.

Dada la naturaleza Open-Source de MySensors, ha surgido una comunidad activa que ha desarrollado numerosas funcionalidades para diversas circunstancias y proyectos compartidos por la comunidad, facilitando así la adaptación a esta librería.

Una de las funcionalidades enfatizadas en esta metodología es la seguridad. En el mundo IoT, es crucial protegerse contra ataques de terceros. Por este motivo, esta metodología enfatiza la importancia de la autenticidad e integridad de los datos. Para ello, MySensors implementa un Hash-based Message Authentication Code (HMAC) basado en SHA256, que es suficiente para asegurar los datos, aunque el espacio para la firma esté limitado a un máximo de 21 bytes. Además, MySensors ofrece confidencialidad mediante AES; aunque no disponen de una guía específica.

B. Controladores

Los controladores permiten crear Paneles de Control para interactuar con diversos sensores y actuadores conectados en los nodos de la red MySensors. Existen diversas alternativas como OpenHAB [5], basada en Java; HomeAssistant [6], basada en Python; o Domoticz [7], basada en C. Todas estas opciones son Open-Source. En concreto, se utiliza Domoticz, aunque podría ser fácilmente intercambiable por alguna de las otras.

Domoticz cuenta con funcionalidades adicionales que no cubre la actual metodología, como integraciones con Amazon Alexa o Telegram, que facilitan el acceso a los actuadores y sensores de la red. Además, permite la creación de scripts para programar tareas y facilitar la comunicación de información entre nodos de la red a nivel de controlador.

C. Plataformas Hardware

Dentro de las plataformas hardware utilizadas en esta metodología, existen dos categorías: Placas de desarrollo basadas en microcontroladores (MCU) y Single Board Computers (SBC).

El MCU utilizado es el ATMEGA328T y se emplearán las placas de desarrollo Arduino [8]. La elección de Arduino se debe a su inmenso contenido de terceros para adaptarse a distintos sensores/actuadores, a su naturaleza de Open-Hardware y Open-Source, y a su favorable relación coste-rendimiento. Las plataformas seleccionadas para esta metodología son aquellas más relacionadas con la librería MySensors, como son Arduino RF-NANO y el Arduino Pro Mini (3.3V - 8MHz). El primero incluye el módulo de radiofrecuencia nRF24l01, compatible con MySensors, y el segundo, debido a sus dimensiones y coste, es utilizado mayoritariamente en diseños IoT. En las figuras 1 y 2 se observan ambas placas de desarrollo.

Fig. 1. Arduino RF-NANO

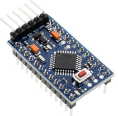


Fig. 2. Arduino Pro Mini

A nivel de SBC, la elección estaba restringida a aquellas compatibles con la librería MySensors y que permitieran ejecutar un sistema operativo Linux. Por tanto, se seleccionaron la plataforma Raspberry Pi 3 [9] y la plataforma Orange Pi Zero [10]. Estas SBC permiten la instalación de todo el software requerido por la metodología, proporcionando así acceso a todas las herramientas necesarias a través del SBC.

D. Máquinas de prototipado para PCB

La máquina de prototipado para PCB es una herramienta importante para la metodología, ya que facilita la fabricación de un diseño de PCB y su posterior proceso de soldadura de componentes. En nuestro caso concreto, utilizamos una LPKF Protomat S62 [11], que se muestra en la figura 3. Sin embargo, existen alternativas más económicas, como la V-One de Voltera [12], que también cumplirían adecuadamente con este propósito.

La LPKF Protomat S62 utiliza un proceso de taladrado mecánico para la fabricación de la PCB, empleando para ello un cambio automático de brocas. Para su correcto funcionamiento, la máquina requiere software propietario, siendo así la única herramienta no Open-Source utilizada en toda la metodología.

Fig. 3. LPKF protomat s62

III. Aplicación a la asignatura

A. Contenidos

La asignatura se organiza en tres partes tanto en la teoría como en el laboratorio. En la parte teórica, estas secciones son: 1.- Visión general de Hardware; 2.- Introducción al IoT: Proyecto MySensors; 3.- Diseño e implementación de PCBs.

En la parte de laboratorio, que es nuestro enfoque principal para el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP), tenemos tres bloques que se relacionan tanto con cada una de las partes teóricas como entre sí: 1.- Desarrollo de sistemas con microcontroladores; 2.- Desarrollo de un sistema IoT basado en el proyecto MySensors; 3.- Diseño e implementación de una PCB.

El primer bloque de laboratorio tiene como objetivo familiarizar al alumno con el microcontrolador Arduino [8]. La elección de este dispositivo se debe a su amplia disponibilidad y a las numerosas librerías disponibles para diversos sensores y actuadores. Este bloque permite que los alumnos retomen el uso de Arduino, ya visto en otras asignaturas previas, pero centrándonos en aspectos distintos, útiles para el diseño de sistemas IoT. Estos incluyen el modo power-down para ahorrar consumo, el uso de interrupciones, la comunicación serie con un script programado en un lenguaje de alto nivel, y la presentación de sensores/actuadores típicos de numerosos sistemas IoT.

El segundo bloque de laboratorio se centra en MySensors y Domoticz [7]. Durante este bloque, el alumno creará una serie de nodos basados en Arduino que controlará a través de un Gateway SoC, permitiendo enviar información a diferentes actuadores o recoger información de sensores. El alumno utilizará MySensors y Domoticz para configurar un SoC basado en Raspberry Pi u Orange Pi, aprendiendo a configurar un SoC desde cero. Una vez instalado el sistema operativo y configurada la red, instalarán el software necesario. Además, en la parte del nodo, el alumno aprenderá a programar en Arduino con la librería MySensors, realizando dos nodos IoT que serán evaluados.

En el tercer y último bloque de la asignatura, los alumnos se enfocan en el diseño e implementación de una PCB. Deberán crear y ensamblar una PCB para un nodo IoT que fue desarrollado en el segundo bloque de laboratorio. Las figuras 4 y 5 muestran una PCB ya soldada por un alumno. En esta placa, se diseña para recibir una entrada de 220V de corriente alterna, la cual se transforma a 5V mediante un transformador para alimentar la placa Arduino. Además, incluye un relé para la interacción con actuadores de corriente alterna, y cuenta con componentes adicionales como un transistor y una resistencia para la adaptación entre Arduino y el relé.

B. Evaluación

La evaluación de esta asignatura consta de dos partes diferenciadas: la teoría y los laboratorios.

La parte teórica se evalúa mediante un examen cuyos contenidos se seleccionan tanto de las sesiones de aula como de las sesiones de laboratorio. Este examen no tiene nota mínima y se realiza a mitad del cuatrimestre, momento en el cual las clases teóricas se transforman en clases de laboratorio para proporcionar al alumno más tiempo para gestionar las tareas del laboratorio.

La parte de laboratorio, que es la más significativa con un 60% de peso en la nota final, se evalúa de dos maneras distintas. En cada bloque, el alumno debe completar las tareas requeridas de la sección anterior, mostrándolas al profesor durante el horario de clases. Además, debe elaborar un informe de cada bloque donde explique de manera ordenada los pasos seguidos en cada tarea, así como la información adicional necesaria para la realización de algunos de los pasos durante los laboratorios. Tanto las tareas como los informes tienen el mismo peso en la evaluación. La nota de las tareas está condicionada, siendo necesario para alcanzar la máxima calificación que el alumno proponga tareas adicionales relacionadas con cada uno de los bloques.

C. Resultados

Los resultados obtenidos en esta asignatura son altamente positivos, como se evidencia en la tabla I, que presenta

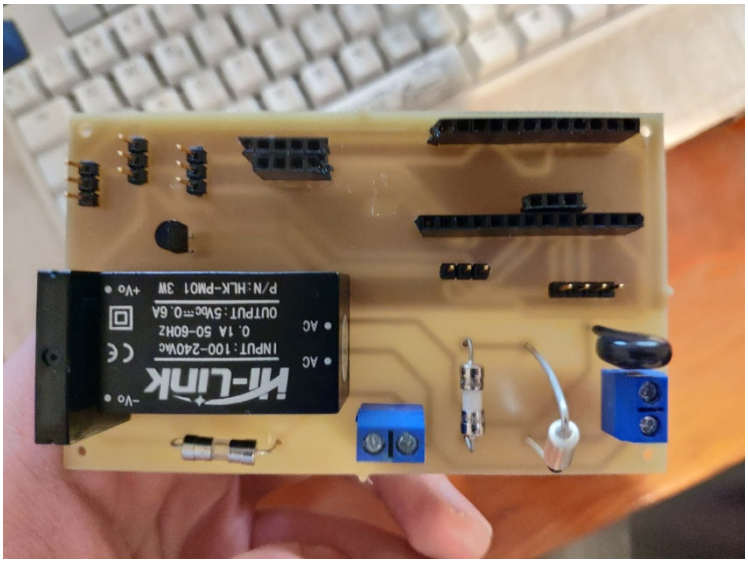


Fig. 4. PCB alumno - capa frontal

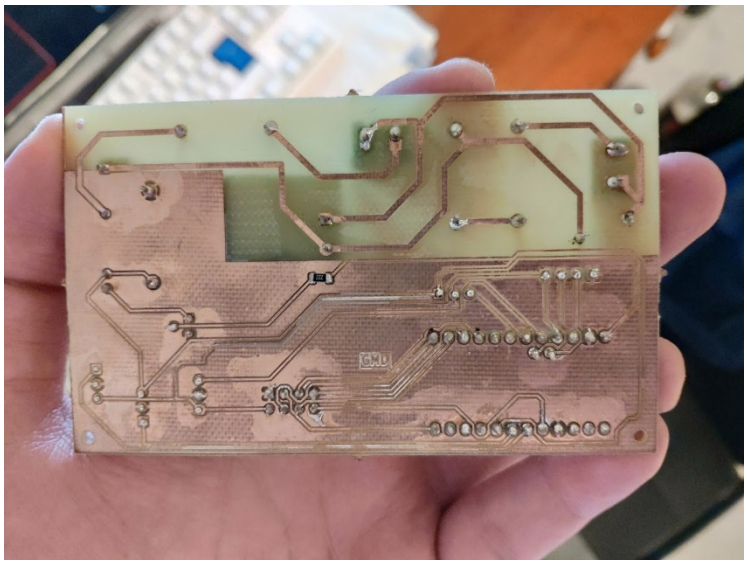


Fig. 5. PCB alumno - capa inferior

los datos de la metodología durante los últimos cinco años. Se destaca que la gran mayoría de los alumnos aprueba la asignatura. Aquellos que figuran como no presentados son aquellos que no han asistido durante el curso o que les faltan completar algunos bloques. Normalmente, el número de alumnos ausentes o que no completan ninguna tarea suele rondar entre 3 y 5 alumnos (en el curso 23-24, específicamente, solo 4 alumnos no presentaron ninguna tarea).

Es relevante mencionar que el número de no presentados en el curso 23-24 es elevado debido a que solo se tiene en cuenta la primera convocatoria, y se estima que este número se reduzca en las segundas y terceras convocatorias. En cuanto a otros datos significativos, este último curso 23-24 ha experimentado una disminución en el número de sobresalientes. Sin embargo, observando la dinámica de los años anteriores, esto podría considerarse un caso aislado, ya que aproximadamente un 10% de los alumnos alcanzan esta calificación en otros años. Como se mencionó anteriormente, los alumnos que no se presentaron en la primera convocatoria pueden terminar en categorías como Aprobados, Notables o Sobresalientes en la segunda o tercera convocatoria, lo que ajustaría las estadísticas.

También es relevante el número de matrículas de honor, las cuales siempre se otorgan el mayor número posible. Esto implica que un porcentaje de los alumnos realizan tareas propias para cada bloque, llegando así al máximo posible por bloque. Algunos de los ejemplos realizados en los últimos años son:

1) Realizar la seguridad de MySensors con el chip AT-

TABLE I
ESTADÍSTICAS ACADÉMICAS

Curso Académico	*No Presentados*	*Suspensos*	*Aprobados*	*Notables*	*Sobresalientes*	*Matrículas Honor*
2019-20	4.55% (2)	0.0%	27.27% (12)	45.45% (20)	18.18% (8)	4.55 (2) %
2020-21	17.95% (7)	0.0%	20.51% (8)	46.15% (18)	12.82% (5)	2.56 (1) %
2021-22	32.26% (10)	0.0%	12.90% (4)	41.94% (13)	9.68% (3)	3.23 (1) %
2022-23	19.57% (9)	0.0%	17.39% (8)	47.83% (22)	10.87% (5)	4.35 (2) %
2023-24*	37.25% (19)	0.0%	19.60% (10)	35.29% (18)	3.92% (2)	3.92(2) %

* datos únicamente de primera convocatoria.

SHA204A e incorporarlo al diseño de la PCB.
2) Realizar una PCB especifica para controlar una cafetera de forma remota a través de MySensors.
3) Un prototipo con Arduino para controlar un motor a través del LDR permitiendo el subir y bajar persianas.
4) Un prototipo para identificar Fase y Neutro en alterna.
5) Una PCB especifica para un TFG utilizando para ello un chip SMD de un ESP32.

Antes de finalizar la asignatura, se entrega un formulario a los alumnos para que puedan dar su opinión de manera anónima sobre los aspectos que más han disfrutado y aquellos que consideran menos relevantes. Los últimos años muestran un abrumador número de experiencias positivas en relación con los bloques de laboratorio dos y tres, el sistema IoT y el diseño de la PCB. Sin embargo, también se observa que muchos alumnos consideran que el primer bloque se superpone con material ya impartido durante la carrera, lo que reduce su interés en esa parte del curso.

Otro factor relevante es el número de Trabajos Fin de Grado derivados de esta asignatura, siendo todos ellos proyectos IoT aplicados al mundo real. Muchos de ellos se trabajan a través de maquetas para una versión de un prototipo, como podrían ser:

1) Un sistema para detectar el número de plazas libres en un parking y derivando los datos a la nube para su consulta a través de una APP para smartphones.
2) Un sistema para el control de un invernadero.
3) Un sistema para el completo control de una vivienda.

IV. CONCLUSIÓN

La conclusión por parte de los docentes de esta asignatura es positiva, se observa que una amplia mayoría de los alumnos cumple los objetivos, y muchos de ellos aportan ideas nuevas y diseños propios. Esto ha propiciado que muchos alumnos de esta asignatura continúen realizando un Trabajo Fin de Grado en esta línea con alguno de los docentes que la imparten.

Además, tras revisar la opinión generalizada de los alumnos, se ha decidido que a partir del curso 2024-25 se eliminará el bloque uno de la parte de laboratorio, dejándolo como material de referencia para los alumnos. Esto permitirá concentrar más esfuerzos docentes en los otros dos bloques que han recibido una mejor respuesta por parte del alumnado.

REFERENCES

[1] J. Bará, J. Domingo, and M. Valero, "Técnicas de aprendizaje cooperativo (ac) y aprendizaje basado en proyectos (abp)," *Taller de formación*, 2011.

[2] "MySensors," 2024. [Online]. Available: https://www.mysensors.org/

[3] "Espressif-ESP32," 2024. [Online]. Available: https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32

[4] "Espressif-ESP8266," 2024. [Online]. Available: https://www.espressif.com/en/products/socs/esp8266

[5] "openHAB," 2024. [Online]. Available: https://www.openhab.org/

[6] "Home Assistant," 2024. [Online]. Available: https://www.home-assistant.io/

[7] "Domoticz," 2024. [Online]. Available: https://www.domoticz.com/

[8] "Arduino," 2024. [Online]. Available: https://www.arduino.cc/

[9] "RaspberryPi," 2024. [Online]. Available: https://www.raspberrypi.com/

[10] "OrangePi," 2024. [Online]. Available: http://www.orangepi.org/

[11] "LPKF PCB prototyping," 2024. [Online]. Available: https://www.lpkf.com/en/industries-technologies/research-in-house-pcb-prototyping/products/lpkf-protomat

[12] "V-One," 2024. [Online]. Available: https://www.voltera.io/v-one

DEMOSTRADORES 2 – SESIÓN DE DEMOSTRADORES

Librerías y herramientas para el diseño de una Interfaz Gráfica en una pantalla táctil controlada por ESP32

Angel G. Gonzalez-Rodriguez
Dept. of Electronic Engineering and Automation
University of Jaén
Jaén, Spain
0000-0002-7461-9135
agaspar@ujaen.es

Erika Ottaviano
Dept. of Civil and Mechanical Engineering
University of Cassino and Southern Lazio
Cassino, Italy
0000-0002-7903-155X

Pierluigi Rea
Dept. of Mechanical, Chemical and Materials Engineering
University of Cagliari
Cagliari, Italy
0000-0003-0517-394X

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un conjunto de herramientas para ayudar en el diseño de una GUI en una pantalla táctil conectada a un microcontrolador, concretamente un ESP32. El conjunto de herramientas contiene las plantillas necesarias para la ubicación y configuración de los diferentes elementos que componen la interfaz, como polígonos, cuadros de texto editables, etiquetas, casillas de verificación, botones de radio y botones normales. Para los elementos responsivos, también permite la definición del tipo de interacción con el usuario: funciones de devolución de llamada, variables modificadas o textos ingresados. Para facilitar la tediosa tarea de diseñar una interfaz, se ha desarrollado una biblioteca para proyectos de escritorio, que puede ser compilada y depurada en una PC o Laptop y que permite probar el 95% de las funcionalidades de la interfaz, pero utilizando un entorno de desarrollo mucho más rápido y cómodo.

***Index Terms*—GUI, ESP32s, Interfaz Gráfica de Usuario, pantalla táctil, compilador cruzado, diseño amigable, C++**

I. Introducción

Gracias a la disminución de costos y la mejora en el rendimiento de las pantallas táctiles, estas se integran cada vez más en los sistemas embebidos. Esta tendencia ha sido facilitada por la mayor velocidad de las nuevas generaciones de microcontroladores de 32 bits, lo que permite tasas de refresco de pantalla más altas que aceleran la transición entre diferentes ventanas. Entre estos microcontroladores, dos de los más populares son el ESP32 y el STM32.

El primero es un sistema en chip (SoC) robusto y versátil desarrollado por Espressif Systems. Integra una CPU Xtensa LX6 de doble núcleo con capacidades de Wi-Fi y Bluetooth, lo que lo hace adecuado para una amplia gama de aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT), que van desde dispositivos para el hogar inteligente hasta sistemas de automatización industrial [1].

En cuanto al microcontrolador STM32, diseñado por STMicroelectronics, existe una amplia variedad de modelos adaptados a diversas necesidades de aplicación. Desde dispositivos de bajo consumo como la serie STM32L, ideales para sistemas operados con baterías, hasta modelos de alto rendimiento como la serie STM32H, adecuados para aplicaciones exigentes como el control de motores y el procesamiento de señales digitales. La serie de microcontroladores STM32 ofrece un soporte de depuración integral, incluyendo protocolos JTAG (Joint Test Action Group) o SWD (Serial Wire Debug) [2]. Esto permite una depuración eficiente de aplicaciones embebidas durante la fase de prototipado. Estas capacidades hacen de la serie STM32 una opción preferida entre los diseñadores de sistemas embebidos a nivel mundial.

Desde un punto de vista técnico, desarrollar una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) en una pantalla táctil no presenta una dificultad particular una vez que se ha establecido la comunicación con la pantalla tanto para dibujar como para capturar los eventos táctiles. Sin embargo, esto no niega la necesidad de un estudio metodológico de la organización de ventanas, la distribución de los componentes de interacción con el usuario, su posición, colores, filtrado de información mostrada o requerida, etc.

Shneiderman et al. en [3] delinean ocho reglas de oro para el diseño de interfaces y ofrecen pautas prácticas con ejemplos para facilitar la navegación de la interfaz a nuevos usuarios. Mientras tanto, Weyers et al. en [4] revisan los métodos formales existentes en la Interacción Humano-Computadora para la modelización, validación y simulación, como una

extensión de la GUI.

Aunque diseñar una interfaz de usuario no es particularmente desafiante desde una perspectiva de programación, es un proceso laborioso hasta que se logra un resultado que cumpla con los requisitos de diseño. Sin un asistente, los diseñadores deben definir desde cero la forma, posición y mecanismo de interacción de cada control a utilizar. Esto implica tiempo y esfuerzo adicionales al trabajo de programar la función de control que debe realizar el microcontrolador.

Además, generalmente son necesarias múltiples pruebas para verificar la apariencia y el correcto funcionamiento de cada elemento de la interfaz. Cada prueba requiere edición, compilación, carga y prueba. En caso de funcionamiento inesperado, se necesitan herramientas de depuración para localizar errores. Las herramientas comúnmente utilizadas para programar el ESP32, como Arduino IDE y VS Code + la extensión Platform IO, son engorrosas y requieren mucho tiempo para probar y depurar modificaciones en el código, lo que puede extender el proceso de diseño.

Una aplicación típica para las pantallas TFT controladas por microcontroladores es como un osciloscopio o analizador espectral, como se muestra en [5], donde los autores emplean una placa de desarrollo con un ATMega 328 y una TFT. De manera similar, se presenta un osciloscopio multifuncional en [6], utilizando un STM32F407 conectado a una TFT de 3.5 pulgadas con la GUI diseñada utilizando el sistema de soporte gráfico ucGUI.

Xu et al. en [7] conectan una pantalla TFT-LCD de 7 pulgadas y un microcontrolador de 32 bits MB91F599 para procesar y mostrar información valiosa de un vehículo. Ünsalan et al. en [8] utilizan una placa de desarrollo con un STM32F4 y una pantalla táctil para crear una GUI con la ayuda de TouchGFX, software proporcionado por STMicroelectronics para el diseño de GUIs.

Otra aplicación típica de GUIs usando microcontroladores es en domótica, como se demuestra en [9], que emplea un microcontrolador RX63N para controlar varios dispositivos como ventiladores, luces y televisores.

Actualmente, existen otras aplicaciones para ayudar en el diseño de interfaces, como LVGL [10], que ofrece más de 30 widgets integrados con una estética atractiva y código portátil a plataformas como STM32 o ESP32. En este último caso, permite crear un proyecto compatible con ESP-IDF accesible desde Visual Studio Code con la extensión PlatformIO (VSC+PIO), aunque sobre el framework ESP-IDF.

Otra opción es TouchGFX [11], un avanzado framework de software gráfico optimizado para microcontroladores STM32, que proporciona una galería de temas, fondos y elementos visuales listos para usar, distribuidos como una herramienta de software independiente. Finalmente, μGUI [12] permite el diseño y la simulación de GUIs y es compatible con cualquier sistema operativo comercial o propietario. Los diálogos se pueden guardar como archivos C, lo que dificulta el uso de programación orientada a objetos (OOP).

La biblioteca suministrada y explicada en este trabajo puede no ser tan ambiciosa en el conjunto de widgets suministrados como las aplicaciones mencionadas (carece por ejemplo de deslizadores, gráficos o medidores), o en su aspecto visual como TouchGFX. Sin embargo, puede ser añadida directamente al proyecto de C++ realizado por el usuario y está directamente asociada con herramientas de edición y compilación más ágiles, como el IDE de Visual Studio Community (VSCI). Esto permite una compilación robusta para una rápida visualización del aspecto de la interfaz y de las acciones basadas en eventos.

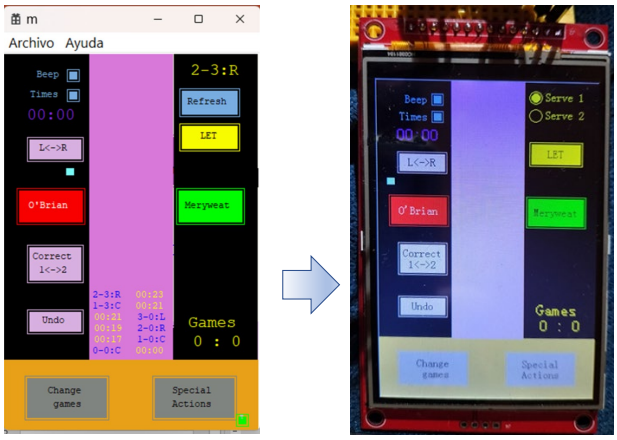


Fig. 1. A la izquierda, previsualización de la GUI (una de las ventanas) proporcionada por la herramienta de diseño/simulación. A la derecha, apariencia final de esta ventana, tal como se ve en la pantalla TFT física.

Las contribuciones de este artículo son las siguientes:

- Presentar una biblioteca de componentes que permitan a un programador de sistemas embebidos incorporar una interfaz a su proyecto.
- Describir un proyecto a modo de plantilla que pueda ser compilado y simulado en un IDE de programación en C++ para escritorio.
- Mostrar el procedimiento para transportar este proyecto a un proyecto listo para ser compilado y cargado en un microcontrolador, específicamente un ESP32.

Las bibliotecas, un ejemplo completo y una plantilla para ser modificada por el diseñador, están disponibles en [13].

El resto del artículo está estructurado de la siguiente manera: la Sección II describe el conjunto de componentes ofrecidos por la biblioteca propuesta; la Sección III describe la estructura del proyecto; la Sección IV presenta un ejemplo de GUI diseñada con este procedimiento; finalmente, la Sección V expone las conclusiones y discute algunos problemas observados durante la preparación del trabajo.

II. Componentes

Parte del diseño de la biblioteca de la GUI incluye la definición genérica de componentes o widgets proporcionados para su uso por el usuario en su diseño específico. Estos son los siguientes:

Etiqueta. Contiene una cadena de texto de una sola línea, sin posibilidad de cambio en tiempo de ejecución. Puede verse en todas las figuras de ejemplo (Figs. 2, 3, 4, y 5).

Vista de texto. Similar a una etiqueta, pero su contenido puede cambiarse en tiempo de ejecución. Soporta múltiples líneas (Figs. 4 y 5).

Botón. Componente responsivo que debe estar asociado, a través de una función de devolución de llamada asignada a una propiedad del componente, con la acción a realizar cuando se presiona el botón. De igual manera, puede verse en todas las figuras de ejemplo (Figs. 2, 3, 4, y 5). Su estado puede definirse como Habilitado/Deshabilitado y Visible/Invisible.

Caja de texto. Componente responsivo similar al botón, pero permite que el texto dentro de ella se extienda a múltiples líneas, ajustando la altura del botón según el número de líneas (Fig. 3).

Casilla de verificación. Componente responsivo con comportamiento booleano. Se puede definir si el texto acompañante aparece a la izquierda o a la derecha (Fig. 2).

Botón de radio. Componente responsivo que consiste en varios elementos seleccionables mutuamente excluyentes (Fig. 2).

Región coloreada. Simplemente un rectángulo coloreado, a menudo utilizado para diferenciar partes dentro de la misma ventana. Se define por las coordenadas XY del punto de definición y por la justificación aplicada; por ejemplo, si la justificación es centrada vertical y horizontalmente, XY corresponde al centro de la región, pero si la justificación es Superior-Izquierda, entonces XY corresponde a la esquina superior izquierda. Puede verse en todas las figuras de ejemplo (Figs. 2, 3, 4, y 5).

Mensaje de advertencia. Un mensaje emergente que requiere una respuesta inmediata del usuario antes de continuar con el comportamiento normal (Fig. 4).

En la Tabla I, se presentan las propiedades de cada componente. A continuación, se describe el significado de cada fila, con un enfoque particular en el significado del símbolo ✓:

- XY + Justificación: ✓si la posición del componente se da por las coordenadas X e Y junto con el tipo de justificación: izquierda, centro, derecha para horizontal; y arriba, centro (sin abajo) para vertical.
- Izquierda/Arriba: ✓si la posición del componente se da por las coordenadas izquierda y superior de la casilla de verificación o el primer botón de radio.
- Definición de tamaño:
  = *Texto* si el ancho y la altura se dan por las dimensiones de la cadena de texto;
  = *H/W* si se dan explícitamente;
  = *Texto/W* si la longitud se da explícitamente y la altura se calcula a partir del tamaño de la fuente.
- Posición del texto R/L: ✓si el texto puede ubicarse a la izquierda o derecha de la casilla de verificación.
- Tamaño de la fuente: ✓si se puede seleccionar el tamaño de la fuente.
- Texto modificable: ✓si el texto puede modificarse en tiempo de ejecución.
- Texto de una sola línea: ✓si solo se permite una línea.
- Texto multilínea: ✓si se permiten múltiples líneas.
- Habilitado (Sí/No): ✓si es posible habilitar o deshabilitar la capacidad de respuesta del componente, modificando así su color e impidiendo el evento de acción eventualmente asociado.
- Visible (Sí/No): ✓si es posible habilitar o deshabilitar la visibilidad del componente, también impidiendo el evento de acción asociado.

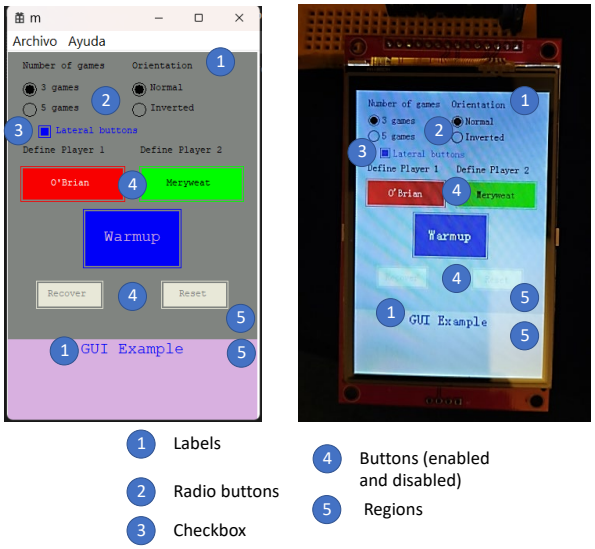


Fig. 2. Una ventana de la GUI definida por el usuario con regiones coloreadas, etiquetas, botones, una casilla de verificación y botones de radio.

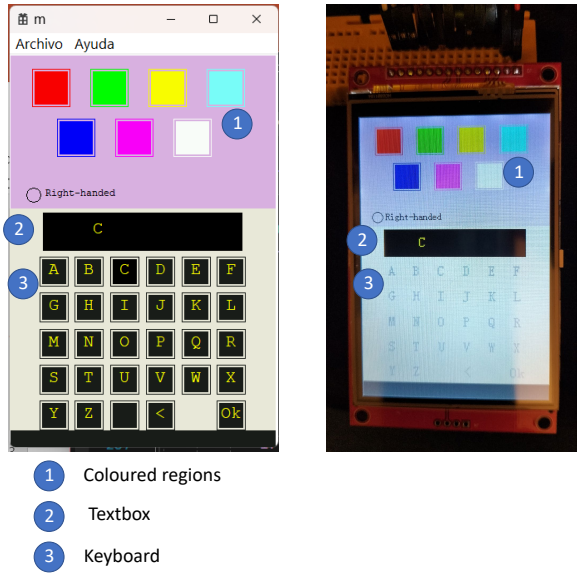


Fig. 3. Una ventana de la GUI definida por el usuario con cajas de texto, regiones coloreadas y el teclado.

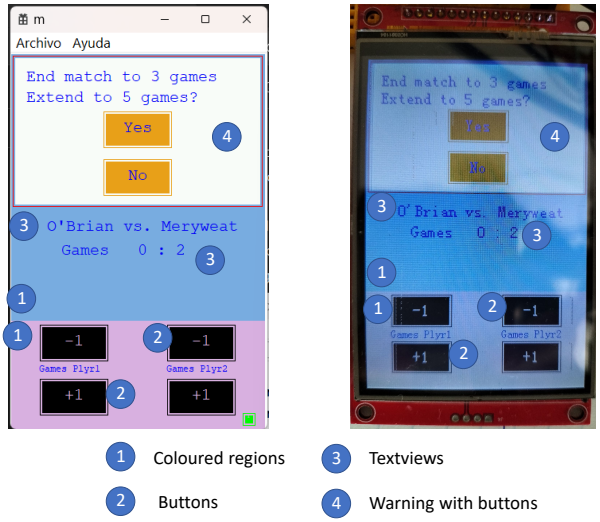


Fig. 4. Una ventana de la GUI definida por el usuario con un mensaje de advertencia con botones, regiones coloreadas, botones y vistas de texto.

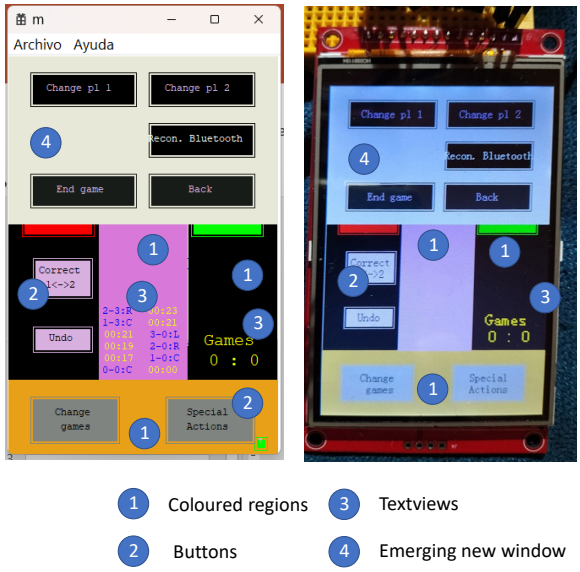


Fig. 5. Una ventana de la GUI definida por el usuario con una nueva ventana emergente con botones.

- Color del texto: ✓si es posible seleccionar el color del texto.
- Color de fondo: ✓si es posible seleccionar el color de fondo del componente.
- Acción: ✓si el componente tiene un evento de acción asociado cuando se presiona.
- Propiedad adicional:
  = *ancho y alto anteriores* si estos valores se almacenan para una eliminación más eficiente;
  = *está marcado* para recuperar el estado de una casilla de verificación;
  = *selección* para recuperar qué botón de radio está seleccionado.

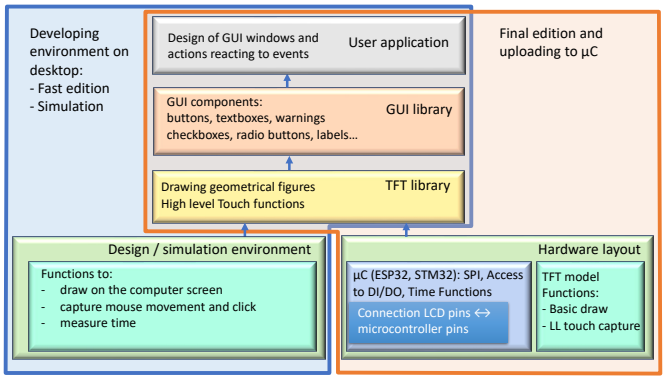


Fig. 6. Estructura de los dos proyectos organizados en layouts: a la izquierda, delineado en azul, jerarquía de layouts para el proyecto en VSCI para el diseño y simulación; a la derecha, delineado en marrón, jerarquía para el proyecto en VSC+PIO para los ajustes finales y la carga en el microcontrolador.

La advertencia y el mensaje emergente no están incluidos en la tabla. Para su definición, se deben asignar dos cadenas de texto, el número de botones que contiene la advertencia y los textos que acompañan a cada botón.

III. Estructura de los proyectos

Como se mencionó anteriormente, diseñar una interfaz es laborioso y requiere numerosas pruebas para ajustar posiciones, tamaños, colores, distribución de funciones entre las diferentes ventanas, comportamiento ante eventos, etc. Realizar todas las pruebas necesarias para lograr el resultado final deseado demanda una cantidad significativa de tiempo de compilación y depuración de errores. En el caso de plataformas como STM32, la depuración es posible y los tiempos de compilación y carga son moderados. Sin embargo, para plataformas como Arduino o ESP32, estos tiempos son mucho más largos y la depuración no es factible para la mayoría de los modelos. En cualquier caso, se requiere una conexión al microcontrolador físico, y desde este hacia la pantalla táctil, lo que a menudo introduce errores adicionales debido a la posibilidad de desconexión de cables si no se trabaja con un prototipo ya ensamblado.

Por todo esto, la utilización de una herramienta de desarrollo cruzado más ágil y rápida resulta muy conveniente para reducir tiempo y esfuerzo en el diseño y puesta a punto de una GUI. En este trabajo, se proporciona una herramienta en forma de una biblioteca junto con una plantilla de diseño y ejemplos con dos proyectos: uno para ser compilado y ejecutado desde VSCI, y otro para ser compilado y descargado desde VSC+PIO.

Como se muestra en la Figura 6, ambos proyectos comparten la biblioteca de figuras geométricas (resaltada en amarillo) y funciones de alto nivel para capturar posiciones táctiles (o selección con ratón). En la figura, esta se etiqueta como la biblioteca TFT. La biblioteca de figuras geométricas utiliza funciones básicas de dibujo y relleno para dibujar y rellenar (si es posible) líneas, círculos, triángulos y rectángulos. Las funciones de alto nivel para capturar posiciones táctiles trans-

TABLE I
RESUMEN DE PROPIEDADES DE LOS COMPONENTES

	Etiqueta	Vista de Texto	Botón	Caja de Texto	Casilla de Verificación	Botón de Radio	Región
XY + Justificación	✓	✓	✓	✓			✓
Izquierda/Arriba					✓	✓	
Definición de tamaño	Texto	Texto	H/W	Texto/W	Texto	Texto	H/W
Posición del texto					Derecha/Izquierda		
Tamaño de la fuente	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Texto modificable		✓	✓	✓	✓	✓	
Texto de una sola línea	✓		✓	✓	✓		
Texto multilínea		✓		✓		✓	
Habilitado (sí/no)			✓	✓	✓	✓	
Visible (sí/no)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Color del texto	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Color de fondo			✓	✓			✓
Acción			✓	✓	✓	✓	
Propiedad adicional	anchura y altura previas				seleccionado	selección	

forman las coordenadas de la pantalla según lo dado por el hardware (pulsación de TFT o ratón) en coordenadas XY teniendo en cuenta desplazamientos o rotaciones.

La biblioteca GUI (resaltada en salmón) se construye sobre esta biblioteca con la definición genérica de los componentes descritos en la Sección II.

Esta biblioteca es utilizada por la capa superior (en gris), que contiene la aplicación específica del usuario junto con la definición de cada ventana de la GUI. Las figuras mostradas en este trabajo están relacionadas con un marcador de squash, que es la aplicación específica del usuario utilizada como ejemplo. Esta será la única capa que el usuario necesita modificar una vez que se defina la plataforma objetivo y la pantalla TFT a utilizar. Específicamente, esta biblioteca ha sido probada en un microcontrolador ESP32 y se está preparando para STM32 (modelos STM32F103 en un *Blue pill* y STM32F407 en un *Black pill*), utilizando una pantalla TFT con pantalla táctil, modelo 3.5inch SPI Module ILI9488 SKU:MSP3520 [14].

A un nivel más bajo, la biblioteca TFT se apoya en diferentes funciones, que son diferentes para el entorno de diseño y el de carga. En relación al entorno de diseño en VSCI, se han creado o adaptado varias funciones para dibujar píxeles y rellenar rectángulos en la pantalla del PC, gestionar la captura del clic del ratón y medir tiempos. En cuanto al entorno de compilación y carga usando VSC+PIO, se debe definir lo siguiente:

Microcontrolador

- Funciones para escribir y leer salidas y entradas digitales respectivamente.
- Funciones para gestionar el SPI.
- Funciones para medir milisegundos y esperar retrasos.

Además, el diseñador debe especificar qué pines del microcontrolador están conectados a los pines de la TFT.

Modelo TFT

- Funciones para la configuración e inicialización de la TFT según las instrucciones dadas por el fabricante.
- Funciones básicas para dibujar píxeles y rellenar rectángulos.
- Funciones básicas para capturar posiciones táctiles de la pantalla TFT.

Estas funciones se han adaptado a partir de otras similares obtenidas de [14].

La organización en capas permite su reutilización en diferentes microcontroladores y pantallas TFT.

1) Estructura del programa GUI: En este trabajo, se ha programado la estructura que sirve como base para el diseño de la GUI. Esta estructura comprende las bibliotecas mencionadas anteriormente, *TFT library* y *GUI library*. Utilizando estas, el diseñador de la GUI puede codificar su propia interfaz, añadiendo acciones a realizar, por ejemplo, al presionar los botones.

Para facilitar la creación de una nueva GUI, se han añadido archivos de plantilla que serán modificados por el diseñador según sus requisitos. En el proyecto, estos archivos se denominan `Template_window1.cpp`, `Template_window2.cpp`, junto con el archivo de encabezado `includes_template.h`. A continuación, se mostrarán los detalles más significativos de estos archivos. Una explicación detallada del código está fuera del alcance de este trabajo. El listado completo se puede encontrar en [13].

2) Contenido de los archivos fuente del usuario: El diseñador debe modificar el contenido de los archivos `Template_windowX.cpp` y, opcionalmente, también sus nombres.

A continuación se muestra un ejemplo de fragmento de código que permite al diseñador incluir los botones necesarios y configurar su apariencia y acción asociada. Como se puede ver, hay indicaciones de las partes del código que pueden ser modificadas por el diseñador.

```
/* - DEFINICIONES DE COMPONENTES PARA ESTA GUI
    ----*/
static button_t THESE_BUTTONS[] =
{
```

```
  // ------- Comienzo del codigo de usuario
      ---------
  {action_1_window1, (u8*)"Bt1_W1", {Center, 70,
      100, 100, 40, YELLOW}, BLACK, 16, ENABLED,
      VISIBLE},
  {action_2_window1, (u8*)"Bt1_W1", {Center, 70,
      150, 100, 40, ORANGE}, BLACK, 14, ENABLED,
      VISIBLE},
  {action_3_window1, (u8*)"Bt1_W1", {Center, 220,
      135, 140, 60, PURPLE_RED}, BLACK, FONT24,
      ENABLED, VISIBLE}
// ------------ Fin del codigo de usuario
    ------------
};

typedef enum
{
  // ------- Comienzo del codigo de usuario
      ---------
  en_wd1_bt_1,
  en_wd2_bt_1,
  // --------- Fin del codigo de usuario
      --------
} THESE_ENUM_BUTTONS;
```

Lógicamente, las acciones asociadas con los botones, en este caso, `action_X_window1`, deben ser definidas o declaradas previamente. Por ejemplo, si al presionar el botón `Bt1_W1` se dirige a `Window2`, entonces el evento se codificaría de la siguiente manera:

```
void action_1_window1(void)
{
  Launch_window2();
}
```

donde, en este caso, `Launch_window2` es la función principal dentro del archivo `Template_window2.cpp` que gestiona la apariencia y el comportamiento de la interfaz para esta ventana. Las instrucciones en esta función son comunes a cualquier ventana, y el usuario solo necesita modificar su nombre, como se muestra en el siguiente fragmento.

```
// -------- Comienzo del codigo de usuario  ----
// Modificar el nombre de la funcion a su
    conveniencia
void Launch_window2()
{
  // ------ Fin del codigo de usuario  --------
  UPDATE_ACTIVE_WINDOW;

  Reset_numbers_GUI();

  // Inicializar botones

  gui.buttons = THESE_BUTTONS;
  gui.num_buttons = sizeof(THESE_BUTTONS) / sizeof
      (button_t);

  ... Codigo analogo para los otros componentes
      ...

  Detect_void_arrays(gui);

  Operations_pre_initialize();
  Initialize_active_window();
  Operations_post_initialize();
}
```

Al final de este fragmento de código, se llaman tres funciones. La segunda es responsable de dibujar los componentes y no debe ser modificada. Las funciones primera y tercera determinan las operaciones a realizar antes y después de dibujar los componentes y, si es necesario, pueden ser modificadas por el usuario.

3) Contenido del archivo main.cpp: Al editar el proyecto en VSC+PIO para la compilación y carga en el microcontrolador, es necesario modificar el nombre de la función que inicia la primera ventana de la GUI. A continuación se muestra el archivo `main.cpp`:

```
#include "includes_TFT.h"
#include "includes_GUI.h"
// ---------------- Comienzo del codigo de usuario
    --------------
#include "includes_Template.h"
// 1ra ventana de la GUI
#define LAUNCH_FIRST_WINDOW_OF_MY_GUI()
    Launch_window1()
// ----------------- Fin del codigo de usuario
    ---------------

void SPI_Init(void) {
  SPI.begin();
  SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
  SPI.setDataMode(SPI_MODE0);
  SPI.setFrequency(80000000);
}
void setup() {
  SPI_Init();
  LCD_Init();
  TP_Init(); // Calibrar la pantalla tactil

  LAUNCH_FIRST_WINDOW_OF_MY_GUI();
}

void loop() {
  TP_Scan(true);
  if (Get_TP_status() & TP_PRES_DOWN) {
    point16 pt16;
    Get_TP(&pt16);
    if (pt16.x < LCD_WIDTH && pt16.y < LCD_HEIGHT)
        {
      Manage_touch(pt16);     }
  } else     {
    Sleep(10);
  }
}
```

4) Contenido del archivo principal del proyecto VSCI: El nombre de este archivo dependerá del nombre dado al proyecto. Su contenido es más extenso y no se mostrará aquí. En cualquier caso, su contenido no debe ser modificado, excepto para asignar la primera función que se llamará para lanzar la primera interfaz, con un fragmento de código similar al visto para `main.cpp`.

```
// ---------------- Comienzo del codigo de usuario
    --------------
#include "includes_Template.h"
// 1ra ventana de la GUI
#define LAUNCH_FIRST_WINDOW_OF_MY_GUI()
    Launch_window1()
```

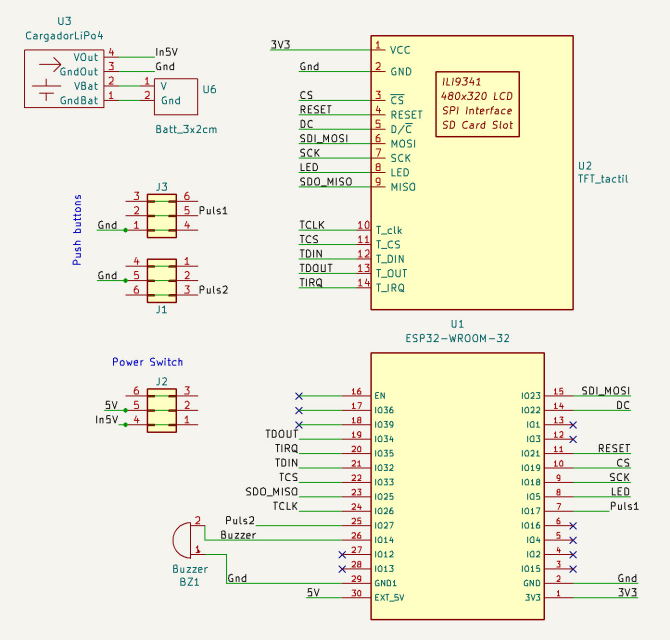


Fig. 7. Esquema de las conexiones entre un microcontrolador ESP32 y una pantalla táctil de 3.5 pulgadas 480x320 con un controlador ILI9341/9488

```
// ----------------- Fin del codigo de usuario
    ---------------
```

IV. Prueba en una Aplicación Real

Este proyecto combinado (dentro de los entornos de diseño/simulación y compilación/carga) ha sido probado para crear una interfaz que gestione un marcador para partidos de squash. La aplicación permite definir las características del partido, los detalles de los jugadores, el conteo de tiempo y el registro de resultados (puntos y sets), entre otras funcionalidades. Las diversas ventanas se han mostrado en las Figuras 2, 3, 4, y 5. El código de la aplicación se puede encontrar en [13].

La Figura 7 muestra el esquema (editado con KiCAD) para las conexiones que se deben hacer entre un microcontrolador ESP32 y una pantalla táctil de 3.5 pulgadas 480x320 con un controlador ILI9488.

En el esquema también se incluye un cargador de batería alimentado desde un puerto mini USB, un alojamiento para una batería LiPo de 3.7V y un interruptor de encendido. Para la aplicación específica del marcador de squash, también se incluyen dos botones pulsadores y un zumbador. Los archivos fuente junto con el esquema y el diseño de la PCB están disponibles en [13].

V. Conclusión

En este trabajo se ha presentado la estructura de dos proyectos que aceleran significativamente el proceso de diseño de una GUI utilizando un microcontrolador y una pantalla táctil. Estos proyectos comparten una biblioteca de controles o widgets para el diseño de la interfaz. Uno de los proyectos, dentro del entorno VSCI, facilita el diseño de la interfaz y su simulación de comportamiento. Posteriormente, el diseño y las funcionalidades programadas por el usuario se transfieren a otro proyecto, en el entorno VSC+PIO, que permite la compilación final y la carga en el microcontrolador físico.

El proyecto se demuestra para un microcontrolador ESP32 y una pantalla táctil con un controlador ILI9488. Sin embargo, la estructura en capas de las bibliotecas permite el uso de otros componentes de hardware. De hecho, este proyecto se desarrolló inicialmente para STM32, lo que indica que la plantilla propuesta puede utilizarse con casi cualquier microcontrolador (lo suficientemente rápido), aunque es necesario modificar las funciones y `defines` descritos en el bloque *Hardware layout* en la Figura 6.

El resultado de este trabajo se proporciona como dos proyectos disponibles en el repositorio [13], con un ejemplo de un marcador de squash y una plantilla casi vacía lista para ser personalizada por el usuario.

Para una aplicación no trivial, como en este caso, el uso de una herramienta de compilación más ágil, con capacidades de simulación, ha resultado en un ahorro de tiempo significativo en comparación con lo que se habría logrado si toda la codificación se hubiera hecho directamente en el microcontrolador conectado a la TFT. Esta capacidad para depurar, ejecutar y mostrar en un entorno de escritorio es la principal cualidad de la herramienta propuesta en comparación con otras soluciones existentes. La principal desventaja es su conjunto limitado de controles o widgets y la falta de una aplicación paralela para posicionar componentes en el lienzo de diseño con el ratón.

Otra desventaja de una aplicación GUI es el tiempo requerido para refrescar la pantalla o cambiar el estado de un botón o área. Este tiempo es necesario, independientemente de la herramienta utilizada para diseñar la GUI, aunque el tiempo tomado será mayor cuanto mayor sea el número de píxeles involucrados, con un límite inferior en el caso de refrescar toda la pantalla. En el caso de redibujar solo un botón o área, la utilidad propuesta está diseñada para aislar el rectángulo a redibujar para minimizar el tiempo de redibujo. Durante este tiempo, no será posible realizar ningún tipo de control a menos que se lleve a cabo utilizando interrupciones temporizadas (como es habitual en el control continuo) o interrupciones externas.

Para trabajos futuros, se considera la inclusión de widgets adicionales, por ejemplo, para mostrar gráficos, así como completar la adaptación a STM32, particularmente en lo que respecta al protocolo SPI.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Universidad de Jaén, como parte del Plan de Innovación y Mejora Docente PIMED-UJA 2019-2023 (convocatoria PIMED-UJA 2022).

References

[1] V. Pravalika, C. R. Prasad *et al.*, "Internet of things based home monitoring and device control using esp32," *International Journal of Recent Technology and Engineering*, vol. 8, no. 1S4, pp. 58–62, 2019.

[2] F. Wang, W. Z. Lou, M. R. Guo, and Y. F. Lu, “Intelligent logistics monitoring microsystem based on stm32,” *Key Engineering Materials*, vol. 645, pp. 896–899, 2015.
[3] B. Shneiderman, C. Plaisant, M. Cohen, S. Jacobs, N. Elmqvist, and N. Diakopoulos, *Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction*, 6th ed. Pearson, 2016.
[4] B. Weyers, J. Bowen, A. Dix, and P. Palanque, *The Handbook of Formal Methods in Human-Computer Interaction*. Springer Cham, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-51838-1
[5] F. Dragan, R. Holonec, and R. Copindean, “Data acquisition system with tft graphic interface,” in *Acta Electrotehnica 94*, M. S. Publisher, Ed., 2014.
[6] X. Zhou, Y. Tian, J. Shi, N. Zhao, and Y. Yang, “Design of low-power portable multi-function digital oscilloscope,” in *2021 IEEE 4th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*, vol. 4, June 2021, pp. 2101–2105. [Online]. Available: 10.1109/IMCEC51613.2021.9482318
[7] Y. Xu, S. Yin, J. Yu, and H. R. Karimi, “Design of a tft-lcd based digital automobile instrument,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014, p. 549790, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1155/2014/549790
[8] C. Ünsalan, H. D. Gürhan, and M. E. Yücel, *LCD, Touch Screen, and Graphical User Interface Formation*. Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 415–454. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-88439-0_11
[9] N. P. Gireesh and Deepa, “Designing hmi using rx series rx63n microcontroller,” in *2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, May 2017, pp. 1049–1053. [Online]. Available: 10.1109/RTEICT.2017.8256759
[10] LVGL (light and versatile graphics library). Accessed March 2024. [Online]. Available: https://docs.lvgl.io/master/intro/index.html
[11] TouchGFX documentation, 2024. Accessed March 2024. [Online]. Available: https://support.touchgfx.com
[12] μGUI. Accessed March 2024. [Online]. Available: https://embeddedlightning.com/ugui/
[13] A. Gonzalez, E. Ottaviano, and P. Rea, “GUI ESP32,” Mendeley Data, V1, 2024. [Online]. Available: 10.17632/k6ckh38bj5.1
[14] (2021) 3.5inch SPI module ILI9488 SKU:MSP3520. Accessed March 2024. [Online]. Available: http://www.lcdwiki.com/3.5inch_SPI_Module_ILI9488_SKU:MSP3520

Codificación de un Grafcet en un uC ESP32 siguiendo la norma 60848

Angel G. Gonzalez-Rodriguez
Dept. of Electronic Engineering and Automation
University of Jaén
Jaén, Spain
0000-0002-7461-9135
agaspar@ujaen.es

Erika Ottaviano
Dept. of Civil and Mechanical Engineering
University of Cassino and Southern Lazio
Cassino, Italy
0000-0002-7903-155X

Pierluigi Rea
Dept. of Mechanical, Chemical and Materials Engineering
University of Cagliari
Cagliari, Italy
0000-0003-0517-394X

Jose Vicente Muñoz Díez
Dept. of Electronic Engineering and Automation
University of Jaén
Jaén, Spain
0000-0001-6190-7077

Este estudio comienza presentando las ventajas de emplear GRAFCET para definir procesos discretos controlados por un microcontrolador, particularmente un ESP32, y su idoneidad para manejar procesos simultáneos. Aunque existen trabajos previos sobre la codificación de un GRAFCET simple en plataformas como Arduino o STM32, pasan por alto la implementación de temporizadores, estructura jerárquica y otros recursos avanzados incluidos en la norma IEC 60848. A lo largo de este estudio, se mostrarán procedimientos para implementar los principales recursos encontrados en la resolución de automatismos discretos usando GRAFCET , cada uno acompañado por un pequeño ejemplo ilustrativo. De este modo, se pone a disposición del estudiante una herramienta que permite a codificar cualquier GRAFCET siguiendo la norma IEC 60848. Esta herramienta puede ser muy útil para estudiantes que estén desarrollando un trabajo de fin de título con microcontroladores en que se requieran dos hilos de trabajo, como sería el caso de un sistema de control con interfaz de usuario.

***Index Terms*—GRAFCET, ESP32s, norma 60848, temporizador, encapsulamiento, macro-etapa, orden de forzado, acciones memorizadas**

I. Introduction

La utilidad de GRAFCET como herramienta para definir y resolver automatismos discretos es bien conocida, al ofrecer una descripción visual simple de las secuencias de proceso y facilitando la implementación de múltiples hilos de trabajo simultáneamente de manera natural.

Un ejemplo es el caso de los sistemas embebidos con interfaz de usuario, para los que es deseable no perder el control del sistema mientas se atiende a la interacción con el usuario. En este caso, un grafcet(se escribirá en minúsculas en lo sucesivo) representa la mejor alternativa a los sistemas en tiempo real. A esto se añade el hecho de ser una herramienta sistemática para describir resolver automatismos discretos. A pesar de esto, los grafcetsno son empleados generalmente por los estudiantes en sus trabajos de fin de título, presumiblemente debido a la falta de guías para transladarlos a lenguajes propios de un microcontrolador.

La norma IEC 60848 (en adelante ”60848”) [1] representa un avance en términos de normalización, ya que permite que las acciones y transiciones representadas en el grafcet sean codificadas de manera inequívoca en la mayoría de los casos, permitiendo a casi cualquier plataforma de programación la codificación de un grafcet

Esta Norma Internacional establece el lenguaje de especificación grafcet para describir el comportamiento funcional del componente secuencial dentro de un sistema de control. Describe los símbolos y las normas que rigen la representación gráfica de este lenguaje, junto con las directrices para su interpretación.

Como componente esencial de la representación de proyectos a gran escala, también abarca la descripción de estructuras que permiten la jerarquización, estructuración y documentación del código, como son las órdenes de forzado, encapsulamientos y macro-etapas.

Sin embargo, actualmente no se conoce ningún método para traducir de manera completa e inequívoca un grafcet a cualquier lenguaje de programación. La implementación práctica de esta norma revela numerosas ambigüedades e imprecisiones, especialmente al tratar con estructuras jerárquicas, etapas transitorias y acciones almacenadas.

Como se señala en [2], una definición ambigua de la especificación 60848 puede llevar a comportamientos diferentes si diferentes autores han interpretado la ambigüedad de diversas maneras. Una fuente de esta imprecisión es cuando la misma condición aparece como la transición en etapas consecutivas, o después de una secuencia de etapas fugaces. Provost en

University of Jaen.

[3] presenta un pseudocódigo que sólo permite activar una transición en un ciclo de ejecución, lo que resuelve esta ambigüedad. Esta restricción generalmente no es preocupante cuando el tiempo de ejecución (típicamente microsegundos o pocos milisegundos) es mucho más rápido que los tiempos entre apariciones de eventos [4].

Basándose en trabajos previos para formalizar y evaluar las fuentes de imprecisión en la norma, se han publicado diversos trabajos presentando métodos para generar automáticamente código para PLC conforme con esta norma. Sin embargo, la mayoría de ellos sólo consideran subclases con elementos muy básicos de un grafcet no jerárquico y sin temporizadores, como indica Schumacher en [5]. Este autor, sin embargo, aborda estructuras más complejas descomponiéndolas en básicas.

La norma IEC 61131-3 (en adelante referida como "61131-3") [6] es más específica en los detalles de codificación de diferentes lenguajes de programación, principalmente SFC. A partir de la tercera edición, incluye características orientadas a objetos (OO) como clases y bloques de funciones. Este paradigma OO también es utilizado por una serie de trabajos que proporcionan métodos para codificar grafcets siguiendo las directrices de esta norma [7].

A pesar de la idoneidad de esta herramienta para resolver procesos discretos, su uso está limitado a la programación PLC y raramente se encuentra en la codificación de sistemas embebidos, excepto para procesos muy simples. Por ejemplo, Comlan [8] lo utiliza con un Arduino, Puxan [9] para una plataforma genérica, y en [10] se utiliza un dsPic. En [11], se introduce la posibilidad de traducir instrucciones IL definidas en 61131-3 a lenguaje ensamblador para MCS-51, AVR y STM32, aunque sin profundizar en las especificaciones de grafcet definidas en 60848.

Las contribuciones generales de este trabajo son las siguientes:

- Proponer acciones para cerrar la brecha entre esta norma e IEC 61131-3 [6].
- Proporcionar una herramienta, en forma de un proyecto reutilizable de C++ con una plantilla, que permite la codificación de cualquier grafcet siguiendo la norma IEC 60848. En este trabajo, se ha probado en un microcontrolador ESP32.
- Ofrecer ejemplos con estructuras avanzadas que comprenden todos los recursos descritos en la norma. El código correspondiente también se pone a disposición como ejemplos en C++ para usar como plantillas para aplicaciones definidas por el usuario.

Con estos ejemplos, se han revisado todas las características descritas en la norma:

- Elementos y estructuras básicas: etapas, transiciones, acciones continuas, subprocesos simultáneos, selección de subprocesos, entradas/salidas digitales.
- Eventos de entrada y eventos internos como detección de flanco ascendente/descendente de variables binarias.
- Acciones memorizadas: asignación de valores a variables, acción en activación, acción en desactivación.

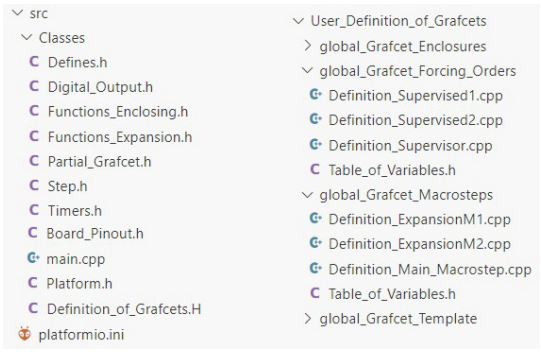


Figura 1. Lista de archivos para el proyecto editado en Visual Studio Code + PlatformIO.

- Temporizadores en el formato t1/sc/t2, como se especifica en la norma IEC 60848, y utilizados en transiciones o acciones condicionadas. Aunque no están descritos en la norma, también se han implementado temporizadores de tipo TON, TOF y TP, que aparecen en niveles más detallados de descripción (como el incluido en la norma 61131-3), pero que pueden servir como puente de conexión, si es necesario, con lenguajes de programación ya establecidos.
- Estructuras jerárquicas: etapas encapsulantes + encapsulamientos, macro-etapas + expansiones, y órdenes de forzado de un grafcet a diferentes situaciones (explícita, actual, vacía e inicial).

El resto del documento se organiza de la siguiente manera: la Sección II describe la estructura del proyecto que implementa un grafcet; la Sección III explica tres ejemplos de grafcet global (GG) con relaciones jerárquicas y recursos avanzados; finalmente, en la Sección IV se presentan las conclusiones del trabajo.

II. Estructura del Proyecto que Implementa un Grafcet

En esta sección, se presenta la estructura de un proyecto que implementa un grafcet siguiendo las directrices de la norma 60848. El código se puede encontrar en el repositorio [12], con un proyecto muy básico como plantilla y tres ejemplos más complejos que se explicarán en la Sección III. La estructura del proyecto se lista en la Figura 1.

Aunque el significado de los numerosos términos utilizados en este trabajo se explica en [1], antes de describir la herramienta propuesta, conviene definir tres conceptos:

grafcet conectado (GC) Estructura en la que siempre hay una continuidad de enlaces (alternancia de etapas y transiciones) entre cualquier par de elementos, etapa o transición, en el diagrama grafcet.

grafcet parcial (GP) Conjunto de uno o más GCs que representa una tarea diferenciada de las demás.

grafcet global (GG) Conjunto de uno o más PGs que representan la operación de una automatización discreta controlada por una única unidad de control programada.

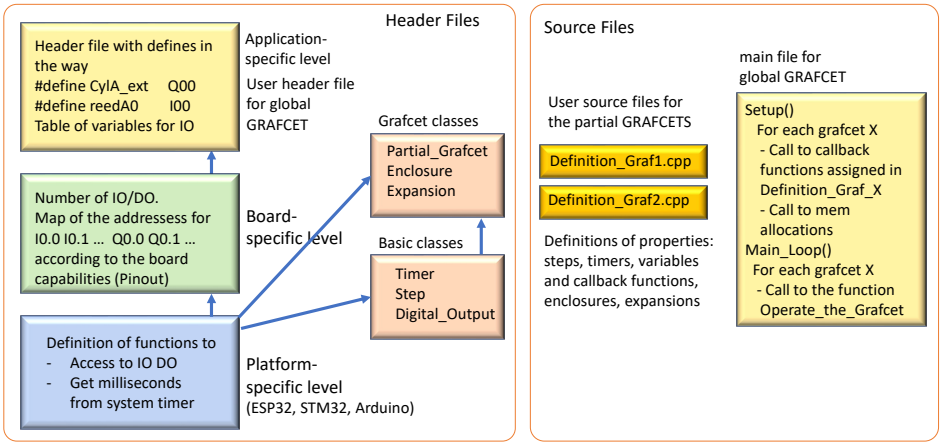


Figura 2. Estructura de un proyecto implementando los GPs de un GG. Los bloques en amarillo claro son los correspondientes a los GPs. Los bloques en amarillo intenso son los que contienen la tabla de variables y el archivo principal, ambos para el GG.

II-A. Capas Genéricas y Archivos que Componen el Proyecto del Usuario

Cada proyecto ha sido probado en un microcontrolador ESP32. Para que el código pueda reutilizarse para otro microcontrolador (Arduino o STM32), se ha establecido una capa inferior que puede modificarse para otra plataforma, permitiendo así la reutilización de las capas superiores. Esto corresponde a la capa azul en la Figura 2, y está programado en el archivo `Platform.h`.

Encima se encuentra otra capa (en verde en la figura) que se apoya en la capa de la plataforma, y que es específica para las conexiones de la placa en la que se monta el microcontrolador. Se encuentra en el archivo `Board_Pinout.h`. .

Basado en estas capas, se han creado varias clases (en color salmón). Por razones de espacio, no se muestran en su totalidad, pero se encuentran disponibles en [12]. Son las siguientes:

`partial_Grafcet` Para definir y operar cada GP.
`DO` Para la asignación de salidas digitales.
`Timer` Para definir y consultar los temporizadores.
`Step` Creado para facilitar las conexiones a encapsulamientos y expansiones.

No se ha creado una clase para las entradas digitales ya que su manejo es más sencillo, reducido a asociar un `#define`.

Tampoco se han creado clases heredadas para encapsulamientos y expansiones como tipos particulares de GPs debido a problemas con referencias circulares. En su lugar, se ha creado una clase única para todos los tipos de GPs, con métodos divididos en tres archivos sólo para fines de documentación: `partial_grafcet.h`, `Functions_Expansion.h` y `Functions_Enclosing.h`, como se ve en la Figura 1. Un aspecto importante de este proyecto es que hay una única clase `partial_grafcet`, de la cual se crean tantas instancias como GPs haya en el GG del usuario. Lógicamente, la evolución, asignación de salidas, asignación de temporizadores, etc., es diferente para cada GP. Esto obliga al uso de *callback functions* para que, por ejemplo, la función `Assign_outputs_this_grafcet()` se defina en el archivo fuente del usuario, y el nombre de esta función se pase como parámetro al método `Callback_assign_outputs()`, que será llamado en cada ciclo de operación de la máquina del objeto GP.

```
Procedure main
  // common to any app
  // DIs can be treated as defines
  Declaration of global DOs
  Declaration for required grafcets
  (graf1 and graf2)

  Procedure Setup
    // common to any app
    Configure_Inputs()
    Configure_Outputs()
    // specific to my app
    graf1 = Defin_Grafcet1()
    graf2 = Defin_Grafcet2()
  End Procedure

  Procedure Main_Loop
    // specific to my app
    graf1.Operate()
    graf2.Operate()
  End Procedure
```

```
Procedure Operate
  if is_freezed
    if ∃Assign_particular_outputs
      Assign_particular_outputs()
    end
    return
  end

  Analyze_transitions()

  Timer_definitions()

  Analyze_enclosures()

  Analyze_expansions()

  Assign_outputs()

End Procedure
```

Figura 3. Estructura del archivo principal y la función de operación que se llama cíclicamente

Siguiendo con esta función como ejemplo, para definir una función `Assign_outputs_this_grafcet()` diferente para cada GP, se debe añadir el modificador `static` en su definición para que no interfiera con otras definiciones hechas en otros archivos.

Estos archivos son parte del proyecto y, una vez elegida la plataforma y el enrutamiento para acceder a los pines del microcontrolador, no deben ser modificados.

A continuación, se explican los archivos específicos para el GG que se va a codificar.

II-B. Código Específico Requerido para la Definición de un GRAFCET Global

La Figura 1 muestra una lista de archivos que definen varios GGs, aunque sólo un GG está habilitado a la vez.

Como se muestra, cada GG requiere su propia *Tabla de Variables* especificada en el archivo con el mismo nombre. Una vez hecho esto, debe definirse cada GP que forma parte del GG. En consecuencia, el ingeniero de control debe codificar todas las funciones específicas que definen el comportamiento del GP (por ejemplo, el mencionado `Assign_outputs_this_grafcet()`), así como sus etapas, temporizadores y variables adicionales. Para esto, el usuario debe cambiar el contenido de los siguientes archivos:

`Table_of_Variables.h`
Permite la definición de mnemotécnicos para nombrar las diferentes entradas y salidas. Es equivalente a la asignación de direcciones de DI y DO de la tabla de variables de un proyecto PLC. En este caso, el nombre puede mantenerse.

`Definition_GrafX.cpp`
Si n_{gp} es el número de GPs, debe haber n_{gp} archivos. El sufijo `GrafX` puede ser sustituido por el nombre del GP. En este archivo se incluyen los siguientes elementos:

- Nombres para los etapas y para los temporizadores del GP.
- Las funciones internas que se utilizarán como *callback functions*, definidas para codificar las siguientes tareas:
  - Evolución del grafcet, analizando las transiciones.
  - Asignaciones de salida, analizando las acciones vinculadas a los etapas.
  - Definiciones de temporizadores.
  - Asignación de expansiones a macro-etapas.
  - Asignación de encapsulamientos a cada etapa encapsulante.
  - Definición de comportamiento en caso de congelación debido a una orden de forzado.

`main.cpp`
Es el archivo principal, e incluye lo siguiente (ver Figura 3):

- `#include` para los archivos de cabecera genéricos de niveles inferiores.
- Declaración de los n_{gp} punteros a objetos para cada GP.
- Declaración de los objetos correspondientes a todas las salidas digitales.
- Declaración de las n_{gp} funciones con la definición de los GPs.
- Funciones para configurar entradas y salidas.
- Una función de configuración que incluye:
  - Llamadas a las funciones anteriores para configuración de DI/DO.
  - Llamadas a las n_{gp} funciones definiendo los GPs, y n_{gp} asignación al correspondiente puntero a objeto.
- Un bucle sin fin, que llama cíclicamente a las n_{gp} funciones que operan los GPs.

Tal como se ve en el pseudocódigo, la operación de los GPs se ejecuta cíclicamente en el procedimiento principal (Main_Loop). No existen de forma inherente (y el programador no debe incluir por su cuenta) esperas del tipo `while (condicion){ --- }` ni instrucciones del tipo `Delay()` o `Sleep()`. Con esto, la ejecución de las instrucciones del grafcet no requieren más de escasos milisegundos. Esto tiene una importante implicación en términos de tiempo de muestreo, dado que no *ancla* la ejecución del programa en ningún estado, ni requiere del empleo de ninguna interrupción adicional. Esto permite la ejecución de otras tareas de control continuo por ejemplo utilizando una interrupción temporizada, o la inclusión de un *Watch dog Timer* para comprobar que no se pierde el control en ningún momento. También facilita la comunicación a través de protocolos serie.

III. Grafcets Globales Implementados con la Herramienta Propuesta

A continuación, se presentan tres ejemplos que cubren todos los elementos recogidos por la norma IEC 60848. Se presentan en orden de complejidad.

III-A. Grafcet global con macro-etapas

En la Figura 4 se muestra un grafcet global sencillo con interruptor (Start_man) de marcha/parada que contiene dos macro-etapas. Las expansiones correspondientes se desarrollan en diferentes GPs, que se reducen al movimiento de vaivén de dos cilindros, uno controlado por una electroválvula biestable y el otro por una monoestable. En el lado derecho, se muestra el pseudocódigo para un fragmento de la evolución de la tarea del principal grafcet, en el que se ha extraído únicamente la parte que corresponde a la definición de la operativa de las expansiones.

Este ejemplo utiliza los siguientes recursos:

- Temporizadores TON, como una expresión simplificada del temporizador genérico TON_TOF.
- Electroválvulas monoestables y biestables.
- Gestión de la expansión de macro-etapa: inicialización, consulta de su finalización y desactivación.

Este GG ha sido programado y se encuentra en el repositorio [12] bajo la carpeta llamada `global_Grafcet_Macrosteps`, que contiene los siguientes archivos:

- `Definition_ExpansionM1.cpp` para el GP 1.
- `Definition_ExpansionM2.cpp` para el GP 2.
- `Definition_Main_Macrostep.cpp` para el GP 0, el principal.

Las expansiones de macro-etapa tienen un comportamiento parecido a los encapsulamientos, que se analizarán posteriormente. Sin embargo, a diferencia de estos, deben permitir una forma de indicar desde la expansión que la última etapa ha sido activada y una función para desactivarla desde el GP invocante. Esto no es necesario para la definición de las encapsulamientos.

III-B. Control Jerárquico con Órdenes de Forzado

El grafcet global se muestra en la Figura 5. El grafcet principal desde el punto de vista funcional es el 2, en el cual se ejecuta un bucle de operaciones con cilindros coordinados. El GP 0, jerárquicamente superior, controla su puesta en marcha y permite una parada al final del ciclo (Stop EoC). Este grafcet, mediante el forzado de la inicialización del GP 1, también controla la parada al final de la iteración (Stop_EoI). Los

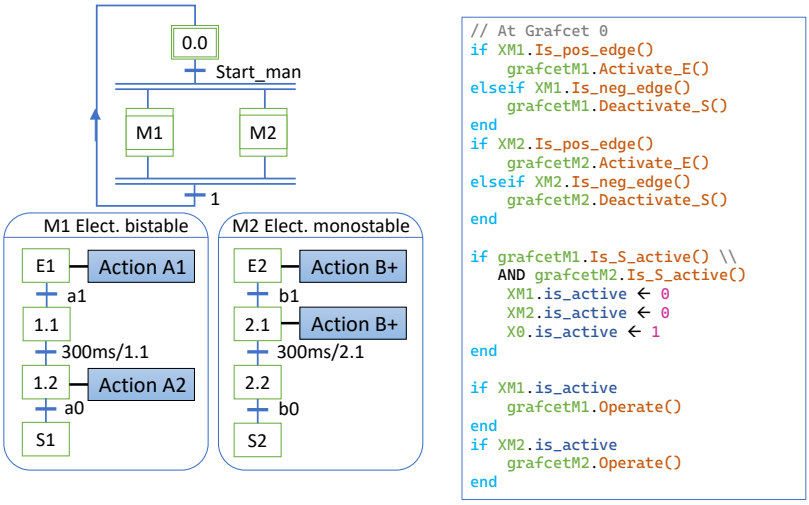


Figura 4. Ejemplo de GG con macro-etapas. A la derecha, un extracto del pseudocódigo que gestiona la interacción entre GPs.

botones de parada deben ser normalmente cerrados (NC) por seguridad, de modo que detengan el proceso en caso de rotura de cable o desconexión accidental de dicho pulsador. A la derecha, se muestra el pseudocódigo de los fragmentos que describen las acciones específicas a realizar para gestionar las órdenes de forzado: en el GP 0 se fuerza la congelación del GP 2 y la inicialización del GP 1; en el GP 1 se ejecuta su propia inicialización; y en el GP 2 se describe cómo se realiza su propia congelación.

Este ejemplo utiliza los siguientes recursos:

- Temporizadores y contadores. La temporización es equivalente a SL de la norma IEC 61131-3 como acción X2.0. Dado que esta temporización no está recogida en la 60848, se ha implementado mediante la etapa 2.1 y una transición sumidero.
- Electroválvulas monoestables y biestables.
- Uso de contactos NC para operaciones de parada.
- Transiciones consultando el estado de etapas de otro GP.
- Acción en activación y Acción en desactivación.
- Etapas fuente y transiciones sumidero.
- Órdenes de forzado de GPs a diferentes situaciones (explícita y actual).

Este GG ha sido programado y se encuentra en el repositorio [12] bajo la carpeta llamada `global_Grafcet_Forcing_orders`, conteniendo los siguientes archivos:

- `Definition_supervised1.cpp` para el GP 1.
- `Definition_supervised2.cpp` para el GP 2.
- `Definition_supervisor.cpp` para el GP 0, que es el supervisor.

III-C. Control Jerárquico con Etapas Encapsulantes

Como se muestra en la Figura 6, el grafcet principal desde una perspectiva funcional es el GP 1, que comprende dos grafcets conectados. Dentro de ellos se ejecuta un bucle típico de operaciones para una mesa rotativa. En el primer sector, hay un alimentador de piezas; en el último, la pieza es extraída; y en los intermedios, se mecaniza a través de distintas acciones (desde 0 a 4) que no están definidas pero podrían corresponder, por ejemplo, a movimientos de un taladro para el perforado de una pieza. El GP 0, jerárquicamente superior, controla su puesta en marcha y parada, que debe implementarse con un contacto NC. Hay un contador que cuenta el número de piezas fabricadas en general, que puede ser reiniciado. Este ejemplo utiliza los siguientes recursos:

- Contadores
- Uso de contactos NC para operaciones de parada.
- Acción en activación y Acción en desactivación.
- Acción en evento. En la norma IEC 60848 y en la bibliografía consultada, su condición siempre aparece como un flanco aunque, como se muestra en este caso, no es necesario.
- Transiciones fuente y transiciones sumidero.
- Gestión de etapas encapsulantes (en este caso, etapa encapsulante inicial): activación de los encapsulamientos con el flanco ascendente de la etapa encapsulante, ya sea inicializando los encapsulamientos, o activando sus etapas con enlaces de activación; y operación de los mismos.
- Estructuras de líneas de montaje con varios puntos de ejecución simultánea en una estructura secuencial. Esta es una versión alternativa a los procesos simultáneos realizados a través de divergencia-convergencia en Y. Requieren una señal de sincronización, generalmente en forma de un flanco, que en este caso es el fin de la rotación de una mesa rotativa.

Es importante señalar que una transcripción adecuada de un grafcet que repite la misma condición en dos transiciones consecutivas puede llevar a una evolución transitoria y comportamiento inestable de la etapa ubicada entre ellas. Si la condición es de tipo nivel, esta situación será inevitable y dificultará el correcto funcionamiento de la cadena. Si es un evento de entrada desencadenado por una condición activada

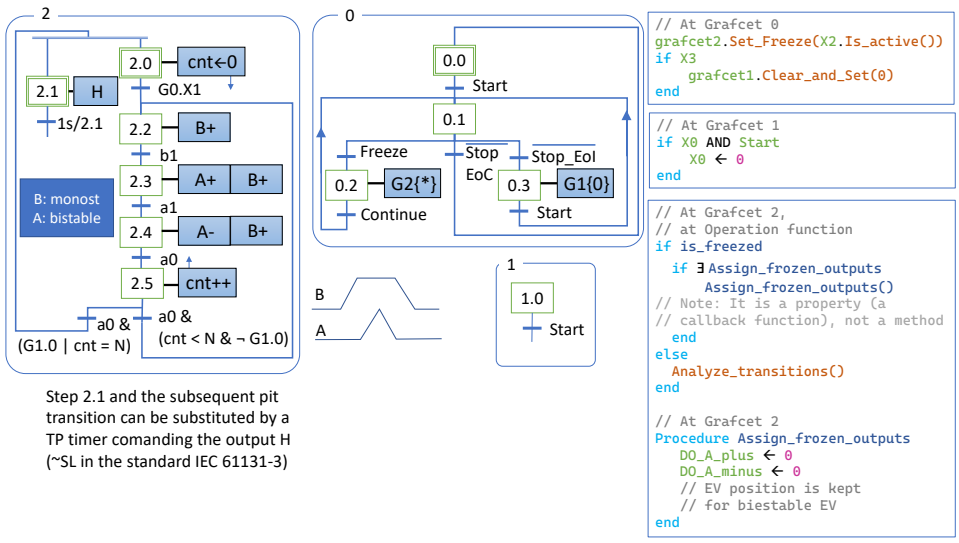


Figura 5. Ejemplo de GG con Órdenes de Forzado. A la derecha, un extracto del pseudocódigo que gestiona la interacción entre GPs.

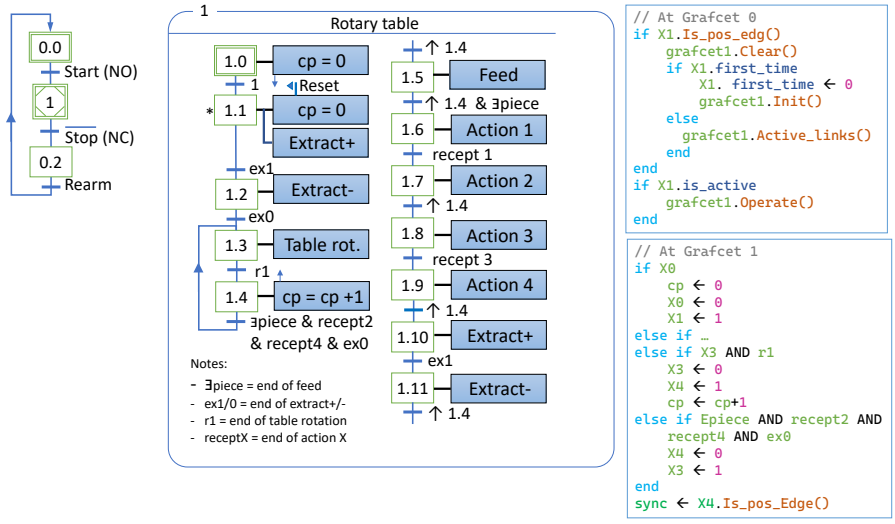


Figura 6. Ejemplo de GG con etapa encapsulante y sus correspondientes etapas encapsuladas (en este caso sólo una). A la izquierda, extracto del pseudocódigo que gestiona la interacción entre GPs

por flanco, como se muestra en la figura (lo usual en este tipo de grafcets), es necesario recordar la regla 5: *Si durante la operación, una etapa activa es simultáneamente activada y desactivada, permanece activa*. A efectos prácticos, esto implica analizar el conjunto de transiciones de este grafcet conectado como una secuencia
`if { } else if { } ... end_if`,
evitando el uso de secuencias
`if { } end_if ... if{ } end_if`.

Este GG ha sido programado y se encuentra en [12] bajo el nombre de carpeta `global_Grafcet_Enclosures`, conteniendo los siguientes archivos:

- `Definition_Enclosure.cpp` para el GP con los encapsulamientos
- `Definition_Enclosing.cpp` para el GP con la etapa encapsulante

IV. Conclusión

La idea original de este trabajo era facilitar un método sistemático para traducir la semántica de grafcet en código de lenguaje C++ que pueda incorporarse en cualquier microcontrolador, específicamente el ESP32.

Desde un punto de vista académico, con estas guías el grafcetde cualquier automatismo discreto diseñado como parte de un trabajo de fin de título puede ser fácilmente incluido por el estudiante en un sistema embebido.

Debido a la naturaleza estructurada del lenguaje C++, el código resultante de implementar diferentes ejemplos termina siendo muy similar al lenguaje estructurado ST, excepto por reglas de edición específicas que, en el caso del lenguaje

estructurado ST, están más cercanas a PASCAL. Consecuentemente, los autores consideran que este trabajo contribuye al diseño de un método sistemático para traducir el modelo de grafcet definido en la norma IEC 60848 a lenguaje estructurado. Sin embargo, también se han descubierto algunas deficiencias en la norma que necesitan ser especificadas para que dicha traducción sea completa y sin ambigüedades.

Otra limitación de la norma es la falta de explicación sobre la utilidad de los macro-etapas y las etapas encapsulantes como medios para lograr la jerarquía en los grafcets.

Con la norma IEC 61131-3, hay un intento de definir sistemáticamente la semántica de varios lenguajes textuales y gráficos para capturar la evolución y operación de un grafcet. Como se mencionó, la norma 60848 sufre de imprecisiones, pudiendo dar lugar a una codificación ambigua del grafcet. Esto supone una brecha entre las dos normas. Este trabajo apunta a identificar estas fuentes de imprecisión y proporcionar soluciones para ellas.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo ha sido subvencionado por la Universidad de Jaén, como parte del Plan de Innovación y Mejora Docente PIMED-UJA 2019-2023 (convocatoria PIMED-UJA 2022).

REFERENCIAS

[1] International Organization for Standardization, "IEC 60848:2019 - general principles of reliability for structures," International Organization for Standardization, International Standard ISO 60848, 2019.

[2] R. Mross, A. Schnakenbeck, M. Völker, A. Fay, and S. Kowalewski, "Unambiguous Interpretation of IEC 60848 GRAFCET based on a Literature Review," *IEEE Int. Conf. Emerg. Technol. Fact. Autom. ETFA*, vol. 2023-September, pp. 1–9, 2023.

[3] J. Provost, J.-M. Roussel, and J.-M. Faure, "Translating grafcet specifications into mealy machines for conformance test purposes," *Control Engineering Practice*, vol. 19, no. 9, pp. 947–957, 2011, special Section: DCDS'09 – The 2nd IFAC Workshop on Dependable Control of Discrete Systems. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066110002108

[4] P. Le Parc, D. L'Her, J. L. Scharbarg, and L. Marcé, "Grafcet revisited with a synchronous data-flow language," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part ASystems Humans.*, vol. 29, no. 3, pp. 284–293, 1999.

[5] F. Schumacher and A. Fay, "Formal representation of GRAFCET to automatically generate control code," *Control Eng. Pract.*, vol. 33, pp. 84–93, 2014. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.09.008

[6] International Electrotechnical Commission, "IEC 61131-3:2013 - programmable controllers - part 3: Programming languages," International Electrotechnical Commission, International Standard IEC 61131-3, 2013. [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/54076.html

[7] D. Witsch and B. Vogel-Heuser, "Close integration between UML and IEC 61131-3: New possibilities through object-oriented extensions," *ETFA 2009 - 2009 IEEE Conf. Emerg. Technol. Fact. Autom.*, pp. 1–6, 2009.

[8] M. Comlan, D. Delfieu, and N. Assogba, "Grafcet to Arduino: edit and upload grafcets on an arduino boards," *Int. Conf. Electr. Comput. Commun. Mechatronics Eng. ICECCME 2021*, no. October, pp. 1–6, 2021.

[9] O. Bayó-Puxan, J. Rafecas-Sabaté, O. Gomis-Bellmunt, and J. Bergas-Jané, "A GRAFCET-compiler methodology for C-programmed microcontrollers," *Assem. Autom.*, vol. 28, no. 1, pp. 55–60, 2008.

[10] G. Nzebop Ndenoka, E. Simeu, and R. Alhakim, "Efficient controller synthesis of multienergy systems for autonomous domestic water supply," *Revue Africaine de Recherche en Informatique et Mathématiques Appliquées*, vol. 24, no. Special issue CRI 2015, 2017. [Online]. Available: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01309417v3

[11] M. Chmiel, J. Mocha, E. Hrynkiewicz, and D. Polok, "About implementation of iec 61131-3 il operators in standard microcontrollers," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, no. 28, pp. 144–149, 2013, 12th IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015373146

[12] A. Gonzalez, E. Ottaviano, P. Rea, and J. V. Muñoz-Diez, "Implementing a GRAFCET following standard IEC-60848 in an ESP32," Mendeley Data, 2024.

Demostrador de WSAN ZigBee basado en plataformas de desarrollo y dispositivos domóticos comerciales

J. Borja Castillo Sánchez
Departamento de Tecnología Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
joscassan@uma.es

José M. Cano García
Departamento de Tecnología Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
jcgarcia@uma.es

Eva González Parada
Departamento de Tecnología Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
gonzalez@uma.es

Manuel Maestre Nadal
Departamento de Tecnología Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
manuelmaestrenadal@uma.es

***Abstract*— En este trabajo se propone el despliegue de una red de sensores y actuadores (WSAN) ZigBee con conectividad IoT, compuesta tanto por dispositivos domóticos comerciales como por plataformas de desarrollo para microcontroladores y microprocesadores. El objetivo es crear un demostrador que permita tanto ilustrar el funcionamiento de la tecnología ZigBee, como la implementación de aplicaciones utilizando las plataformas mencionadas y sus correspondientes herramientas de desarrollo. Las aplicaciones realizadas por los estudiantes podrán interactuar con los dispositivos domóticos comerciales integrados en el demostrador.**

Keywords*— *IoT, ZigBee, 802.15.4, Microcontrollers, SBC.

I. INTRODUCCIÓN

El rápido avance de los sistemas empotrados y las tecnologías inalámbricas ha permitido la irrupción de la IoT, que ofrece soporte a aplicaciones como la domótica, la automatización y la agricultura inteligente. Como contrapartida, esta evolución ha dotado a estos sistemas, y a sus herramientas de desarrollo, de una creciente complejidad que dificulta su utilización en el ámbito educativo. Los microcontroladores inalámbricos que se utilizan hoy en día en el desarrollo profesional pueden integrar numerosos periféricos especializados, y su *firmware* está compuesto por muy diversos módulos, incluyendo drivers de distinto nivel para los periféricos, un RTOS para gestionar la concurrencia, y varias pilas de protocolo, por lo que el estudio y utilización de estas plataformas puede llegar a ser difícil de abordar por estudiantes de electrónica de nivel de grado, e incluso de nivel de máster. La limitación temporal de las prácticas de laboratorio puede hacer que la funcionalidad de los proyectos que los estudiantes consigan desarrollar utilizando estos sistemas complejos sea limitada pese al esfuerzo que tienen que invertir, lo que les puede generar bastante frustración. Por otra parte, y gracias a iniciativas como Arduino, NodeRed, o Blockly, que persiguen acercar al gran público la electrónica y el desarrollo de software, hoy en día es posible crear aplicaciones IoT con una funcionalidad bastante completa y llamativa sin apenas conocimientos técnicos o incluso sin programar ("Zero-Code"). En este trabajo se presenta un demostrador de red de sensores y actuadores inalámbricos ZigBee que persigue ofrecer al estudiante una plataforma en la que pueda desarrollar ambas visiones, combinando el uso de herramientas alto nivel con plataformas y herramientas de desarrollo profesional y dispositivos comerciales reales para crear una aplicación IoT. El demostrador consta de una red ZigBee de dispositivos domóticos comerciales (bombillas, interruptores sensores de temperatura, controladores de climatización, medidores de calidad de aire) de diversos fabricantes, a la que se pueden agregar nodos basados en plataformas de desarrollo de Texas Instruments, Nordic Semiconductors y Espressif, en los que los estudiantes podrán implementar sus aplicaciones utilizando las correspondientes herramientas de desarrollo.

El demostrador se utiliza en docencia de asignaturas optativas de nivel de máster para ilustrar diversos conceptos del funcionamiento de un sistema IoT basado en ZigBee, así como en la realización de prácticas en las que los estudiantes deben desarrollar su propia aplicación utilizando esta tecnología en alguna de las plataformas de desarrollo mencionadas.

El resto del trabajo se estructura como sigue: En la sección II se definen los conceptos y términos más relevantes relacionados con la tecnología ZigBee que se persiguen ilustrar con el demostrador desarrollado o que son necesarios para entender su descripción. La sección III describe la arquitectura del demostrador desarrollado, y en la sección IV se muestran algunas de sus las capacidades. Finalmente, las conclusiones y líneas futuras se recogen en la sección V.

II. ZIGBEE Y 802.15.4

ZigBee [1] es un estándar que define un conjunto de protocolos para redes inalámbricas de área personal en bandas sin licencia, y está principalmente enfocado a sistemas que no requieran una tasa de datos muy alta pero que impliquen conectar un elevado número de dispositivos, algunos de ellos alimentados con batería. Entre sus aplicaciones principales destacan la domótica, y las redes de sensores y actuadores. La principal ventaja que presenta frente a otras tecnologías competidoras es que el estándar sí que contempla la formación de redes con un gran número de dispositivos y con encaminamiento multisalto, de forma que puede cubrirse un área más extensa mediante dispositivos de alcance radio limitado. Actualmente es una tecnología IoT que se encuentra bastante madura y para la que existen multitud de productos comerciales certificados, principalmente en el ámbito de la domótica.

Existe tradicionalmente cierta confusión entre *ZigBee* y el estándar IEEE 802.15.4 [2], que, aunque están relacionados no son términos equivalentes. El estándar *ZigBee* ha sido desarrollado y es mantenido por la *ZigBee Alliance*, que ha adoptado el estándar 802.15.4 del IEEE como implementación de los niveles inferiores de la pila de protocolo (capa física y control de acceso al medio). Sobre estos niveles, el estándar de ZigBee define y especifica el resto de protocolos de nivel

superior, necesarios para dar soporte a funciones como el enrutamiento o la búsqueda de servicios, sí son específicamente definidos y mantenidos por la propia ZigBee. La norma IEEE 802.15.4 no especifica el comportamiento de los protocolos de nivel superior al MAC, sino que por el contrario, está concebida para dar soporte a distintos estándares que definan estos niveles, como pueden ser *RF4CE*, *6LowPan* y *OpenThread*. Por otra parte, los dispositivos *ZigBee* no implementan o no utilizan todas las formas de comunicación previstas en el estándar IEEE 802.15.4, sino sólo un subconjunto de ellas. La pila de protocolos de *ZigBee* se muestra en la figura 1.

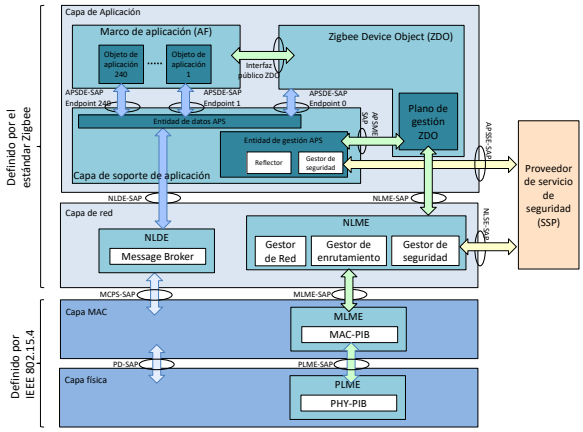


Figura 1. Pila de protocolos ZigBee.

A. Topologías de red y tipos de dispositivos

Tanto ZigBee como 802.15.4 definen diferentes tipos de tipos de nodos con distinta funcionalidad y capacidades de comunicación según el papel que desempeñan en la red (ver fig. 2). La nomenclatura definida por cada uno de los dos estándares es algo diferente, lo cual a veces puede llevar a cierta confusión. Atendiendo a sus capacidades de comunicación el estándar 802.15.4 define dos tipos diferentes de dispositivo, los que denomina dispositivos de funcionalidad completa o FFD (*Full Function Device*) y los que denomina de funcionalidad reducida o RFD (*Reduced Function Device*). Los dispositivos de funcionalidad completa (FFD) soportan todas las posibles capacidades de comunicación, pudiendo comunicarse con cualquier dispositivo en la red, y son capaces de asumir cualquiera de los diferentes papeles (o *roles*) que pueden desempeñar los dispositivos en la red. Por su parte, los dispositivos de funcionalidad reducida (RFD) poseen unas capacidades de comunicación más limitadas, ya que sólo pueden comunicarse con un dispositivo FFD. Esta diferenciación permite integrar en la red dispositivos con menores exigencias de capacidad de proceso, memoria y alimentación. En una red IEEE 802.15.4 los dispositivos pueden desempeñar tres roles diferentes: coordinador, coordinador PAN y dispositivo final. Un coordinador es un dispositivo de funcionalidad completa que es capaz de reencaminar mensajes (es decir, recibirlos y volverlos a transmitir hacia otro dispositivo). En las redes PAN (*personal area network*) definidas por IEEE 802.15.4, uno de los múltiples dispositivos coordinadores que pueden formar parte de la red PAN realizará las funciones de controlador principal de la red, recibiendo el nombre de coordinador PAN. Si un dispositivo únicamente recibe o transmite sus propios mensajes y no procesa los mensajes para los que no es fuente ni destino, entonces se trata de un dispositivo final. El papel de coordinador o coordinador PAN sólo puede ser desempeñado por los dispositivos FFD, mientras que el de dispositivo final puede ser interpretado tanto por un FFD como por un RFD. Evidentemente, los RFD sólo pueden actuar como dispositivos finales. Por su parte el estándar *ZigBee* define tres tipos de nodos: coordinador (*coordinator*), *router* y dispositivo final (*end device*), que se corresponden respectivamente con los dispositivos de tipo coordinador PAN (*PAN coordinator*), coordinador (*coordinator*) y dispositivo (*device*) de 802.15.4.

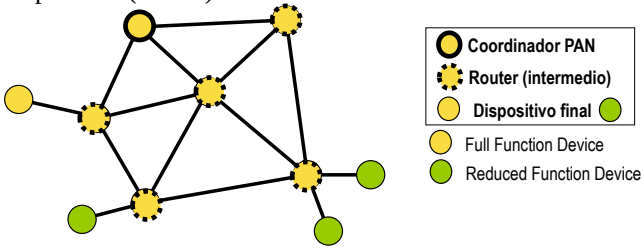


Figura 2. Topología y tipos de dispositivos en una red ZigBee/802.15.4

La organización de la red y los mecanismos para conseguir el encaminamiento de información entre nodos sin conexión directa, no son definidos por 802.15.4, pues corresponden a niveles superiores de la pila de protocolos. Los mecanismos de nivel de red implementados por *ZigBee* permiten una organización de la comunicación de la red en malla, con un mecanismo de búsqueda y actualización de rutas entre dispositivos *routers*. Sólo los dispositivos *routers* o coordinadores *ZigBee* pueden re-encaminar paquetes, mientras que los dispositivos finales sólo pueden comunicarse con un dispositivo padre (que debe ser un *router* o el coordinador). El coordinador ZigBee, que tiene la función de coordinador PAN 802.15.4, es el encargado de la formación de la red y de la asignación de direcciones a los dispositivos.

La topología en red mallada (con búsqueda de rutas entre nodos) requiere que los nodos *routers* y el coordinador deban permanecer con la radio activa (con la recepción habilitada) durante todo el tiempo y únicamente los nodos hoja (*end-device*) pueden entrar en modo de bajo consumo y permanecer con la radio apagada la mayor parte del tiempo. Esto último se consigue gracias a que la comunicación de los nodos *routers* o coordinadores con los nodos *end-device* implementa un mecanismo denominado "transmisión indirecta", según el cual los paquetes que tienen como destino un nodo *end-device* no se intenta enviar por su nodo padre inmediatamente tras estar disponible, sino que se almacena en una cola de transmisión a la espera de que el dispositivo final envíe un paquete de sondeo (*poll*) hacia el nodo padre. De esta forma el dispositivo final sólo necesita encender la radio en el momento de realizar el sondeo para extraer datos del dispositivo padre, quien sí permanece constantemente con la radio activa por ser un dispositivo de tipo *router* o coordinador. Para asegurar un correcto funcionamiento, los dispositivos finales deberán despertarse y sondear a su dispositivo padre cada cierto tiempo. El procedimiento de transmisión indirecta se ilustra en la fig. 3.

Tanto en las transmisiones indirectas entre los *routers* y los *end-devices*, como en las transmisiones directas entre *routers*, se emplea el mecanismo de acceso al medio basado en

CSMA/CA previsto por el nivel MAC de la norma 802.15.4, ya que al tratarse de un medio radio compartido es necesario establecer mecanismos para evitar colisiones.

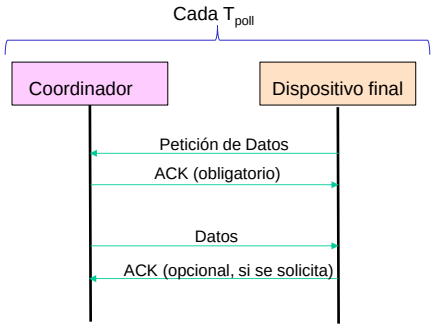


Figura 3. Mecanismo de transmisión indirecta

B. Enrutamiento

El procedimiento utilizado por *ZigBee* para determinar las rutas que deben seguir los paquetes en la parte mallada de la red está basado en el protocolo AODV [3]. El dispositivo que arranca el procedimiento difunde por la red, en modo *broadcast*, un paquete de solicitud de búsqueda (*route request*). Este paquete contiene un campo con el identificador de la petición y un campo de coste de camino, y es propagado por todos los dispositivos que lo reciben. El campo coste de camino vale 0 en origen, pero es incrementado por cada nodo que propaga el paquete sumándole el coste estimado del enlace por el que lo han recibido, de forma que conforme el paquete se va propagando por la red, en dicho campo se va acumulando el coste del camino seguido por cada copia. En cada dispositivo *router* en el que se reciba una copia de esta PDU se comprobará si en la tabla de descubrimiento de ruta ya hay una entrada con el mismo identificador y dirección origen, y la creará o actualizará en consecuencia. Un dispositivo puede recibir copias del mismo paquete de búsqueda por diferentes caminos, en cuyo caso irá actualizando la entrada de la tabla para almacenar los datos del paquete (coste y vecino por el que llegó) con menor coste acumulado. Las sucesivas copias que lleguen con un coste acumulado mayor que la entrada almacenada en la tabla se descartan y no seguirán siendo propagadas por la red. Cada vez que se actualice una entrada de la tabla de descubrimiento de ruta, el *router* debe actualizar la tabla de encaminamiento para incluir el vecino por el que ha llegado el paquete de solicitud de búsqueda de ruta como siguiente salto hacia la dirección que originó la petición.

En última instancia, los paquetes de búsqueda de ruta difundidas por la red deberían llegar también al nodo destino, informándole del coste acumulado de la ruta y de la dirección del primer salto de la misma en sentido inverso (el vecino que ha entregado el mensaje). Para confirmar que el camino encontrado funciona también a la inversa, el dispositivo destino responde entonces con el envío de un paquete de respuesta (*route reply*). Este paquete lleva como dirección destino la del nodo vecino que se ha seleccionado como siguiente salto en el camino hacia el nodo origen de la búsqueda de ruta, y como *payload* lleva la dirección de dicho dispositivo origen y el identificador de la petición de búsqueda. Este paquete es validado en cada uno de los nodos del camino mediante las tablas de encaminamiento y de búsqueda de ruta y retransmitido al siguiente salto hacia el nodo origen almacenado en la tabla de encaminamiento. El paquete *route reply* recorre por tanto de forma inversa la ruta óptima encontrada, confirmando que es correcta y actualizando las tablas de encaminamiento de cada uno de los nodos de la ruta para incluir la información del siguiente salto hacia el destino.

Si la dirección destino de un procedimiento de búsqueda de ruta es un nodo hoja, el dispositivo encargado de enviar el paquete de *Route reply* es su nodo padre. Como ya se ha mencionado, éste será también el encargado de recibir los mensajes unicast que se envíen hacia el hijo y almacenarlos a la espera de ser recogidos por el mecanismo de transmisión indirecta.

C. Servicios y perfiles de aplicación.

Los protocolos de nivel 4 de *ZigBee* (capa de soporte de aplicación o APS) permiten el envío seguro de información extremo a extremo y la multiplexación de varios flujos de comunicación entre los dispositivos. Cada dispositivo puede implementar varias aplicaciones de forma simultánea, por lo que para multiplexar el transporte de datos correspondiente a las diversas aplicaciones, la capa APS crea y asigna a cada objeto de aplicación un punto de acceso al servicio de transporte de datos (o *endpoint*) diferente. El concepto de *endpoint* en *ZigBee* sería por tanto algo parecido a lo que es el concepto de puerto en los protocolos TCP/UDP.

Para la implementación de los diferentes servicios de nivel de aplicación, el estándar de ZigBee sigue un modelo de tipo cliente-servidor y define una abstracción denominada "*cluster*". Cada *cluster* define un conjunto de atributos (datos que pueden ser de diferente tipo) y comandos. Los comandos deben ser ejecutados por el servidor en respuesta a las peticiones enviadas desde el cliente. Los atributos "residen" en el servidor y pueden ser escritos o leídos por los clientes mediante comandos de lectura o escritura, y en ocasiones pueden ser modificados mediante otro tipo de comandos. Por poner un ejemplo concreto del ámbito de la domótica, una bombilla podría implementar como servidor el cluster *On/Off*, cuyo atributo sería el estado (encendido/apagado) de la bombilla, y que se puede modificar desde otro dispositivo cliente (un interruptor, por ejemplo) mediante el envío de un comando de escritura (*write*) o un comando de encendido (*setOn*), de apagado (*setOff*) o de conmutación (*toggle).* Cada servicio *ZigBee* constaría de un conjunto de clústeres con sus correspondientes atributos y comandos. La *ZigBee alliance* ha definido diferentes servicios estandarizados (o perfiles de dispositivo), que determinan los clústeres que cada tipo de dispositivo debe implementar, y los atributos y comandos que cada uno de estos clústeres debe soportar, para dar soporte a una funcionalidad determinada garantizando la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes en el marco de la misma aplicación.

D. Operaciones de gestión de la red (commissioning)

El estándar *ZigBee* define diferentes procedimientos relacionados con el establecimiento y gestión de la red y las comunicaciones entre los dispositivos que son citados frecuentemente en la documentación técnica y que es necesario definir:

- La formación de la red (*network formation*) corresponde normalmente al coordinador en el caso de que la red sea de seguridad centralizada, aunque la pueden realizar también los dispositivos de tipo

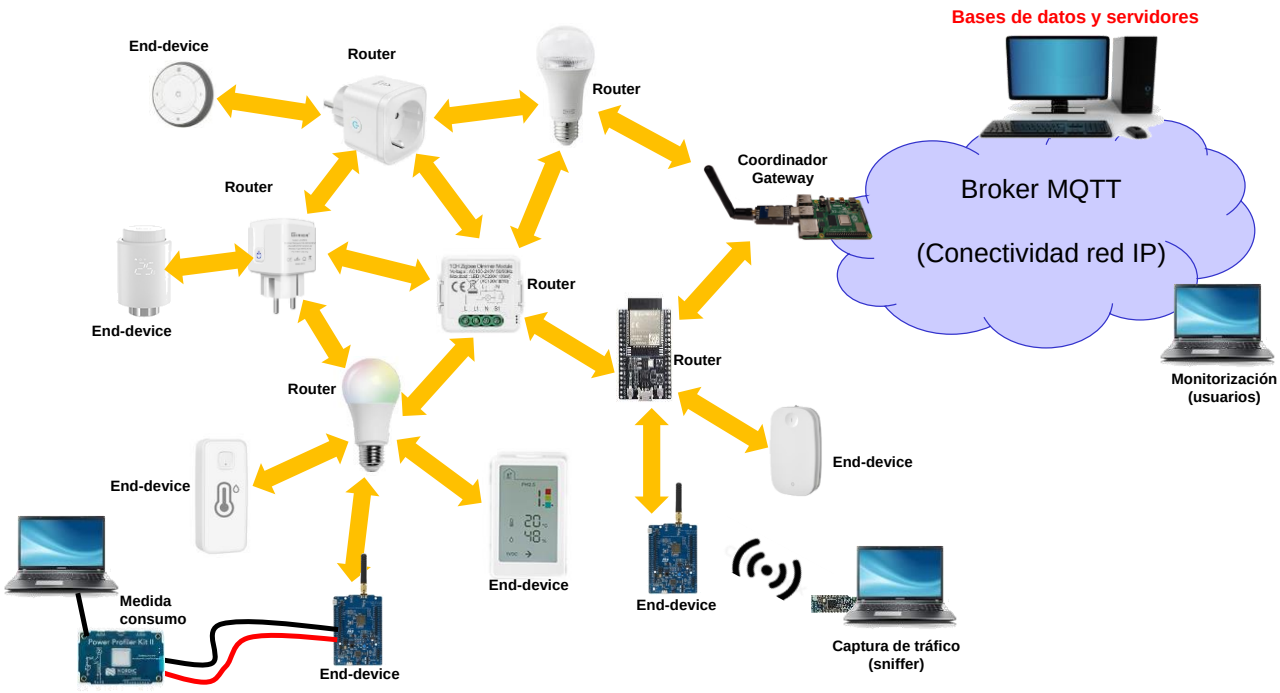


Figura 4. Arquitectura del demostrador.

router sin la participación de un coordinador si la red se configura con seguridad distribuida.

- El gobierno de la red (*network steering*) es la capacidad de abrir y cerrar la red a la entrada de nuevos dispositivos y normalmente puede ser ejercida por el nodo coordinador y por los *routers* que forman parte de la red. También se denomina así al procedimiento por el cual un dispositivo que no forma parte de una red realiza el procedimiento de búsqueda de una red abierta en la vecindad y se agrega a ella.
- La asociación a la red (*network association*) es el procedimiento por el cual un dispositivo final (*end-device)* se conecta con un nodo router, que se encargará de almacenar los paquetes de datos que lleguen con destino al dispositivo final, a la espera de que éste despierte, de acuerdo con el mecanismo de transmisión indirecta anteriormente descrito. Si un dispositivo *end-device* pierde cobertura con su nodo padre, puede reasociarse a la red solicitando la asociación a otro nodo *router* con el que tenga cobertura. Los nodos finales deben asociarse con un nodo padre antes de poder agregarse a una red mediante el *network steering.*
- La búsqueda de servicios (*finding*) y la vinculación (*binding*) son dos procedimientos de nivel de aplicación que permiten a un dispositivo cliente buscar a un dispositivo servidor compatible (es decir, que implemente el mismo perfil de servicio) y vincularse con él, de forma que los comandos emitidos por el servidor lleguen al dispositivo cliente independientemente de su dirección y ubicación en la red. Los dispositivos comerciales suelen definir mecanismos para poder establecer fácilmente vínculos entre dispositivos clientes y servidores compatibles al desplegar la red.

III. Arquitectura del demostrador

La arquitectura del demostrador propuesto en este trabajo se representa en la figura 4. El demostrador consta de diversos dispositivos domóticos comerciales (bombillas, relés, termostatos, sensores de temperatura, pulsadores, sensores de calidad de aire, etc), que pueden comportarse como *routers* (como es el caso de las bombillas y los relés, que pueden tomar la alimentación de la red eléctrica) o bien como *end-devices* (que es por ejemplo el caso del sensor de temperatura o de los pulsadores, que van alimentados a batería). La tabla I muestra los diferentes tipos de dispositivos comerciales que se han integrado en el demostrador (de algunos modelos hay más de un dispositivo en el demostrador).

A esta red formada por dispositivos comerciales, que implementan diferentes perfiles estándares de dispositivos domóticos definidos por la *ZigBee Alliance*, se le han agregado otros nodos constituidos por plataformas de desarrollo de diversos fabricantes (Texas Instruments, Espressif y Nordic Semiconductors), que se pueden configurar bien como *end-devices* o bien como *routers*, y que pueden implementar tanto perfiles de dispositivo estándar (por ejemplo el servicio *On/Off* como cliente o como servidor) como aplicaciones propietarias (mediante la implementación de Clústeres con atributos personalizados). En concreto se han utilizado las placas de desarrollo nRF5340-DK de Nordic, CC2652-launchpad de Texas, y ESP32-C6-DevkitC de Espressif. El firmware de estos nodos se puede reprogramar desde su correspondiente entorno de desarrollo, permitiendo la modificación de su comportamiento. Cada plataforma cuenta con su propio framework de programación, SDK y RTOS de soporte dependiendo del fabricante: La plataforma de Nordic se basa en ZephyrOS, Espressif utiliza el ESP-IDF (basado a su vez en FreeRTOS y la pila de protocolos ZBOSS), y la de Texas utiliza TI-RTOS y la pila de protocolos ZStack. Utilizando estas plataformas se han desarrollado

TABLE I. Dispositivos comerciales del demostrador

Dispositivo	Fabricante	Modelo	Descripción/Funcionalidad
Switch/Botón	IKEA	E2001/2002	Switch con 4 botones: on, off, > intensidad, < intensidad
Sensor Temperatura/Humedad	SONOFF	SNZB-02	Mide solamente temperatura y humedad, sin pantalla
Bombilla	Moes	TS0505B_1	Bombilla con diversas funciones (on, off, cambio de color, Cambio de intensidad…)
Switch (botón/mando a distancia)	Moes	TS0044	Switch con 4 botones que detecta una o dos pulsaciones en cada boton y se pueden mantenter pulsados
Relé	TuYA	TS0001_switch_module	Relé para control de instalación eléctrica en hogar.
Sensor calidad aire	IKEA	E2112	Mide: temperatura, humedad y calidad del aire, lo muestra por una pantalla pequeña integrada
Switch/Botón	IKEA	E1524/E1810	Switch con 5 botones: on/off, derecha, izquierda, < intensidad, > intensidad
Enchufe inteligente	TuYA	Gerier BSD29	Enchufe que se apaga o enciende y tiene seguridad para niños
Switch ((botón/mando a distancia)	IKEA	RODRET Dimmer	Switch con 2 botones: On, Off

diversos ejemplos que pueden ser estudiados y ampliados por los estudiantes, y que se dejarán disponibles para su descarga en un repositorio de código abierto[4].

La red cuenta además con una pasarela implementada mediante un SBC (single board computer) con sistema operativo Linux conectado por USB a un RPC (radio coprocessor) *ZigBee*, que además se comporta también como dispositivo coordinador de la red *ZigBee*. Como SBC se ha utilizado una Raspberry Pi 4, aunque podría haberse utilizado cualquier otro modelo similar (Raspberry Pi 2/3, Orange Pi, etc.). Como dispositivo RPC se podría haber utilizado cualquiera de las plataformas de Nordic Semiconductors o Texas Instruments utilizadas para implementar los nodos personalizados, pero se ha optado por utilizar un dongle USB de SONOFF basado en el chipset CC2652 de Texas Instruments, ya que es más compacto que las plataformas de desarrollo. Para que el dispositivo SBC con el dongle USB conectado realice la función de coordinador de la red y de pasarela hacia la red de datos, es necesario instalar en él la herramienta *Zigbee2MQTT* [5], que además implementa un interfaz web que permite el control de algunas operaciones de gestión de la red como pueden ser la agregación y eliminación de dispositivos, el descubrimiento de servicios, el establecimiento de vínculos entre ellos, la visualización de la topología de la red, etc. En el SBC se pueden instalar además otras herramientas como *Mosquitto* (bróker MQTT), *NodeRed*, *HomeAssistant*, *InfluxDB* y *Grafana* para facilitar el procesado, almacenamiento y visualización de los datos y la creación de paneles de control. La instalación y configuración de todas estas herramientas (incluyendo *Zigbee2MQTT*) puede realizarse de una forma sencilla y basada en contenedores Docker mediante la herramienta *IoTStack* [6].

La figura 5 muestra una foto de parte de los dispositivos del demostrador propuesto, que permite a los estudiantes tanto estudiar conceptos relacionados con la gestión de una red *ZigBee* (operaciones como *network steering*, *service discovery*, *binding*), como realizar proyectos en los que las aplicaciones empotradas que desarrollen para las plataformas de Texas, Nordic o Espressif interaccionen con dispositivos comerciales domóticos y puedan ser controladas y monitorizadas desde interfaces de usuario remotos. Además, se han añadido otros dos elementos al demostrador para ampliar sus posibilidades de uso en la práctica docente: un dispositivo de captura de tráfico (*sniffer*) y un caracterizador de consumo (*power profiler*).

El dispositivo de captura de tráfico está basado en un PC equipado con un *dongle* USB nRF52840 de Nordic, y *Wireshark*, una herramienta software de monitorización y análisis de tráfico gratuita. El *dongle* USB nRF52840 se programa con un firmware especial que permite su control desde Wireshark para capturar todos los mensajes radio 802.15.4 que se reciban en un determinado canal. Para permitir el control del dongle nRF52840 y configurar los parámetros de captura es necesario instalar también un plugin en la herramienta Wireshark, que ya viene configurada de serie para soportar el análisis de los protocolos ZigBee, siempre y cuando se configuren adecuadamente las claves de nivel de red ("ZigbeeAlliance09" en el caso de una red Zigbee con seguridad centralizada)[7]. Esta herramienta permite analizar con detalle el intercambio de información a diferentes niveles que tiene lugar durante la operación de la red Zigbee, como se mostrará en la siguiente sección.

Por su parte, para la caracterización o estudio del consumo de corriente de los dispositivos, que es interesante por ejemplo para poner de manifiesto las diferencias en consumo entre los dispositivos *routers* y los *end-devices* debida al comportamiento de cada uno, en el demostrador se ha utilizado la herramienta Power Profiler Kit II (PPK2) de Nordic Semiconductors. Esta herramienta consiste en un módulo hardware de bajo coste (<90€) que se conecta por USB a un PC donde se ejecuta un software de control y monitorización, y permite monitorizar en tiempo real el consumo de corriente de los dispositivos con una frecuencia de muestreo de 100kHz, un rango dinámico bastante amplio (desde µA hasta centenares de mA) y un error aceptable (<5%).

Figura 5. Algunos componentes del demostrador.

IV. EJEMPLOS DE USO DEL DEMOSTRADOR

Una vez descrita la arquitectura genérica del demostrador, En esta sección se han incluido algunos ejemplos de uso del demostrador para mostrar diversos aspectos del funcionamiento de la tecnología *ZigBee*.

A. *Creación de la red y topología.*

La creación de la red se controla desde el coordinador/Gateway, que es implementado por el dispositivo SBC ejecutando el software *Zigbee2MQTT*. Este software implementa un interfaz web desde el que se pueden controlar las operaciones de *network steering* (es decir si se admiten o no nuevos dispositivos en la red), realizar búsqueda de dispositivos y mostrar la topología de la red. Una vez que el coordinador "abre" la red, pueden agregarse nuevos dispositivos. La forma de agregar un dispositivo a la red es muy dependiente del modelo y del tipo de dispositivo y suele indicarse en las instrucciones del fabricante (en [5] se puede encontrar una completa base de datos con dispositivos comerciales). Típicamente, una bombilla abandona la red a la que estaba conectado y se intenta reconectar de nuevo a la red más próxima si se corta y reanuda su alimentación eléctrica varias veces consecutivas en un corto periodo de tiempo. En cambio, para un dispositivo sensor o un dispositivo switch, lo normal es que tenga algún pulsador especial para entrar en este modo de búsqueda o pueda forzarse mediante alguna combinación de pulsaciones en los botones o manteniéndolos pulsados durante un tiempo.

Conforme se van agregando dispositivos a la red, la aplicación *Zigbee2MQTT* los va configurando y creando un listado con los dispositivos conectados (fig 6.). También permite hacer una estimación de la topología de la red, tal y como muestra la fig. 7.

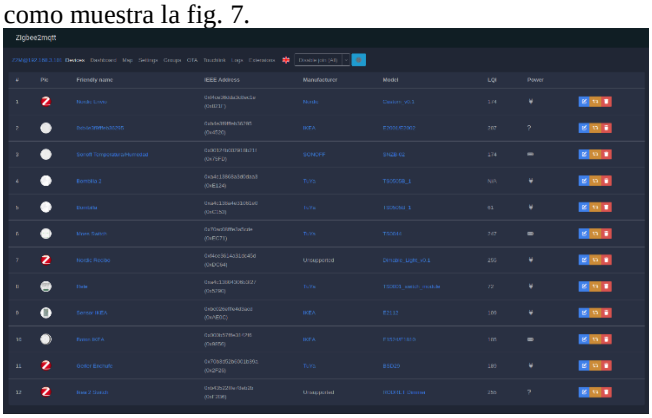


Figura 6. Listado de dispositivos.

Figura 7. Topología de la red mostrada por Zigbee2Mqtt

B. *Vinculación de dispositivos*

Una vez los dispositivos se han agregado a la red creada por el coordinador, se pueden consultar sus propiedades pinchando en la correspondiente entrada de la tabla. Una de las principales configuraciones que se puede consultar/establecer son los clústeres que implementa cada dispositivo como servidor o como cliente, y se pueden establecer vinculaciones entre servicios compatibles. La figura 8 muestra un ejemplo de vinculación entre un dispositivo de tipo switch y un dispositivo de tipo bombilla y otro de tipo relé (la vinculación se puede realizar con más de un dispositivo, de forma que un mismo switch puede controlar varias bombillas o una bombilla y un relé, y a su vez una bombilla o un relé puede estar controlado por más de un switch). Para configurar la vinculación entre un dispositivo origen y otro destino, deben seleccionarse el endpoint origen, el dispositivo destino, el endpoint destino y el/los clústeres a vincular. En el ejemplo de la figura, se ha vinculado el botón/switch con los clústeres *LevelCtrl* y *OnOff* de la bombilla, y con el cluster *OnOff* del relé, de forma que desde el switch/botón se pueden encender y apagar la bombilla y el relé (ambos responden a la misma pulsación) y además controlar el nivel de intensidad de la bombilla. La vinculación también puede hacerse entre algunos dispositivos sin utilizar la herramienta *Zigbee2Mqtt*. Algunos dispositivos servidores, especialmente los basados en plataformas de desarrollo, disponen de botones que pueden poner al dispositivo (servidor) en el modo de aceptar vinculaciones durante una ventana de tiempo y otros dispositivos clientes pueden tener un botón que dispare la búsqueda de un dispositivo servidor compatible que esté aceptando vinculaciones en ese momento.

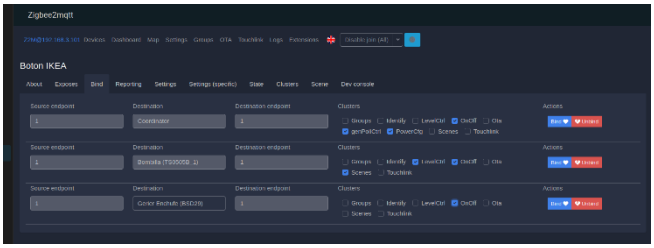


Figura 8. Vinculación de clústeres compatibles. Ejemplo switch vinculado con una bombilla y un relé.

C. *Análisis de tráfico*

Utilizando la herramienta de captura y monitorización de tráfico se puede realizar un análisis en profundidad del funcionamiento de los diferentes protocolos que intervienen en la comunicación. La fig 9. muestra por ejemplo el proceso de reasociación a la red de un dispositivo *end-device* que se ha desconectado (apagado) y vuelto a conectar.

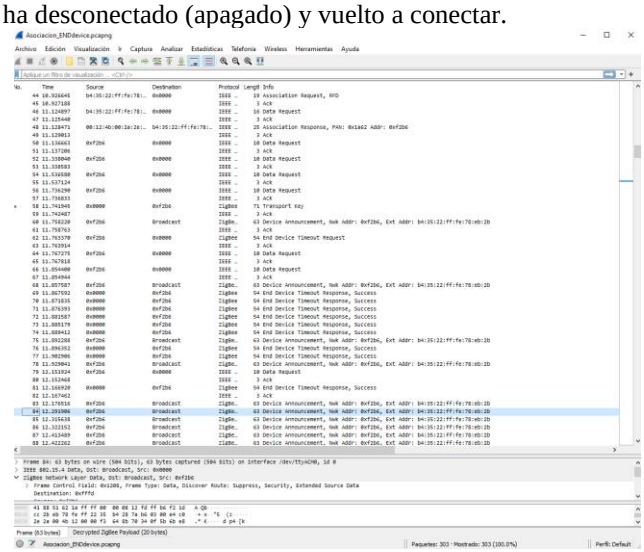


Figura 9. Captura y análisis de tráfico en la red ZigBee utilizando Wireshark

Además del proceso de reasociación a la red, en la captura también se muestra el mecanismo de transmisión indirecta que utiliza el dispositivo para ahorrar energía por ser un *end-device*, y que le obliga a sondear de forma periódica a su dispositivo padre mediante el envío de un paquete de *dataRequest* para recibir datos del resto de la red.
Con esta herramienta también puede analizarse el funcionamiento del protocolo de búsqueda de rutas, el procedimiento de vinculación o el intercambio de datos de aplicación entre dispositivos vinculados (no mostrado en la figura).

D. Análisis de consumo

Finalmente se muestra aquí la posibilidad de realizar un análisis detallado del consumo de los diferentes tipos de dispositivos mediante la herramienta de caracterización de consumo (*power profiler*). La fig. 10 muestra por ejemplo la forma de onda de la corriente consumida por un dispositivo *end-device* durante su operación.

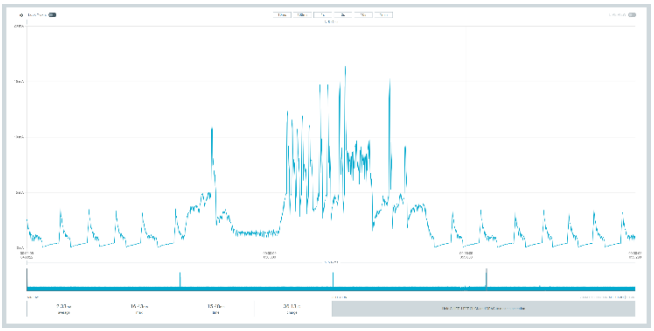


Figura 10. Consumo de corriente de un dispositivo end-device.

V. Conclusiones y Líneas Futuras

En este trabajo se ha descrito la arquitectura y componentes de un demostrador de red de sensores y actuadores inalámbricos con tecnología *ZigBee*, que integra tanto dispositivos domóticos comerciales que implementan un perfil estandarizado como dispositivos personalizables basados en plataformas de desarrollo de diversos fabricantes. El demostrador está orientado facilitar a estudiantes de nivel de máster el estudio de los diversos aspectos de la tecnología *ZigBee*, así como permitir la prueba y despliegue en un entorno realista de aplicaciones personalizadas implementadas utilizando las plataformas y herramientas de desarrollo más recientes disponibles. El demostrador se puede integrar fácilmente con aplicaciones domóticas adicionales como *HomeAssistant* y con herramientas para el almacenamiento y análisis de datos muy utilizadas en aplicaciones IoT como *InfluxDB*, *Grafana*, etc…

Para facilitar el desarrollo de aplicaciones utilizando las plataformas de desarrollo de Nordic, Texas Instruments y Espressif se han desarrollado algunos ejemplos base que se dejarán disponibles y documentados en un repositorio de código de acceso abierto [4].

Como línea futura, se está trabajando en la creación de un demostrador de una red de dispositivos inalámbricos con tecnología *Matter*, un estándar de más reciente aparición que está empezando a ser adoptado por numerosas compañías y que se basa a su vez en la combinación de la tecnologías *Bluetooth Low Energy* (para permitir realizar las operaciones de *commissioning* desde un teléfono móvil) con *OpenThread* (para la infraestructura de red de comunicación) y que también utiliza el modelo de perfiles de servicios y aplicaciones basados en clústeres de *ZigBee*.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio español de Ciencia, Innovación y Universidades (MCIN/AEI/10.13039/501100011033) y fondos NextGenerationEU/PRTR bajo el proyecto TED2021-130456B-I00.

Referencias

[1] "ZigBee Specifications," 2006. Accessed: Oct. 22, 2015. [Online]. Available: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&q=zigbee+specification&btnG=&lr=#2

[2] IEEE, "IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems- Local and metropolitan area networks- Specific requirements--Part 15.4: Wireless MAC and PHY Specifications for Low-Rate WPANs," *Control*, vol. 2006, no. September. p. 323, 2006. doi: 10.1109/IEEESTD.2006.232110.

[3] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, "RFC 3561-ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing," 2003. Accessed: Sep. 07, 2015. [Online]. Available: http://www.rfc-editor.org/info/rfc3561

[4] J. B. Castillo-Sánchez, "ZigbeeDemoTAEE2024 · GitLab." Accessed: May 31, 2024. [Online]. Available: https://proyectos.diana.uma.es:444/josborja7castillo/zigbeedemotaee2024

[5] K. Kanters and Others, "Zigbee2Mqtt project." Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: https://www.zigbee2mqtt.io

[6] Opensource, "IoTStack project." Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: https://sensorsiot.github.io/IOTstack/

[7] NordicSeminconductors, "nRF Sniffer for 802.15.4 based on nRF52840 with Wireshark." Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: https://infocenter.nordicsemi.com/index.jsp?topic=%2Fsdk_tz_v3.1.0%2Fnrf802154_sniffer.html

DEMOSTRADORES 3 – SESIÓN DE DEMOSTRADORES

Integración de Matlab en plataforma SoC de Xilinx: diseño de un regulador PI

Javier García Zubía
Universidad de Deusto
Bilbao, España
zubia@deusto.es

Javier Vicente Sáez
Universidad de Deusto
Bilbao, España
jvicente@deusto.es

Ignacio Angulo Martínez
Universidad de Deusto
Bilbao, España
ignacio.angulo@deusto.es

***Resumen*— El trabajo presenta cómo diseñar paso a paso un regulador PI en Matlab y cómo implementarlo en la plataforma SoC PYNQ Z2 de Xilinx/AMD dentro de una asignatura de máster. El trabajo analiza los resultados del regulador PI para controlar un motor DC. Lo presentado es un ejemplo de colaboración entre distintas asignaturas y plataformas.**

Keywords*— *Regulador PI, plataforma SoC Xilinx, Matlab

I. Introducción

El demostrador presentado forma parte de la asignatura Diseño avanzado de sistemas digitales (6 ECTS) encuadrada dentro del Máster Universitario en Automatización, Electrónica y Control Industrial impartido por la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Deusto con una extensión de 60 ECTS, un año académico. El máster en el curso 2023-2024 está en su novena edición y atrae a alumnos de toda España y de Iberoamérica.

El máster se desarrolla en tres áreas: automatización, electrónica y control y en las tres se sigue un enfoque académico similar. En primer lugar los alumnos deben aprender haciendo, utilizando en la medida de lo posible equipos industriales. Otra premisa básica es que las asignaturas deben colaborar para abordar los distintos proyectos finales. Un máster no debe describir solo tecnologías, sino que debe integrarlas. Esta integración puede ser entre asignaturas de una misma área o de distintas áreas.

El demostrador aquí presentado integra conocimientos y habilidades de dos asignaturas: Diseño avanzado de sistemas digitales y Control industrial aplicado, y de forma específica integra VHDL, SoC, C y Matlab/Simulink.

II. Objetivos del demostrador

La práctica desarrollada forma parte del proyecto final de la asignatura que consiste en el control de una maqueta sensorizada con distintos actuadores y elementos de control [1].

La práctica se divide en tres partes y tiene una duración estimada de 6-8 horas en el aula:

- Fase I. Modelización y análisis del motor DC en la plataformas Vivado/Vitis y Matlab/Simulink (https://www.xilinx.com/products/design-tools/vivado.html) .
- Fase II. Diseño del regulador PI para el control de velocidad del motor DC en la plataforma Matlab.
- Fase III. Implementación y prueba del regulador PI en la plataforma PYNQ Z2 con Vivado/Vitis (https://www.tulembedded.com/FPGA/ProductsPYNQ-Z2.html).

El desarrollo de la práctica se centra en la regulación de la velocidad de un motor DC mediante el SoC de Xilinx Zynq Z7020 en la plataforma PYNQ Z2 utilizando Vivado/Vitis con la colaboración de Matlab/Simulink en las Fases I y II.

En las siguientes secciones se describirá con más o menos detalle el desarrollo de cada fase.

III. Fase I. Modelizacion y Análisis del Motor DC

Antes de controlar la velocidad del motor DC es necesario modelizarlo, no solo para poder diseñar el regulador, sino también para analizar su comportamiento frecuencial y detallar dos características importantes: el periodo de muestreo y la frecuencia de la señal PWM de control del motor.

A. Modelización del motor DC

Para modelizar el motor DC un primer paso es conocer su respuesta temporal para luego obtener su modelo.

El motor DC es controlado mediante un PWM y su velocidad es obtenida procesando la información que envían los sensores Hall. La Fig. 1 muestra el motor usado en la práctica es un FIT0458 de DFROBOT y su coste no supera los 10 euros por unidad.

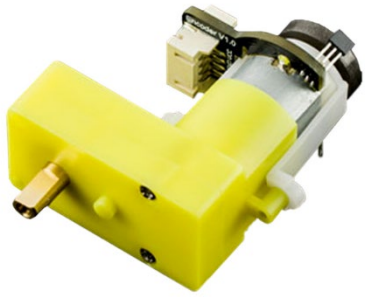


Fig. 1. Motor FIT0458 de DFROBOT para la práctica

El primer paso consiste en desarrollar IPs (Intellectual Property) en VHDL para controlar el motor DC y medir su velocidad de giro mediante los sensores Hall. Un IP es una descripción VHDL que implementa una determinada función.

Ambos IPs se basan en sendos autómatas/FSM. La Fig. 2 muestra los diagramas de Moore del control PWM a 200 Hz

del motor DC y de la medida de velocidad mediante sensores Hall.

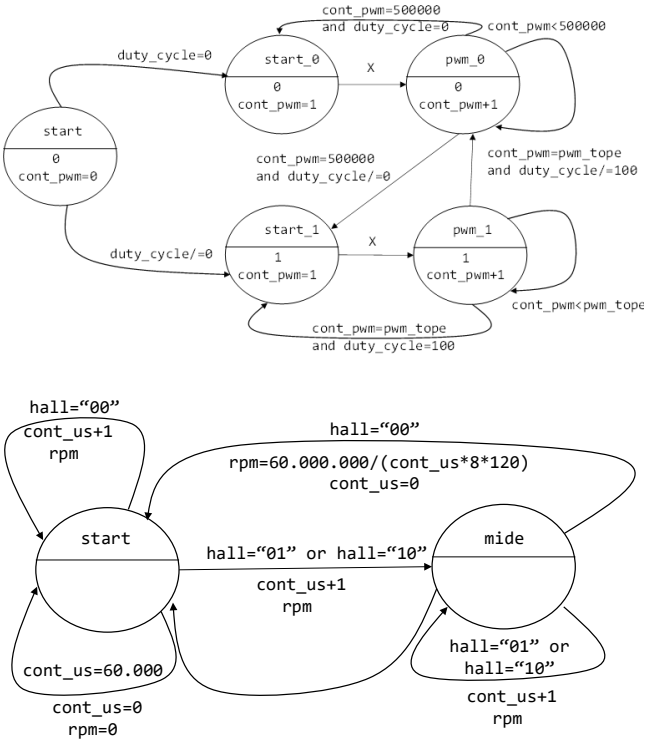


Fig. 2. Diagrama de estados de Moore del PWM para el motor DC

En el autómata de control PWM la señal `duty_cycle` indica el % de control del PWM y su valor va de 0 a 100. El valor 500.000 se obtiene de dividir la frecuencia de la parte PL del SoC, 100 MHz, entre la frecuencia del PWM, 200, así se obtiene 100.000.000/200=500.000 pulsos del reloj original para completar un ciclo de PWM.

En el FSM correspondiente a la medida de la velocidad, esta es representada por `rpm` (revoluciones por minuto) y se obtiene al dividir el valor 60.000.000 (microsegundos en 1 minuto) entre el periodo en microsegundos de una de las dos señales Hall (ver Fig. 3) multiplicado con 120*8. Estos dos últimos valores son indicados por el fabricante del motor ya que tiene una reductora de 120 entre el eje principal y el secundario y presenta 8 pulsos por vuelta.

Una vez diseñados los IPs es necesario integrarlos en el diagrama de bloques (ver Fig. 4) que ofrece Vivado para diseñar un proyecto. El diagrama de bloques incluye el propio SoC, Zynq Z7020, los IPs de control del bus AXI y los cuatro IPs definidos en la práctica (parte derecha): el IP de control PWM, el IP de medida de la velocidad y dos IPs de filtrado de las señales Hall. Estos dos últimos IPs simplemente aportan un filtrado digital de las señales provenientes de los sensores Hall y no se describen en este trabajo.

Seguidamente, y tras pasar por el sintetizado del diseño y la asignación de pines a las entradas y salidas, es momento de pasar al Vitis para diseñar una aplicación en C que muestre que el motor DC es controlable mediante el PWM y que la velocidad es medible mediante los sensores Hall.

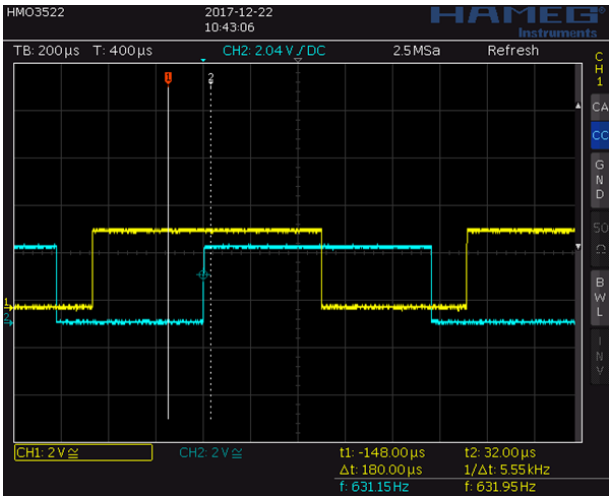


Fig. 3. Imagen de osciloscopio de la medida mediante sensores Hall

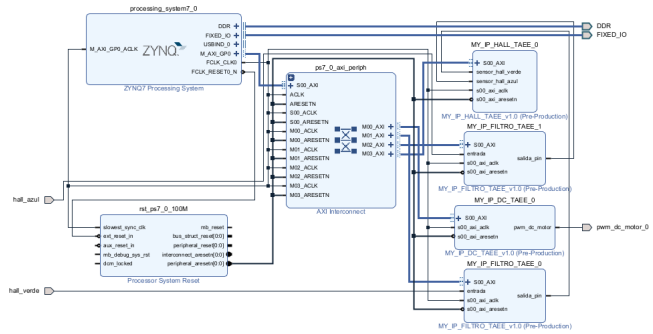


Fig. 4. Diagrama de bloques del control pwm de un motor DC y medida de velocidad mediante sensores Hall

Los resultados de la aplicación C se sacan por consola y simplemente hay que importarlos en un Excel para ver su comportamiento temporal. La Fig. 5 muestra la respuesta temporal ante un cambio de duty cycle de 0 % a 50 %. Se ven dos respuestas temporales, una de ellas con más "saltos" es la original, ya que el motor no es muy bueno y mecánicamente tiene esos saltos. La segunda gráfica visualiza el resultado de aplicar una media móvil, donde para obtener el nuevo valor de y en función de la señal original x se aplica la fórmula:

$$y(t) = 0.9 \cdot y(t-1) + 0.1 \cdot x(t)$$

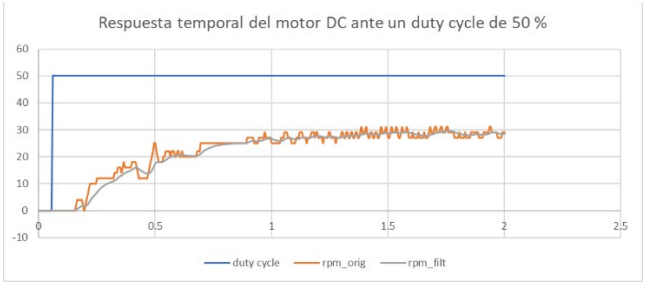


Fig. 5. Respuesta temporal original del motor DC y la procesada mediante media móvil en Excel

Una vez que tenemos la respuesta temporal del DC, podemos ir al Matlab para identificar su modelo. Tras importar los datos del Excel, se puede obtener de nuevo la respuesta temporal del sistema a identificar. La Fig. 6 muestra una respuesta temporal similar a la mostrada en la Fig. 5.

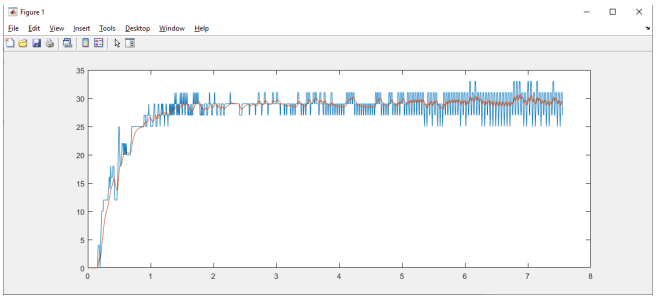


Fig. 6. Respuesta temporal original del motor DC y la procesada mediante media móvil en Matlab

La app de System Identification de Matlab nos ayuda con el proceso. En este momento debemos elegir si se va a modelizar la respuesta temporal original o la filtrada mediante media móvil. Se elige la original ya que no presenta excesivo ruido. La Fig. 7 muestra los datos de partida para la identificación del modelo mediante una función de transferencia en tiempo continuo con dos polos y un cero.

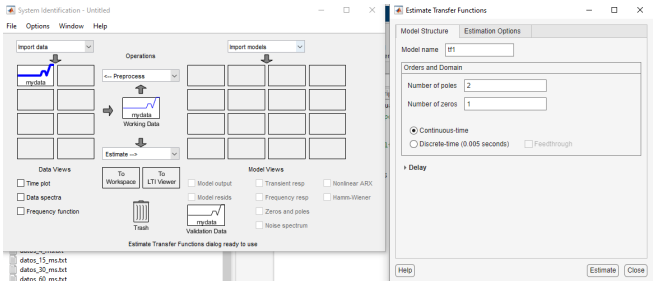


Fig. 7. Datos para la identificación del modelo del motor DC

La Fig. 8 muestra la función de transferencia que modela el motor DC y una gráfica que compara el comportamiento del modelo con el comportamiento original.

$$\frac{-2.732\ s + 69.95}{s^2 + 46.78\ s + 120.1}$$

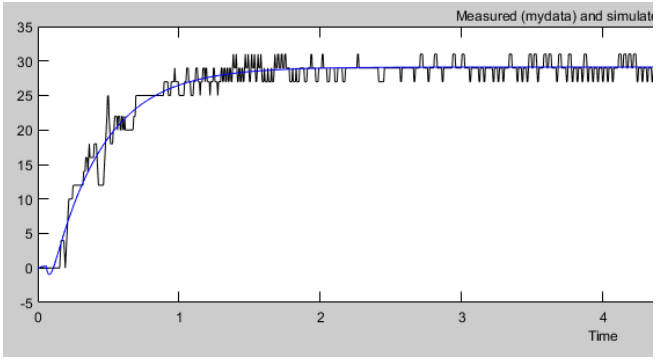


Fig. 8. Función de trasnferencia del modelo del motor y respuesta

B. Análisis del motor DC

Se ve en la respuesta y en la función de transferencia que el modelo identifica un sistema de fase no mínima, lo que no es bueno ya que aporta inestabilidad. La Fig. 9 muestra el lugar de las raíces del modelo identificado, en él se ve la posible inestabilidad del sistema.

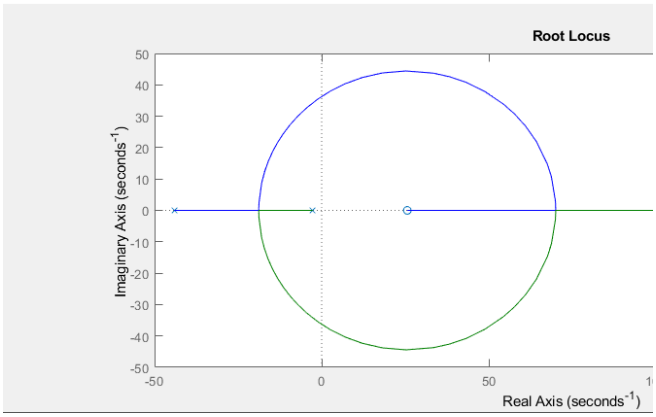


Fig. 9. Lugar de las raíces del modelo del motor DC

Esta situación se da porque el motor DC tiene un retardo, es decir, ante el cambio de duty cycle, el motor no arranca instantáneamente y eso es lo que modeliza Matlab. De hecho en la Fig. 8 se puede ver que la simulación del modelo predice una bajada en los rpm, situación típica en los sistemas de fase no mínima. Sin embargo, y toda vez que el sistema en su conjunto va a ser regulado, esta situación no es un problema. Por otra parte, al modelizar se puede prescindir del retardo, de manera que la modelización obtendría un modelo mucho más sencillo, seguramente con un solo polo.

La Fig. 10 muestra el diagrama de Bode del modelo del motor DC. En él se ve que el motor DC se comporta como un filtro por su naturaleza, es decir, atenúa las señales a partir de cierta frecuencia.

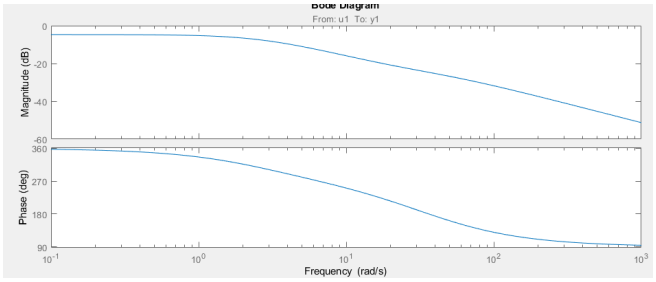


Fig. 10. Diagrama de Bode del modelo del motor DC

Lo anterior es importante porque el motor se controla mediante un PWM a una determinada frecuencia. El concepto del PWM se basa en una pequeña trampa que no tiene muy en cuenta la respuesta frecuencial, ya que se supone que el PWM ofrece un valor medio, por ejemplo 50 %, en continua, es decir, a frecuencia 0 Hz ¿qué pasa para las frecuencias superiores? Pues ocurre que aparecen los armónicos del PWM que "suman" señal a la de continua, desvirtuando su valor. Pero por otro lado vemos que el motor DC se comporta como un filtro, lo que sin duda ayuda al control ya que esos armónicos serán filtrados "espontáneamente" por el motor. La pregunta es ¿qué frecuencia debe tener el PWM para que el filtrado del motor DC sea eficaz para la regulación?

La anterior pregunta se responde desde Matlab/Simulink. La Fig. 11 indica que se va a excitar el modelo del motor DC con un PWM de 2 kHz y un duty cycle del 50 %.

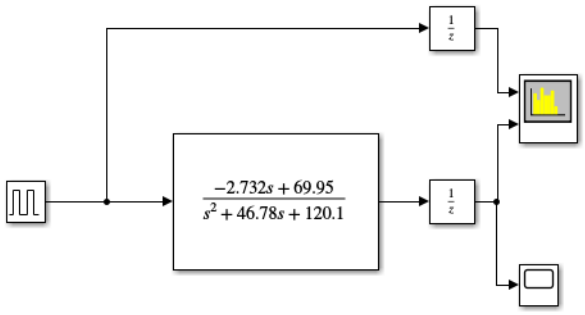


Fig. 11. Análisis frecuencial del modelo del motor DC

La Fig. 12 muestra la entrada, el PWM, (amarilla) y la salida (azul) y en ella se ve que el primer armónico, el de 2 kHz, ha sido atenuado en cerca de 80 db, ya que pasa de más o menos 20 dB en la entrada a más o menos -60 dB, lo que es una atenuación muy elevada. Es decir, para un PWM a 2 kHz y un duty cycle de 50 % se ve que el motor es controlado casi en exclusiva por el valor de continua del PWM, lo que es una buena noticia para la regulación. Si la situación no hubiera sido esta, entonces habría que aumentar la frecuencia del PWM, que tiene un límite en el driver del DC, o asumir que el PWM no va a ser el ideal.

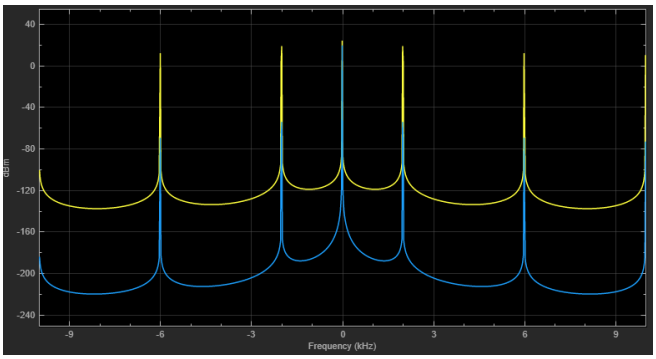
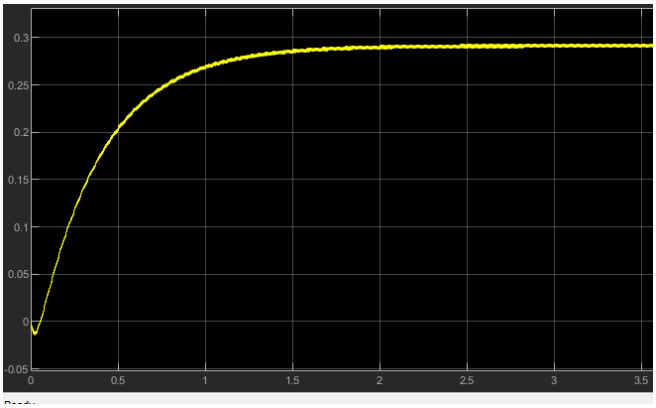


Fig. 12. Análisis frecuencial espectral del modelo del motor DC

También resulta muy interesante añadir scope al diseño de la Fig. 11 para ver la respuesta temporal para distintas frecuencias de PWM. La Fig. 13 muestra la respuesta temporal para PWM de 200 Hz y de 2 kHz. La primera gráfica es la respuesta temporal, mientras que la segunda es un zoom de la primera para mostrar que la respuesta no es "fina" sino que oscila, lo que en absoluto es bueno ni para el motor DC ni para la regulación. La tercera imagen es para un PWM de 2 kHz, en esta imagen se ve que no hay oscilaciones.



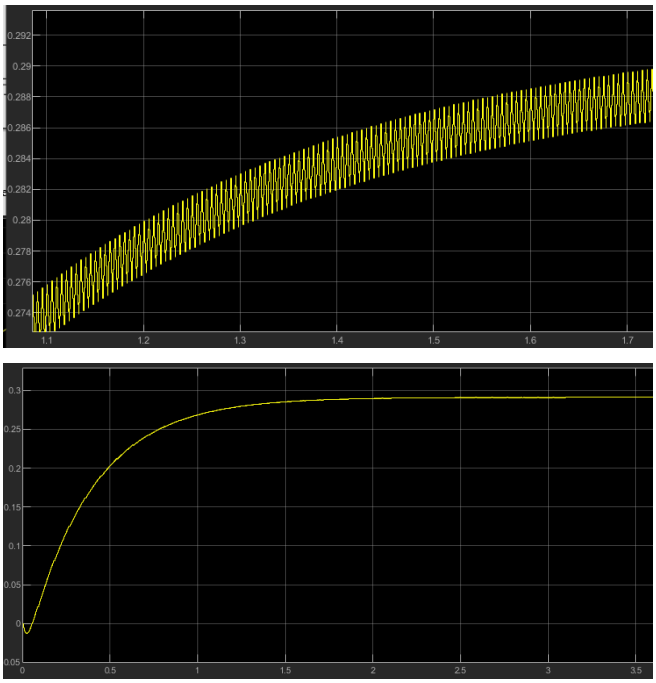


Fig. 13. Respuesta temporal para PWM de 200 Hz y de 2 kHz con 50 %

Por otro lado es necesario determinar la frecuencia de muestreo a la cual vamos a medir la velocidad en rpm mediante los sensores Hall. Una forma de estimar dicha frecuencia es como un múltiplo de la constante de tiempo. Viendo la última imagen de la Fig. 13 se estima que la constante de tiempo es de 0.5 segundos y por tanto el periodo utilizado hasta ahora, de 5 ms, es visto como adecuado, aunque quizá sea demasiado bajo, ya que el factor de 100 excede el valor recomendado que está entre 20 y 50. Hay que tener en cuenta que para 5 ms de muestreo la velocidad mínima medible es de 12 rpm, y ese es un límite de regulación.

Las conclusiones del análisis temporal y frecuencial son que el motor DC es un filtro paso bajo, que la frecuencia del PWM es un valor que condiciona la buena regulación del motor DC, que una frecuencia de 2 kHz es adecuada y que un periodo de muestro de 5 ms (fs=200 Hz) es adecuada.

IV. Fase II. Diseño del regulador PI en Matlab

Una vez analizado el comportamiento del motor DC mediante su modelo de continua, es momento de diseñar el regulador PI en el plano discreto.

Para diseñar el regulador PI, el primer paso consiste en modelizar el motor DC pero ahora en el plano discreto utilizando de nuevo la app System Identification de Matlab. La Fig. 14 muestra la función transferencia identificada en el plano Z y el comportamiento del modelo frente a la señal original.

```
tf1 =
  From input "u1" to output "y1":
         0.0009507 z^-1
  ----------------------------
  1 - 1.866 z^-1 + 0.8674 z^-2
```

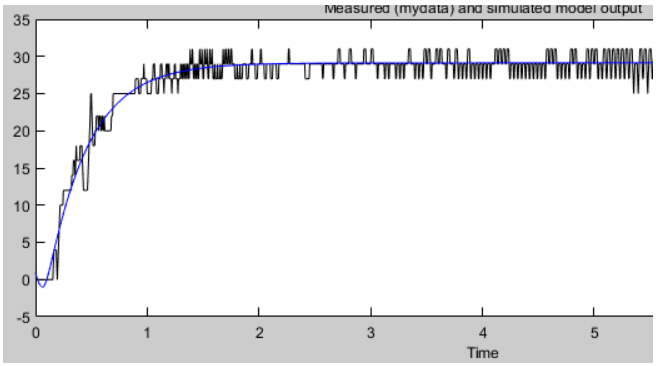


Fig. 14. Identificación y respuesta temporal del modelo del motor DC en plano Z

El siguiente paso consiste en diseñar el regulador PI mediante la app PID Tuner de Matlab. La Fig. 15 muestra los valores elegidos para la regulación mediante los slides de tiempo de respuesta y de comportamiento transitorio. En este punto cada alumno podrá elegir los valores que considere más adecuados, o cambiar a regulador P o PID.

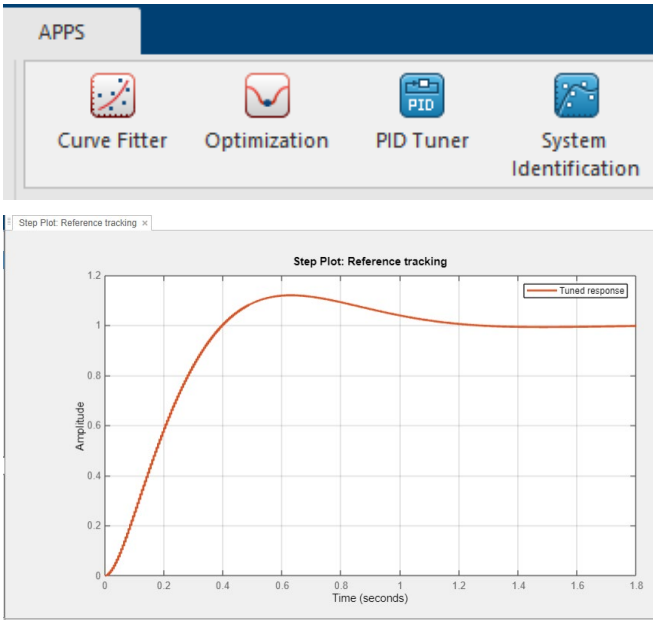


Fig. 15. Diseño del regulador PI

Tras exportar el regulador diseñado en el paso anterior, la Fig. 16 muestra los valores obtenidos.

```
>> PI_Motor2

PI_Motor2 =

                Ts
  Kp + Ki * ------
                z-1

  with Kp = 2.38, Ki = 12.9, Ts = 0.005
```

Fig. 16. Valores del regulador PI

Ahora que está caracterizado el regulador PI por sus valores K_P y K_I, es momento de simular el regulador para luego exportarlo a VHDL. La Fig. 17 muestra el sistema completo incluyendo el regulador en su primera imagen, mientras que la segunda muestra el regulador (bloque verde). En este esquema han de darse valores a K_P y K_I, que de momento están fijados en 12.9 y 2.8, respectivamente, pero que se pueden cambiar.

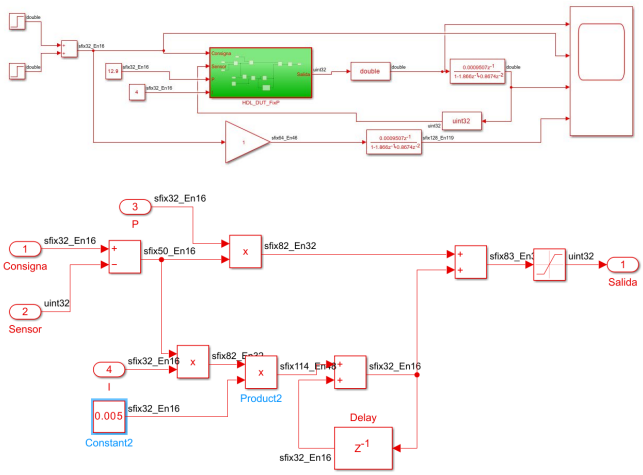


Fig. 17. Diseño del regulador PI con el modelo del motor DC integrado

El diseño anterior permite simular el comportamiento. La Fig. 18 muestra dos consignas, 20 rpm y 40 rpm (amarilla en la segunda gráfica) y la salida (en azul). La imagen superior muestra cómo cambian los valores del duty cycle para alcanzar, más o menos, la consigna deseada. En este momento Matlab/Simulink nos permite hacer diferentes pruebas antes de pasar al diseño real, pero no hay que olvidar que esto es una simulación y que por tanto solo la implementación real nos dará información veraz.

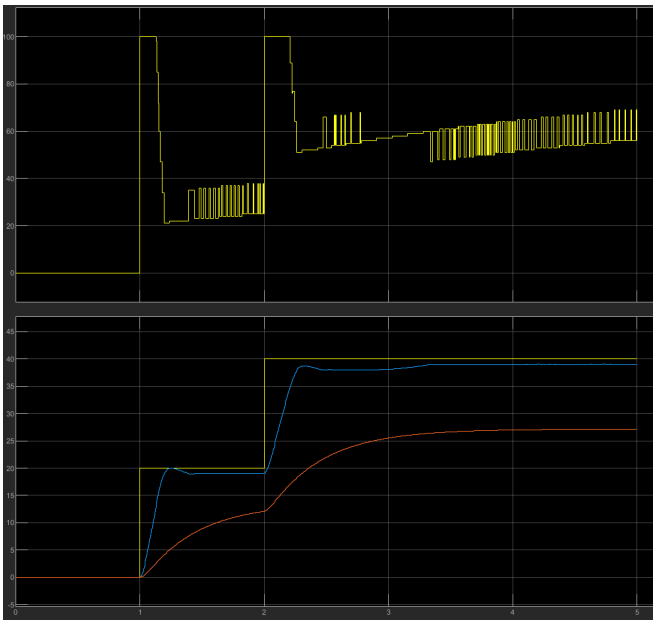


Fig. 18. Simulación del motor DC con el regulador PI diseñado

V. Fase III. Implementación en VHDL del Regulador PI y Prueba Real del Motor DC

Una vez diseñado y probado (simulado) el regulador PI, es momento de obtener un IP en VHDL para consumirlo en Vivado/Vitis mediante un diagrama de bloques y una aplicación, respectivamente.

A. Obtención del IP en VHDL del regulador PI

El primer paso consiste en crear un IP en VHDL del regulador PI utilizando para ello el asistente de Matlab: HDL Worflow Advisor.

El proceso es lento y hay que ser cuidadoso en algunos pasos. Por ejemplo la Fig. 19 muestra que hay que indicar qué señales vendrán del bus AXI (de la aplicación) y cuáles vendrán de otros IP. Claramente el sensor (rpm) vendrán del IP de medida de la velocidad, mientras que salida irá como duty cycle del IP del motor DC.

La Fig. 19 también muestra que en uno de los pasos hay que indicar el oversampling del regulador, que en este caso es de 500.000, este valor se obtiene al multiplicar la frecuencia del reloj de la FPGA por el periodo de muestreo: 100.000.000·0.005 = 500.000.

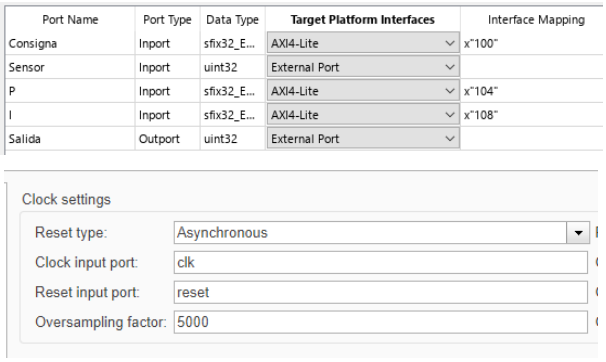


Fig. 19. Descripción de señales, entradas y salidas del IP del regulador

Al acabar el proceso, Matlab ofrece un resumen de lo obtenido. En la Fig. 20 se muestra que se ha elegido modo free running y que los distintos parámetros consigna, P e I están las posiciones `0x100`, `0x104` y `0x108` respecto de la `base address` del `IP MY_IP_REG_PI_3`.

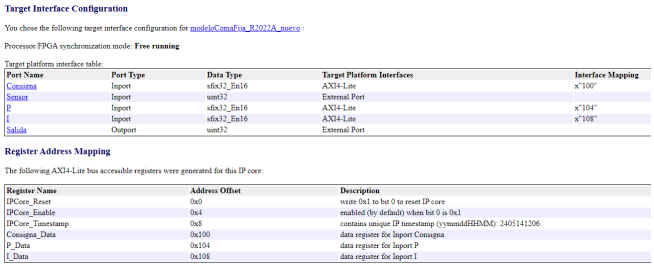


Fig. 20. Resumen del IP regulador PI

B. Integración y consumo del IP del regulador PI en el entorno Vivado/Vitis

Tras el paso anterior, Matlab ha creado un IP y la correspondiente carpeta. En la carpeta de `Documentation` se encuentra el resumen del IP y en la carpeta `include` se encuentra el fichero `MY_IP_REG_PI_3_addr.h` que habrá que copiar más adelante. La Fig. 21 muestra esta información.

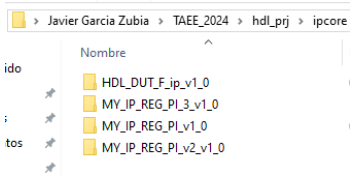


Fig. 21. Ruta y carpeta donde se encuentar el IP del regulador PI

Para poder añadir el IP es necesario añadir la carpeta vista antes a la carpeta ip_repo de Vivado, tal y como se muestra en la Fig. 22. Además hay que añadir este nuevo IP al diseño en Vivado mediante IP catalog. Es necesario tener cierta soltura en Vivado.

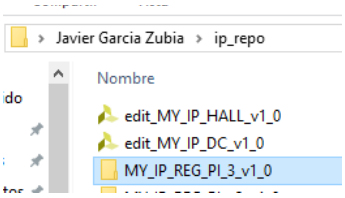


Fig. 22. Carpeta del Ip de regulador incluida en `ip_repo`

Una vez localizado el IP hay que integrarlo en el diagrama de bloques del diseño en Vivado. En la Fig. 23 no solo aparece el IP regulador, sino que también se ve que se ha modificado el diagrama de bloques de la Fig. 4, ya que ahora el `duty cycle` viene del regulador, y antes venía del AXI, y la velocidad `rpm` ahora va al regulador, y antes iba al AXI.

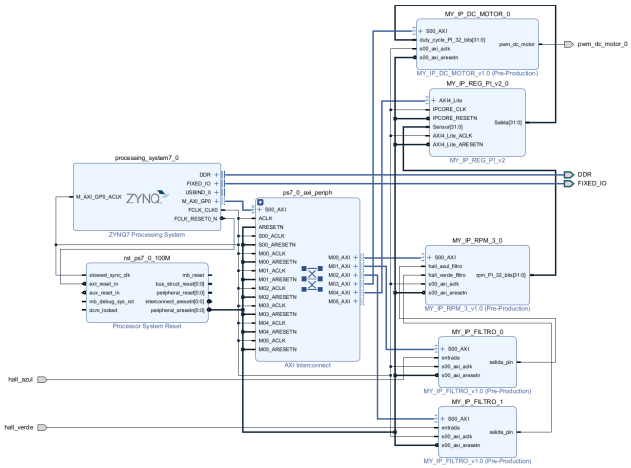


Fig. 23. Diagrama de bloques en Vivado para controlar el motor DC con el regulador PI diseñado en Matlab/Simulink

En este momento ya se puede generar el bitstream y con él el fichero XSA para exportar todo el diagrama de bloques a Vitis y ahí consumirlo mediante una aplicación. Este proceso lleva tiempo ya que crea el fichero bitstream a grabar en la FPGA.

Hecho lo anterior, hay que abrir el Vitis y ahí crear una plataforma utilizando el XSA recién creado sobre la que se creará una aplicación. Esta aplicación tiene el código C que declara y consume los distintos IPs creados en VHDL, bien por el alumno (motor DC, medidor de velocidad y filtro digital) o bien por Matlab (regulador PI). Antes de seguir es necesario copiar y pegar el fichero `MY_IP_REG_PI_3_addr.h` en la carpeta correspondiente al workspace de Vitis, tal y como muestra la Fig. 24.

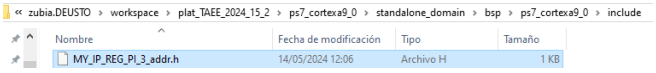


Fig. 24. Fichero con el include del Ip del regulador en la carpeta correspondiente de la plataforma almacenada en el workspace de Vitis

Todo está listo para consumir el IP en C. El primer paso consiste en incluir la librería y crear unos `defines` que faciliten el uso de la misma. La `base address` se obtiene de `parameters.h` y los desplazamientos para cada señal del resumen del IP (ver Figs. 19 y 20).

```
#include "MY_IP_REG_PI_v2_addr.h"

#define REG_PI_ADDRESS 0x43C40000
#define RESET_REG_PI 0x0
#define ENABLE_REG_PI 0x4
```

```
#define CONSIGNA_REG_PI 0x100
#define KP_REG_PI 0x104
#define KI_REG_PI 0x108
```

Simplemente queda iniciar el IP del regulador y dejarlo funcionar en modo free running (el elegido anteriormente). Destaca en el código que hay que usar `Xil_In32` y `Xil_Out32`, ya que Matlab no crea las estructuras típicas de Read/Write, sino que hay que trabajar en el AXI directamente. También destaca que los valores K_P, K_I y consigna se multiplican por 65.536, es decir, por 2^{16}. Esto es así para permitir el uso de decimales en las constantes K_P y K_I. La Fig. 17 muestra que se usan 32 bits (como los registros AXI) con 16 enteros y el resto decimales.

```
Xil_Out32(REG_PI_ADDRESS+RESET_REG_PI, 0x1);
usleep(10);
Xil_Out32(REG_PI_ADDRESS+RESET_REG_PI, 0x0);
Xil_Out32(REG_PI_ADDRESS+ENABLE_REG_PI, 0x0);
Xil_Out32(REG_PI_ADDRESS+KP_REG_PI, 12.8*65536 );
Xil_Out32(REG_PI_ADDRESS+KI_REG_PI, 2.38*65536);

Xil_Out32(REG_PI_ADDRESS+ENABLE_REG_PI, 0x1);
Xil_Out32(REG_PI_ADDRESS+CONSIGNA_REG_PI, 60*65536);

for (int i=0;i<500;i++)
{
     vel_rpm_3=MY_IP_RPM_3_mReadReg(RPM_3_ADDRESS,
VEL_RPM_3);
     xil_printf("60 ; %d \n", vel_rpm_3);
     usleep(5000);
}
```

El programa en C muestra en la consola los valores de velocidad cada 5 ms. Estos valores se pueden copiar en un Excel y mostrarlos.

La Fig. 25 muestra la respuesta temporal para una consigna de 60 rpm.

Fig. 25. Respuesta temporal del motor DC regulado ante una consigna de 60 rpm

La Fig. 26 muestra la respuesta temporal del motor DC ante dos valores de consigna, 60 rpm y 20 rpm.

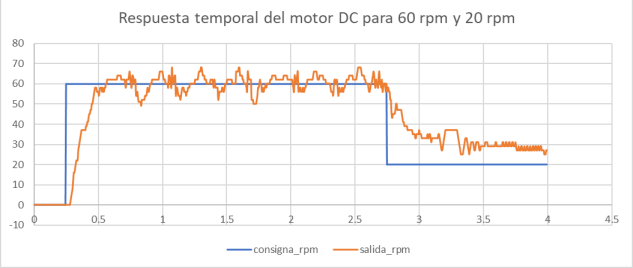


Fig. 26. Respuesta temporal del motor DC regulado ante un cambio de consigna de 60 rpm a 20 rpm

Por último, la Fig. 27 muestra el efecto de una perturbación (poniendo el dedo en el eje principal del motor) en la respuesta temporal. Se ve que el motor DC recupera el valor de consigna, como era esperado.

Fig. 27. Respuesta temporal del motor DC regulado ante una perturbación con 60 rpm de consigna

El montaje final se puede ver en la Fig. 28 y es muy sencillo. Consta de una protoboard con alimentación externa de 3.3 V y 5 V para un driver DRV8833 de Pololu (https://www.pololu.com/product/2130) que controla el motor DC FIT0458 (ver Fig. 1). La plataforma hardware es una PYNQ Z2 en la que se usan solo tres pines y la tierra.

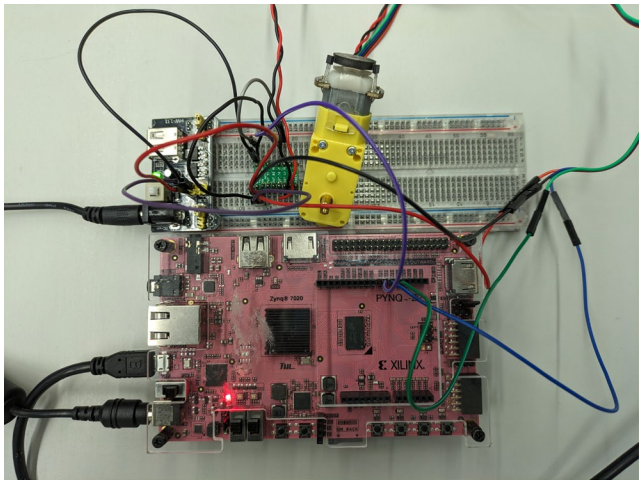


Fig. 28. Montaje del motor DC FIT0458 con el driver DRV8833 en protoboard controlada mediante PYNQ Z2

VI. Prácticas con el regulador PI en el SoC de Pynq Z2

Una vez planteado e implementado el diseño anterior en la plataforma de desarrollo PYNQ Z2 ¿qué más puede hacer el alumno?

- Puede cambiar los valores de KP y KI, ya que el IP no los tiene fijos, se pueden cambiar a través del AXI. Lo que es cierto es que los valores inicialmente usados son los dados por Matlab.
- Hay que tener en cuenta que los motores DC que se entregan a los alumnos no son muy buenos y por tanto son muy distintos entre sí, lo que da variedad al diseño de los reguladores y a su comportamiento.
- Puede cambiar la frecuencia de muestreo y/o la frecuencia del PWM, lo que conlleva ahondar en lo hecho en la Fase I.
- Estudiar el código VHDL del regulador PI para modificarlo e integrar alguna característica adicional, por ejemplo, antiwind-up. También se puede hacer en el modelo Simulink.

- Puede diseñar un IP regulador por sí mismo estudiando lo entregado por Matlab.
- Probar el modo strobe/ready de regulación en vez del modo free running.

En este primer año simplemente se ha implementado la práctica en su formato básico, quedando las cuestiones anteriores para los siguientes años.

Tampoco se ha pedido a los alumnos una valoración de la práctica, por cuanto que es una parte de la asignatura. Sin embargo los alumnos valoran mucho que los profesores nos esforcemos por presentar prácticas o proyectos que integren distintas asignaturas y herramientas: SoC, VHDL, C, Matlab, Simulink, diseño de reguladores, motores DC y sensores.

VII. Conclusiones y trabajo futuro con el demostrador

El presente trabajo ha presentado cómo aunar distintas tecnologías propias de la electrónica y el control industrial en una práctica. La práctica está orientada a un nivel de máster en el área de la electrónica y el control. Específicamente se circunscribe a la asignatura de Diseño avanzado de sistemas digitales del Máster Universitario en Automatización, Electrónica y Control Industrial de la Universidad de Deusto.

La práctica es ejemplar por cuanto que integra distintas tecnologías y áreas de conocimiento y porque facilita el trabajo personal y en grupo del alumno. Es una práctica útil y utilizable que permite al alumno desarrollar distintas competencias y habilidades.

La práctica está documentada en detalle y a disposición de quien lo solicite con el objetivo de compartir experiencias educativas útiles y utilizables.

El trabajo a futuro puede enriquecer el desarrollo de la práctica con los aspectos señalados en el apartado VI. Además sería interesante integrar también en la práctica la herramienta LabVIEW o si acaso utilizar motores DC de carácter industrial.

References

[1] J. García Zubía, I. Angulo Martínez y J. Vicente Sáez “Maqueta open hardware para asignaturas de electrónica programable” en Libro de actas de TAEE 2022, XV Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica, Ed. Inmaculada Plaza et al. 5 pp. Julio 2022. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8647956.pdf

Módulos para prácticas con microcontroladores: PIC16F88 y ATMega328 en Arduino

Luis Gil Sánchez
Departamento de Ingeniería Electrónica
Universitat Politècnica de València
Valencia, España
lgil@eln.upv.es

Javier Ibáñez Civera
Departamento de Ingeniería Electrónica
Universitat Politècnica de València
Valencia, España
jibanyez@eln.upv.es

Cristian Olguin Pinatti
Departamento de Ingeniería Electrónica
Universitat Politècnica de València
Valencia, España
criolpi@upvnet.upv.es

María Auxilio Recasens Bellver
Departamento de Ingeniería Electrónica
Universitat Politècnica de València
Valencia, España
mrecasen@eln.upv.es

***Resumen*—En esta comunicación se presentan varios módulos para realizar prácticas con un microcontrolador, inicialmente con el PIC16F88, que posteriormente se acondicionó para poder ser usado por el ATMeg328 en la plataforma Arduino UNO. Finalmente se presenta un nuevo módulo con el ATMega328, pero en la plataforma de Arduino NANO.**

Los módulos de prácticas consisten en una placa de circuito impreso donde se incorporan los componentes necesarios para realizar las prácticas previstas con este dispositivo en la asignatura de Electrónica Digital. De esta forma, se ahorra tiempo en el montaje y se gana seguridad en el funcionamiento, para que así el alumno pueda centrarse en la programación y funcionamiento del dispositivo. Estas placas se llevan utilizando desde hace varios años con grupos de numerosos alumnos y han funcionado perfectamente.

Palabras Clave — Electrónica Digital, Microcontrolador, PIC16F88, ATMega328, Arduino UNO, Arduino NANO

I. INTRODUCCIÓN

La realización de prácticas con dispositivos microcontroladores en una placa de prueba tiene los inconvenientes del exceso de tiempo para el montaje y su debilidad, lo que ocasiona un malfuncionamiento debido a algún fallo de conexión. Un ejemplo claro es el panel alfanumérico de LCD, que necesita múltiples conexiones y que cualquier error hace que no funcione. Para solucionar este problema los profesores de la asignatura de Electrónica Digital hemos construido módulos de prácticas formados por una placa de circuito impreso que contiene todos los componentes electrónicos necesarios para la realización de las prácticas propuestas en la asignatura de Electrónica Digital del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática.

II. ASIGNATURA DE ELECTRÓNICA DIGITAL

La asignatura de Electrónica Digital es una asignatura obligatoria del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática de la Universitat Politècnica de València, que se imparte en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial y Diseño Industrial y lo imparte profesores del Departamento de Ingeniería Electrónica. En el Plan de Estudios de la titulación, la asignatura está ubicada en el segundo semestre del segundo curso. Esta asignatura posee 7,5 créditos, de los cuales 3,75 son de teoría de aula, 1,5 de prácticas de aula, 1,25 de prácticas informáticas y 1 de prácticas de laboratorio. Ambos tipos de prácticas se imparten de forma conjunta en una misma sesión, que se considera como simplemente prácticas. El cuatrimestre se desarrolla a lo largo de 15 semanas, por lo que supone un total de 5 horas de clase por semana, de las cuales 1,5 horas son de prácticas. Cada semana se desarrolla una práctica que está asociada a un tema teórico.

En el Plan de Estudios de este Grado no hay otra asignatura obligatoria de contenidos específicos de electrónica digital, por lo tanto, esta asignatura se puede considerar como terminal, por lo que hay que impartir todos los conocimientos básicos de electrónica digital, lo que hace que sea una asignatura con contenidos bastante densos. Para facilitar la tarea de impartir amplio temario, los contenidos iniciales de electrónica digital (sistemas de numeración, funciones lógicas y algunos circuitos combinacionales) se imparten al final de la asignatura obligatoria del semestre anterior denominada Tecnología Electrónica.

La asignatura de Electrónica Digital posee numerosos alumnos (165 en curso 2023-24), que están divididos en varios grupos de teoría y de prácticas, por lo que hay que coordinar el material de laboratorio para que pueda ser utilizado en buenas condiciones por todos los alumnos.

A. Temario de la asignatura

El temario de la asignatura de Electrónica Digital se divide en dos parciales de duración similar (mitad de semestre). En el primer parcial se imparten los conocimientos de electrónica digital utilizando circuitos integrados estándar: tecnología de circuitos integrados digitales, circuitos combinacionales (multiplexores, codificadores, decodificadores circuitos aritméticos y lógicos), circuitos multivibradores (astable, monoestable y biestable), contadores, registros de desplazamiento y sistemas secuenciales síncronos (máquinas de Moore y Mealy).

El segundo parcial queda reservado para dispositivos digitales programables, empezando por memorias electrónicas, introducción a los dispositivos lógicos programables (PLDs) y, fundamentalmente en los dispositivos microcontroladores, centrándose en la actualidad en el ATMega328. Este dispositivo es bien conocido porque forma parte en algunas de las plataformas Arduino más sencillas y populares, como son Arduino UNO y Arduino NANO. Estas plataformas se caracterizan por su fácil programación, funcionamiento con simple conexión a USB, disponibilidad de gran cantidad de bibliotecas, etc., por lo que ha ido desbancando a otro tipo de microcontroladores usados anteriormente.

B. Temas de microcontroladores

En años anteriores el dispositivo microcontrolador utilizado en la asignatura era el PIC16F84 [1], y posteriormente PIC16F88 [2], que se programaban en lenguaje ensamblador o lenguaje C y que necesitaba un

dispositivo específico para su programación (PICKit). Con estos microcontroladores se realizaron diversas prácticas, buscando que fuesen al mismo tiempo sencillas, pero con carácter de aplicabilidad.

El problema inicial para realizar las prácticas con un microcontrolador era la conexión de sus múltiples pines, que hacía que el montaje fuese complejo, que el alumno tardara bastante tiempo en el cableado y la comprobación y que, en muchas ocasiones, ese montaje no llegaba a funcionar correctamente ocasionando al alumno una cierta frustración. Para solucionar este problema los profesores de la asignatura desarrollamos y fabricamos una placa de circuito impreso donde se colocaron los componentes que se utilizaban en la mayoría de las prácticas con ese dispositivo y con un conector para colocar el microcontrolador PIC16F88. De esta forma, se consiguió que las prácticas fuesen más rápidas de realizar, más seguras en funcionamiento y se lograba que fueran más atractivas.

III. DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO DE PRÁCTICAS

El módulo de prácticas está formado por una placa de circuito impreso con conexiones a doble cara con un conector para el PIC16F88. Este dispositivo posee dos puertos de entradas y salidas (PORTA y PORTB) de ocho bits cada uno.

Los componentes estaban unidos de una forma invariable a un determinado pin del conector del microcontrolador, pero se ha interpuesto interruptores de tipo DIP (SW6) de ocho pines. De esta forma, se puede conectar o desconectar el dispositivo a su un pin del microcontrolador y así, cuando se desconecta ese pin puede ser utilizado para otro fin. Se hizo la excepción del panel LCD que tiene conexiones fijas para evitar confusiones y errores por parte de los alumnos.

En la Fig. 1 se muestra el esquema eléctrico de esta placa realizado con el programa ISIS-Proteus de la empresa Labcenter Electronics Ltd. Este programa permite, inicialmente dibujar el esquema del circuito electrónico, y luego la compilación del programa y la simulación para así comprobar su correcto funcionamiento del circuito. Para la simulación, cada componente posee su correspondiente modelo de simulación. Posee distintos tipos de simulación, para circuitos digitales la forma más habitual es la interactiva, es decir cambiar el valor de las entradas y comprobar cómo afecta a las salidas.

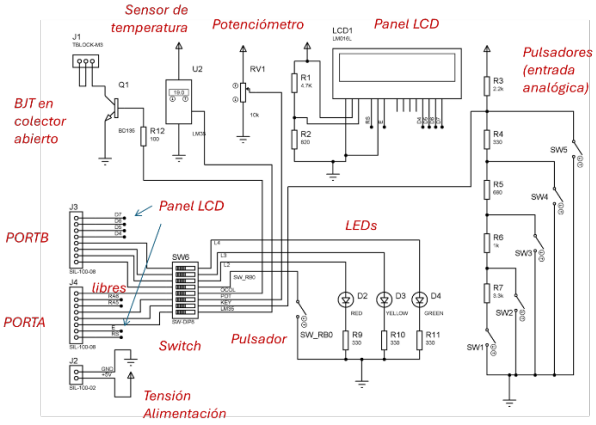


Fig. 1. Esquema eléctrico del módulo de Prácticas para el PIC16F88

A partir del esquema eléctrico se pasó a realizar, con el programa Proteus-PCB, el esquema de la placa de circuito impreso (PCB) realizando las conexiones a doble cara. En la PCB se soldó o conectó todos los componentes y se incluyó una capa de serigrafía con el nombre de todos los componentes. El resultado es la placa que se muestra en la Fig. 2.

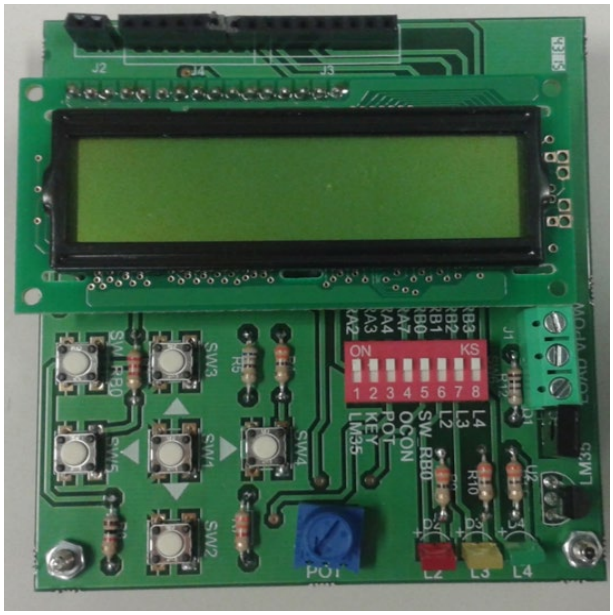


Fig. 2. Vista del Módulo de Prácticas para el PIC16F88

A. Componentes del módulo

La placa realizada posee los siguientes componentes electrónicos (Fig. 1 y Fig. 2):

a) Tres diodos LEDs de diferentes colores (rojo, amarillo y verde) con sus correspondientes resistencias limitadoras de corriente (330Ω) conectadas a masa. Actúan como tres salidas digitales.

b) Una tecla (SW_RBO) que actúa como entrada digital. Al pulsarla conecta la correspondiente entrada a masa, y sin pulsar está la entrada al aire, pero actuando como nivel alto. Para ello, hay que activar la resistencia de "pull-up" del microcontrolador.

c) Un panel alfanumérico de LCD de tamaño 16x2 del modelo HD44780U de Hitachi [3] (Fig. 3). Este dispositivo posee ocho pines para entradas de datos D[7..0], dos pines para tensión de alimentación (VDD y VSS), y el resto de pines para control: contraste de la pantalla (VE), habilitación chip (E), lectura y escritura (R/W), e indicación si se transmite datos o comandos (RS).

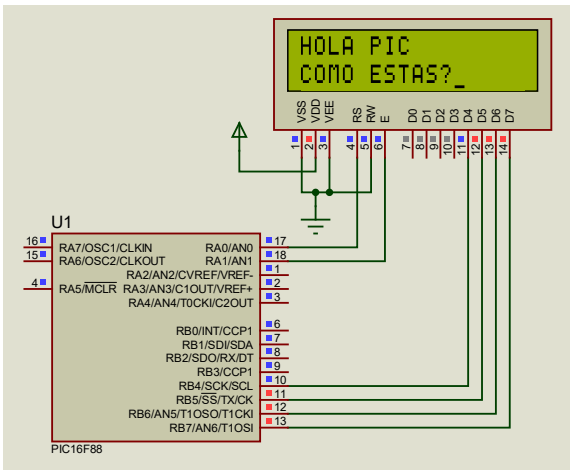


Fig. 3. Conexión panel alfanumérico HD44780U de Hitachi a PIC16F88

Para el PIC16F88 se desarrolló una biblioteca de comandos para el panel LCD que permitía utilizar solamente cuatro pines de datos, escribiéndolos en dos fases. La conexión del pin de contraste se realizó mediante dos resistencias en forma de división de tensión con los valores adecuados para obtener una tensión en VEE para una óptima visión de la pantalla (Fig. 1). El terminal RW conectado fijo a masa (solo se realiza la escritura).

d) Potenciómetro de 10 kΩ de variación manual conectado a una entrada analógica. De esta forma se introduce una tensión entre 0 y 5V. Para la simulación del potenciómetro con programa Proteus permite variar su resistencia en pasos del 1% de su valor nominal.

e) Sensor de temperatura LM35. Este sensor posee tres terminales: Vcc, GND y Vout que suministra una tensión directamente proporcional a la temperatura con un valor de 10mV/ºC y un origen de 0V a temperatura de 0ºC. El modelo para la simulación con Proteus permite la entrada de temperatura dentro del rango de 100ºC en pasos de 0,1ºC.

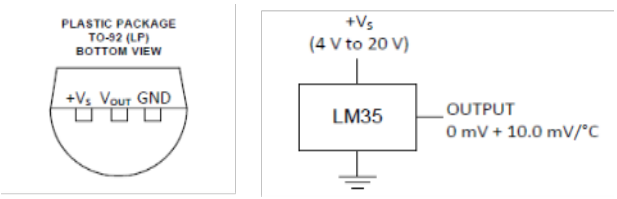


Fig. 4. Sensor de temperatura LM35

f) Teclado analógico formado por cinco teclas SW[5..1] dispuestas en forma de cruz y con una red de resistencias dispuestas para formar un divisor de tensión que se conecta a una entrada analógica del microcontrolador. Según la tecla que se pulse se obtiene un valor distinto de tensión (Fig. 5). De esta manera se puede controlar cinco teclas con una sola entrada analógica. Si cada tecla estuviera conectada a una entrada digital sería necesario utilizar cinco pines de entrada.

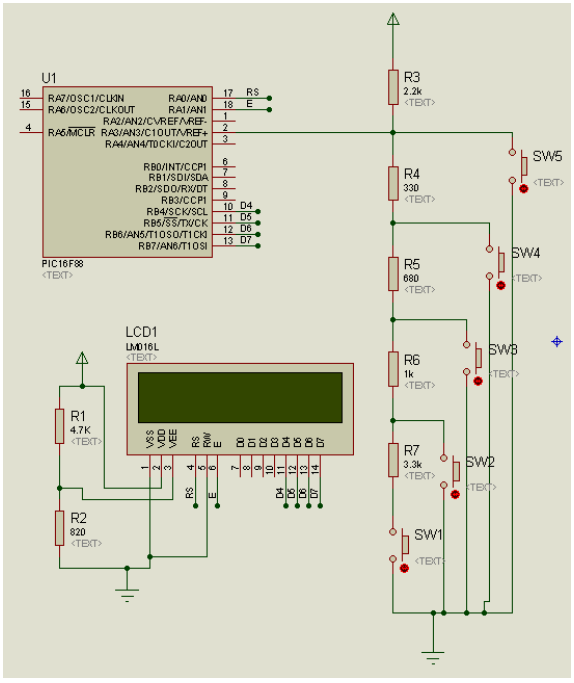


Fig. 5. Teclado con entrada única analógica

La red de resistencias está forma por cinco resistencias en serie de valores óhmicos: 2,2kΩ, 330Ω, 680Ω, 1kΩ y 3,3kΩ. La tensión de alimentación es Vcc=5V. Al pulsar cada tecla se realiza un cortocircuito de parte de las resistencias, lo que afecta a la tensión de salida del puente. Los valores de tensión obtenidos al pulsar cada tecla se indican en la Tabla 1. Si se pulsa más de una tecla tiene preferencia la de número mayor.

TABLA 1. TENSIÓN DE CADA TECLA DEL TECLADO ANALÓGICO

Tecla	*Tensión*
Ninguna	Vcc=5 V
SW1	3,53 V
SW2	2,38 V
SW3	1,57 V
SW4	0,65 V
SW5	0 V

g) Salida analógica formada por un transistor BJT modelo BD135 con resistencia de base de 100Ω y conexión de salida por el colector (abierto) para conectar una carga normalmente a una fuente de tensión de mayor valor. Realmente, la señal de salida de este dispositivo no es analógica si no modulada en ancho de pulso (PWM), por lo que es una señal pulsatoria de 8 bits (256 posibilidades) y de frecuencia elevada que hace que sus efectos aparentes sean de señal analógica (Fig. 6).

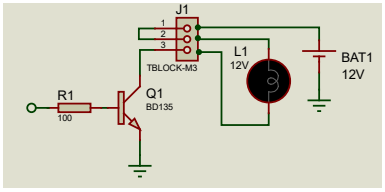


Fig. 6, control iluminación lámpara con transistor BJT y salida PWM de PIC16F88

B. *Placa de Acople*

En el curso 2018-19 los profesores de la asignatura decidimos cambiar de microcontrolador, pasando al ATMega328 en la plataforma Arduino UNO. Con este cambio, el conector de la placa que servía para conectar el microcontrolador PIC16F88 ya no servía, por ello se diseñó y construyó otra placa de circuito impreso que servía de acople con la placa de prácticas (Fig. 7), donde en los conectores machos se conecta el Arduino UNO (que posee conectores hembras) y el conector hembra de la derecha se conecta a la placa de componentes ya desarrollada. Esta placa de acople también estaba previsto para la conexión de Arduino NANO.

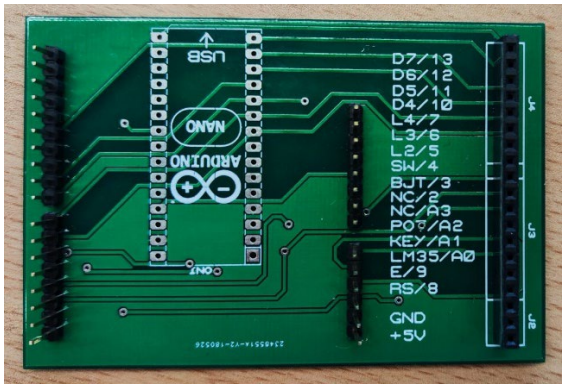


Fig. 7. Módulo de acoplamiento entre módulo de prácticas y Arduino UNO

Con esta placa de acople se obtienen nuevas conexiones con el módulo de prácticas con el microcontrolador ya que el ATMega328 posee tres puertos B, C y D de entre seis y ochos pines.

C. Nueva placa con Arduino NANO

La placa de práctica que hemos presentado, con su correspondiente placa de acople ha funcionado perfectamente durante estos últimos años y los alumnos no han tenido problemas en manejarla. Pero, lógicamente, deseamos actualizar y ampliar el material de prácticas y una de las tareas ha sido crear una placa específica para el microcontrolador que estamos utilizando, el ATMega328 (Fig. 8). A la hora de diseñar esta nueva placa se planteó que fuese lo más pequeña posible, para ello se ha decidido utilizar la plataforma Arduino NANO, que tiene el mismo microcontrolador que el Arduino UNO, pero de tamaño mucho más pequeño. Esta misma plataforma (Arduino NANO) se utiliza en la parte final del curso para realizar un trabajo consistente en el control de vehículo autodirigido [5], por lo que es interesante que el alumno se familiarice con él.

De paso, se ha aprovechado la experiencia previa para realizar algunas modificaciones en la placa, por ejemplo, se ha colocado una tecla más, puesto que en algunas aplicaciones era bastante conveniente. Se ha eliminado los interruptores (switch), que ocupan espacio y complican las conexiones de la placa. Pero a cambio, se ha incluido un conector (J3) con todos los pines del microcontrolador que no son utilizados, entre ellos Vcc, GND, AREF, etc.

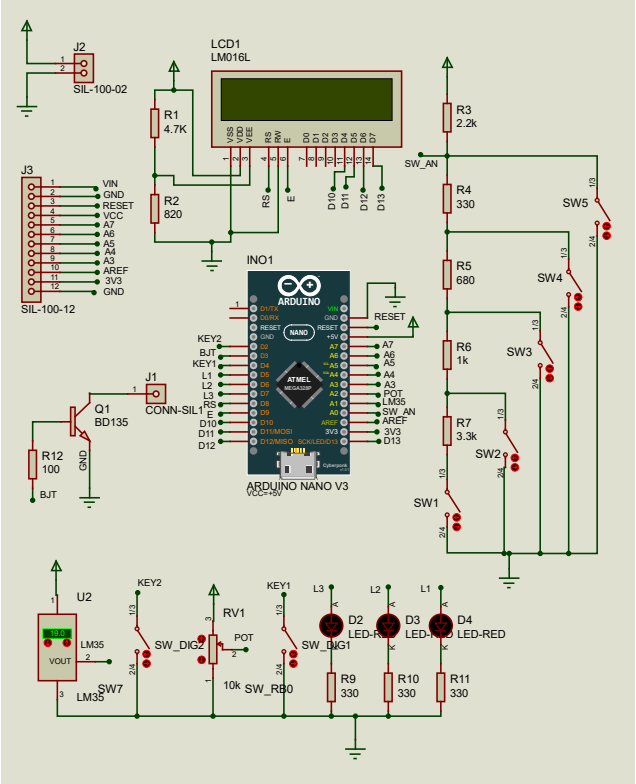


Fig. 8. Esquema modulo practicas con Arduino NANO

Se ha procurado que el diseño de la placa fuera lo más sencillo posible, para ello se ha conseguido que todas las pistas estén en una sola cara lo que facilita y abarata su fabricación (Fig. 9).

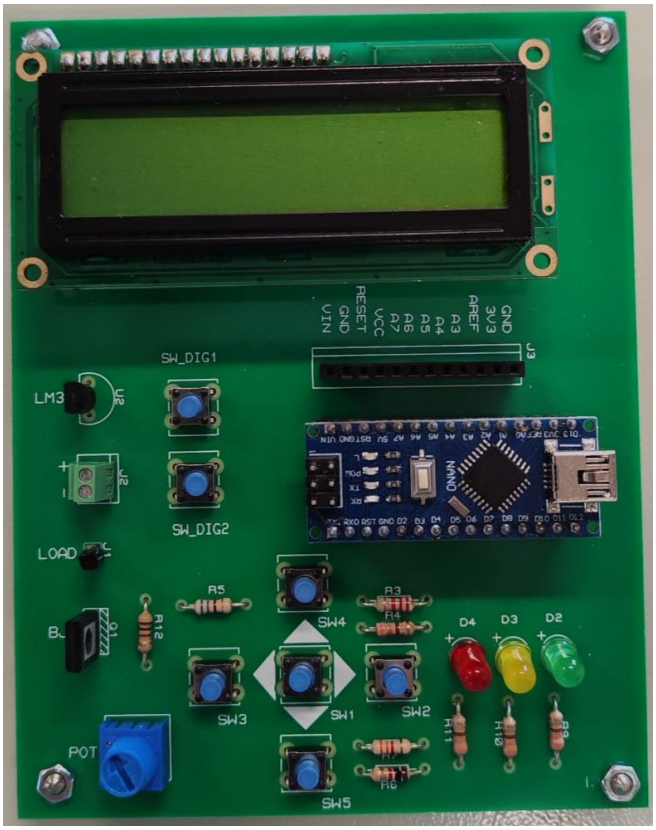


Fig. 9. Esquema de la nueva placa con Arduino NANO

IV. PRÁCTICAS REALIZADAS

Con las placas que han sido presentadas en esta comunicación llevamos bastantes años realizando una serie de prácticas que permiten comprender progresivamente las características del microcontrolador. Empezamos con las salidas y entradas digitales de forma aislada, posteriormente de forma conjunta y finalmente las entradas y salidas analógicas. La relación de prácticas es la siguiente:

a) Control de encendido y apagado de los diodos LEDs en distintas secuencias, utilizando para su control las teclas digitales. Esta práctica sirve para inicio del microcontrolador y de la placa Arduino, con programas que activen las salidas y entradas digitales.

b) Salidas digitales mediante el panel LCD, utilizando programas que generen distintos mensajes, tanto números, como texto y símbolos gráficos.

También hay una práctica de entrada de números mediante teclado matricial numérico que se puede conectar a los pines libres.

c) Entradas analógicas utilizando el potenciómetro, con programas donde se muestra en el panel LCD el valor de la tensión y también el valor del número digital obtenido con el convertidor A/D de 10 dígitos.

d) Entrada mediante sensor de temperatura LM35 donde con programas que muestren en el panel la temperatura. También se realizan variantes de programa para mostrar la tensión que genera el sensor y el número digital obtenido en la conversión.

e) Teclado analógico formado por cinco teclas en forma de cruz que se asemeja a un joystick y que según la tecla activada aparece un determinado mensaje en el panel LCD.

En la Tabla 1 se observa que los valores de tensión están bastante distanciados entre sí, esto permite que, aunque la medida no sea muy precisa, no haya confusión en cual es la tecla pulsada. El programa del microcontrolador debe determinar si el valor leído está dentro de un determinado rango, y si lo está, realizar alguna acción, como puede ser indicar la tensión en el panel LCD o escribir determinados símbolos o mensajes en dicho panel.

f) Salida analógica, mediante transistor BJT, que sirve activar una carga, por ejemplo, una pequeña lámpara de 12V y variar su luminosidad con el potenciómetro de la placa o con las teclas digitales. Según la anchura del valor alto de la señal PWM de salida se obtiene un valor de tensión media diferente, lo que hace que la lámpara se ilumine más o menos.

V. PRÁCTICAS CON DISPOSITIVOS ELECTROMECÁNICOS

Un aspecto fundamental de las prácticas con microcontrolador en la electrónica industrial es su aplicación con dispositivos electromagnéticos. Por ello, además de las prácticas que utiliza el módulo en la PCB presentado, también se realizan en la asignatura de Electrónica Digital otras prácticas donde interviene dispositivos electromagnéticos, como son diversos tipos de motores de control.

A. Control Motor paso a paso

El motor paso a paso bipolar posee dos bobinas abiertas por lo que se conectan cuatro terminales. Cada bobina se alimenta a una tensión continua, normalmente en un terminal la tensión alta y en el otro terminal tensión cero. Por cada variación de la tensión en la bobina el motor gira unos determinados grados. Si este cambio se realiza de forma constante el motor gira paso a paso.

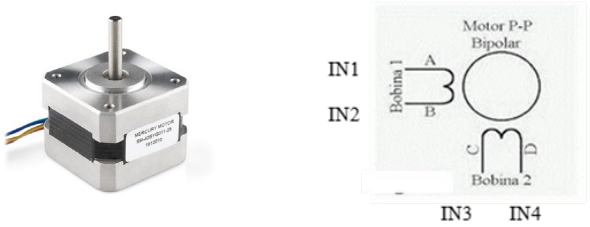


Fig. 10. Motor paso a paso bipolar

En cada extremo de las dos bobinas se aplicará una tensión positiva (H) y cero (L). Combinando la tensión en las cuatro entradas (IN1, IN2, IN3, IN4) se obtiene un motor de cuatro pasos. Realizando este cambio de tensión de forma sucesiva según se muestra en la Tabla 2 se logra que el motor vaya girando paso a paso.

TABLA 2. VARIACIÓN TENSION BOBINAS MOTOR PASO A PASO

PASO	TERMINALES			
	IN1	*IN2*	*IN3*	*IN4*
1	H	L	H	L
2	H	L	L	H
3	L	H	L	H
8	L	H	H	L

El motor paso a paso utilizado se alimenta a una tensión de 12V y necesita una amplificación de corriente que se logra mediante al C.I. L293 que posee cuatro entradas que se conectan a correspondientes salidas de microcontrolador y cuatro entradas conectas al motor (Fig. 11).

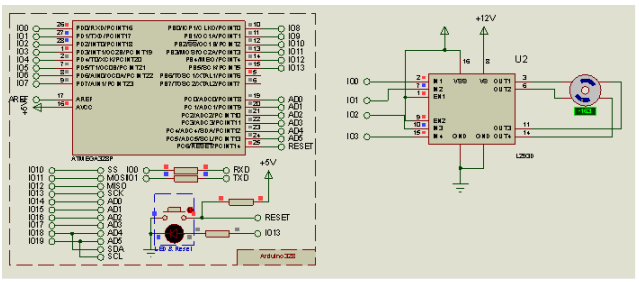


Fig. 11. Esquema circuito control motor paso a paso

Para realizar la práctica se construyó una pequeña PCB que incluye el c.i. L293 y condensadores para la estabilización de la tensión (Fig. 12).

Fig. 12. Montaje de placa control motor paso a paso

Las prácticas con este montaje consisten en generar con el microcontrolador las tensiones de salida necesarias (niveles H y L) para realizar el movimiento del motor, con los retardos adecuados para controlar la velocidad.

La práctica se complementa con variaciones de programas que realizan la parada del motor con una entrada digital, cambio de sentido de giro, aumento aparente del ángulo de giro, etc.

B. Control Servomotor Angular

El servomotor angular es un accionador giratorio que permite el control preciso de la posición angular. En la práctica se utiliza el modelo Parallax al que se le aplica una señal una señal pulsatoria con duración de 20 ms del tiempo a nivel bajo y tiempo a nivel alto variable entre 270µs y 2250µs para obtener una variación de ángulo de 180° a 0°. Para ello el dispositivo posee un complejo sistema electrónico para filtrar la señal de entrada, comparar con señal de error y un potenciómetro, y un sistema mecánico que hace girar el potenciómetro mediante un sistema de engranajes que disminuye la velocidad (Fig. 13).

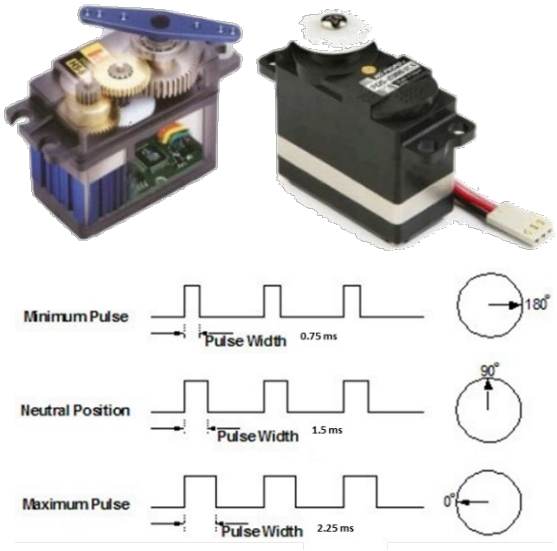


Fig. 13. Servomotor angular Parallax

Para realizar la práctica se conecta el servo directamente al microcontrolador, no hace falta circuitos electrónicos de amplificación. Simplemente se conecta una salida a entrada control servo y la tensión de alimentación de 5V. El programa debe de hacer variar el ángulo, ya sea de forma manual, calculando los tiempos de nivel alto o utilizando la librería *servo.h*. En la Fig. 14 se muestra una práctica donde se varía el ángulo del servo en función de la tensión de entrada obtenida por un potenciómetro.

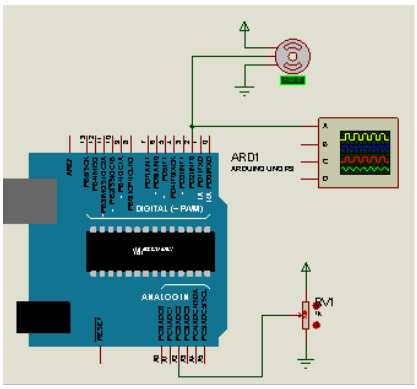


Fig. 14. Conexión de un servomotor al Arduino UNO

C. *Control Servomotor de Rotación Contínua*

Un servo de rotación continua es una variante de los servos angulares. En lugar de controlar la posición angular la señal controla la velocidad de giro. A diferencia de los servos convencionales, que tienen un rango limitado de movimiento de 0 º a 180º, un servo de rotación continua puede girar 360º en ambos sentidos de forma continua. Este motor lo utilizamos actualmente para el movimiento de vehículo autodirigido que sirve como trabajo final de la asignatura.

VI. EXPERENCIAS Y CONCLUSIONES

La experiencia docente con estas placas con microcontrolador se ha llevado a cabo a lo largo de más de 10 años en grupos de prácticas bastante numerosos. Estas experiencias han sido muy exitosas pues los alumnos pueden realizar las prácticas de forma rápida y segura, centrándose más en el desarrollo del programa en diferentes lenguajes, y observar sus resultados en la placa de forma casi instantánea.

Con estas prácticas los alumnos logran la destreza necesaria para realizar el Trabajo Final de Curso que, normalmente consiste en el control de los movimientos de un vehículo autodirigido mediante tres métodos: sigue-líneas con sensores de infrarrojos, salva-obstáculos con sensores de ultrasonidos o laser y control mediante un mando a distancia de infrarrojos [5]. Este trabajo también sirve para la evaluación de la competencia transversal: innovación y creatividad, de la que esta asignatura en punto de control.

La demostración de la bondad de estas placas comparando resultados de la evaluación global del alumnado de antes y después de su implantación es difícil de obtener, ya que los módulos se han desarrollado de forma progresiva a lo largo de varios años y, lógicamente, los alumnos no son los mismos. Quizás, el mejor indicio su efecto es la experiencia de los profesores que imparten las prácticas, porque anteriormente luchaba para que los circuitos de la práctica funcionaran adecuadamente y ahora se preocupa más en que el alumno logre conclusiones del tema que se está abordando.

REFERENCIAS

[1] F. Remiro. “Microcontrolador PIC16F84 Desarrollo de proyectos”. Ed. Ra-Ma, 2009.

[2] M. Etxebarria. “Microcontroladores PIC: Teoria y Practica. El PIC16F88X y el laboratorio”. Creaciones Copyright, 2011.

[3] https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/HD44780.pdf#page=54

[4] D. Schmidt “Arduino. Curso Completo” Ed. Ra-Ma

[5] L. Gil, “Trabajo Final de Electrónica Digital. Control de Vehículo Robotizado” TAEE – 2022

Caso de uso: Diseño, Caracterización, Prototipado y Gemelo Digital de una plataforma Stewart.

Alba Correal
Grado en Electrónica, Robótica y Mecatrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
alba.correal@uma.es

Francisco J. Ríos
Depto. de Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
fjrios@uma.es

***Abstract*—Este artículo tiene como objetivo resaltar los resultados de un demostrador en el cual se desarrolló una plataforma Stewart y su Gemelo Digital dentro del ámbito de un Trabajo de Fin de Grado. Primero, se realizó una caracterización exhaustiva de los sensores y actuadores, seguida por el montaje de los elementos mecánicos y electrónicos de la Plataforma Stewart. Posteriormente, el Hexápodo fue programado, configurado y calibrado, y finalmente, se desarrolló una interfaz de usuario que combina la animación del gemelo digital con otras entradas y salidas dinámicas para interactuar con el prototipo real. Esta metodología interdisciplinaria, como núcleo de la ingeniería electrónica, se alinea con la filosofía de prácticas de laboratorio para estudiantes en el Departamento de Electrónica de la Universidad de Málaga.**

***Index Terms*—Electrónica de Control Distribuido, Mecánica No Lineal y Paralela, Gemelo Digital, Plataforma Stewart, Mecatrónica**

I. Introducción

La Plataforma Stewart, también conocida como hexápodo, es un tipo de manipulador paralelo que cuenta con seis actuadores prismáticos, unidos por pares a tres posiciones en la base de la plataforma, lo que permite el movimiento en seis grados de libertad: desplazamiento en X, Y, Z + giro en X (pitch),Y (roll) y Z (yaw). Este diseño proporciona una mayor rigidez y una precisión más alta que la mayoría de los manipuladores paralelos robóticos.

La demostración práctica discutida en el artículo tiene como objetivo profundizar la comprensión de las operaciones y aplicaciones de la Plataforma Stewart. Además, esta demostración está diseñada para ayudar a los estudiantes a entender conceptos complejos como los sistemas de control distribuido, la mecánica no lineal, la electrónica optimizada para gemelos digitales y la instrumentación de bajo ruido. También busca desafiar el estado actual de la industria del mecanismo, abordando algunos de los problemas encontrados en otros diseños actualmente en el mercado.

Los alumnos que comprenden las complejidades de los procesos de prototipado y fabricación en mecatrónica aportan gran valor en diversas industrias. Esta experiencia no solo fomenta la colaboración interdisciplinaria, uniendo los dominios de la ingeniería mecánica, eléctrica e informática para cultivar la sinergia en equipos multidisciplinarios, sino que también asegura la calidad y fiabilidad de los aparatos mecatrónicos. Al estar al tanto de los desafíos de fabricación, los alumnos pueden diseñar productos teniendo en cuenta la fabricabilidad, reduciendo defectos y mejorando la calidad general. Además, este conocimiento les permite tomar decisiones informadas sobre materiales, procesos y técnicas de producción, optimizando costos sin comprometer el rendimiento o la calidad del producto.

II. Caracterización de Sensores y Actuadores

Los dispositivos electrónicos implementados en cualquier proyecto de robótica pueden clasificarse en 3 categorías:

- Sensores
- Actuadores
- Circuitos Integrados y Procesadores

Dado que el control distribuido es fundamental para la filosofía del proyecto, cada pata está equipada con su propio conjunto de sensores, actuadores y microprocesadores de control, lo que la hace autónoma y modular. Los sensores empleados incluyen un sensor de posición (potenciómetro lineal) y un sensor de temperatura, mientras que un motor lineal único sirve como actuador. La construcción de los efectores resultó ser el aspecto más desafiante del proceso de ensamblaje, requiriendo una precisión meticulosa y una planificación cuidadosa, ya que funcionan como el único sensor y actuador para todo el sistema.

A. Motor Lineal

El proyecto requería el uso de 6 motores paso a paso que, a pesar de ser ligeros, tendrían una precisión significativa, en el rango de los nanómetros. Por lo tanto, se utilizan los micromotores paso a paso . Sin embargo, dentro de este motor, puede haber varios modelos de caja de cambios. Después de un análisis experimental de los valores del recorrido (Tabla I) y la caja de cambios de cada modelo, se elige el micromotor 2 como el más preciso.

Según esas especificaciones, el modelo mecánico que lo define sigue el esquema especificado en la Fig. 1.

TABLE I
COMPARACIÓN DE DATOS DE LOS MICROMOTORES:

Motor	Recorrido	RT	º/paso	Paso/Recorrido	L/paso	Pitch
1	9	1:16	18	1280	7um	2,25
2	8,45	1:8	18	2560	3.3um	0,5
3	9,4	1:20	18	9450	6,75	2,7

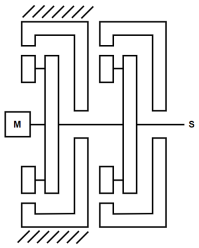


Fig. 1. Modelo mecánico del micromotor

Después de desmontar uno de los motores y analizarlo bajo el microscopio, podemos realizar el cálculo real de la relación de reducción del engranaje planetario al motor.

Nº de Dientes de la Corona Exterior:$N_r = 35$

Nº de Dientes Planetarios: $N_p = 14$

No conocemos el número de dientes del sol, pero se puede deducir sabiendo que la regla de no interferencia de los engranajes epicicloidales es:

$$\frac{N_r + N_s}{N_p} = A \rightarrow N_s = N_r - 2N_p = 7 \tag{1}$$

Por lo tanto, la reducción del planetario es tal como

$$n_p = \frac{N_r}{N_p}(n_r = 1) = \frac{35}{14} \tag{2}$$

Mientras la reducción del sol

$$n_s = \frac{N_p}{N_s} n_p = \frac{14}{7}\frac{35}{14} = 5 \tag{3}$$

Dado que hay dos etapas

$$n_{sT} = n_{s1} n_{s2} = 55 = 25 \tag{4}$$

Como se indicó anteriormente, dado que el motor gira una revolución cada 20 pasos, una revolución del engranaje será $2025 = 500$ pasos

En un segundo análisis, se obtuvieron los datos de la tabla II

Para un mejor estudio del motor, es necesario caracterizarlo cinemática y dinámicamente. Por construcción, no se debe exceder la velocidad de 1000 pasos por segundo. Por lo tanto, los valores máximos de posición, velocidad y aceleración por paso son los que se muestran en la Tabla III

TABLE II
SEGUNDO ANÁLISIS DE LOS MICROMOTORES

Motor	Recorrido	Caja de cambios	º/paso	Paso/Recorrido	L/paso	Pitch
1	9	1:16	18	1280	7um	2,25
2	8,45	1:8	18	2560	3.3um	0,5
3	9,4	1:20	18	9450	6,75	2,7

B. Potenciómetro y Reguladores Térmicos

El potenciómetro utilizado es el B102 de Sourcing Map (Fig. 2), un potenciómetro lineal de 1K $\pm$ 10 ohmios con un depósito de película delgada, probablemente una aleación de níquel-cromo sobre níquel. Se observan dos guías, una es resistiva (níquel-cromo) y la otra es conductiva (níquel) con contacto en el pin central. A lo largo de las dos guías se mueve un contacto móvil conductor (cobre) de dos aletas (una para cada guía), que conecta un valor intermedio de la resistencia total a la guía de níquel. Al medir la parte activa con un calibre,

Fig. 2. Potenciómetro por dentro

obtuvimos que la longitud total es de 8500 micrones, que es exactamente igual a la longitud total que puede cubrir el motor, ya que:

$$3.4\frac{\mu m}{paso} \cdot 2500\frac{paso}{recorrido} = 8500\frac{\mu m}{recorrido} \tag{5}$$

El potenciómetro fue pegado con adhesivo de resina acrílica asegurando que el sensor pudiera proporcionar datos para todo el recorrido del motor, logrando un valor nulo en su punto medio. Dado que la distancia total del potenciómetro es de 10 mm y el recorrido del motor es de 8.5 mm, necesitamos asegurarnos de que estén pegados juntos con un desplazamiento de 0.75 mm.

En cada lado del potenciómetro, se ha cortado y pegado una pequeña pieza de metacrilato desde el efector hasta el deslizador del potenciómetro con el adhesivo de resina acrílica.

Dado que el tamaño del motor es muy pequeño y la caja de engranajes tiene una gran reducción, el sobrecalentamiento no es infrecuente durante el uso. Para disipar parte del calor, se ha pegado un aleta térmica de 123ºC/W en el lateral del motor con pasta térmica adhesiva.

Sin embargo, se necesitaba otro elemento para recibir retroalimentación sobre el estado térmico de los motores, por lo que se construyó un sensor DS18B20 en el otro lado del motor.

Este sensor tiene su propio circuito integrado (IC) y EEPROM, lo que significa que su control es descentralizado, incluso permitiendo la configuración de ajustes de alarma no volátiles definidos por el usuario con el Comando de Búsqueda de Alarma.

TABLE III
VALORES MÁXIMOS DEL MOTOR

Posición	1 paso	3,4 um
Velocidad	1 paso/seg	3.4 um/s
Aceleración	1 paso/seg^2	3.4 um/s^2

El sensor se comunica a través del protocolo 1-Wire, y envía paquetes de datos de temperatura con una resolución programable de 9 a 12 bits al microprocesador del efector.

Mide temperaturas desde -55°C hasta +125°C (alcanzando una precisión de ±0.5°C de -10°C a +85°C), lo que se adapta perfectamente a esta aplicación.

Los componentes mencionados anteriormente fueron pegados con resina acrílica bicomponente (Cristal de Araldite) con una resistencia a la tracción de 320 kg/cm^2 y un rango de temperatura de -30ºC a 80ºC.

En resumen, el efector de control distribuido autónomo tiene la apariencia final mostrada en la Fig. 3.

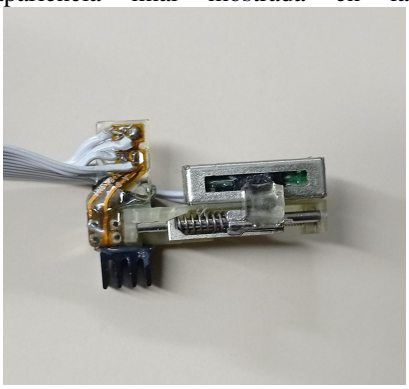


Fig. 3. Efector de la Plataforma Stewart

III. Proceso de Ensamblaje

A. Modelado

El hexápodo ha sido completamente diseñado dentro del alcance del proyecto. Más datos sobre las especificaciones precisas, así como el software y su importancia en el propósito educativo del Proyecto de Grado Final, se describen en otro artículo en este Congreso [1].

B. Ensamblaje mecánico

Para tener un diseño ad hoc rentable, utilizamos una impresora de resina de estereolitografía (SLA) para construir las patas y las bases de la plataforma.

Este podría ser el primer enfoque de muchos estudiantes hacia este tipo de método de impresión, que sigue una serie de pasos generalizados que pueden resumirse de la siguiente manera:

- Configuración y exportación del modelo 3D: Una vez que se ha desarrollado el modelo, cada componente debe ser extraído y exportado en formato .stl.
- Slicing: El modelo 3D se corta en capas horizontales delgadas utilizando software de rebanado (en nuestro caso, Cura). Cada capa representa una sección transversal del objeto final y determina cómo lo construirá la impresora.
- Configuración de la impresora: La impresora SLA se prepara para la impresión nivelando la plataforma de construcción y asegurando que el tanque de resina esté limpio y lleno con el material de resina deseado. También se configuran los ajustes de la impresora, como el grosor de capa y la velocidad de impresión, en función de los requisitos específicos del objeto que se va a imprimir.
- Proceso de impresión:
  a) Formación de la capa inicial: El proceso de impresión comienza bajando la plataforma de construcción en el tanque de resina hasta que esté justo encima de la superficie inferior. Luego, un rayo láser UV traza la forma de la primera capa del objeto sobre la superficie de la resina, haciéndola solidificar.
  b) Construcción capa por capa: Después de que se forma la capa inicial, la plataforma de construcción se mueve ligeramente hacia arriba y la superficie inferior del tanque de resina se recubre nuevamente con una capa delgada de resina líquida. Luego, el láser UV traza la forma de la siguiente capa sobre esta superficie recién recubierta, solidificándola y uniéndola a la capa anterior. Este proceso se repite capa por capa, con la plataforma de construcción elevándose gradualmente fuera del tanque de resina a medida que se agrega cada capa. El hecho de que la plataforma se eleve después de cada capa es una de las mayores desventajas de las impresoras SLA, ya que el impulso generado por este impulso causa una ligera deformación en cada una de las capas. Sin embargo, una calibración correcta puede evitar que este error sea significativo para la precisión final.
  c) Formación de la estructura de soporte: La mayoría de las piezas impresas en este proyecto requirieron la formación de estructuras de soporte delgadas y verticales debajo de la superficie. Estos soportes anclan el objeto a la plataforma de construcción y evitan que se colapse durante la impresión. Estos soportes se pueden quitar fácilmente después de la impresión. Al final de este proceso, la impresión estaba terminada, la Figura 4 muestra el hexápodo antes de ser retirado.
- Post-Procesamiento:
  a) Retirada de la impresora: Una vez que la impresión está completa, la plataforma de construcción con el objeto impreso se levanta fuera del tanque de resina.
  b) Eliminación de resina: El objeto impreso se retira cuidadosamente de la plataforma de construcción y se enjuaga en un baño de disolvente (como alcohol isopropílico) para eliminar cualquier exceso de resina que aún pueda estar adherido a su superficie. Este paso ayuda a limpiar el objeto y evita que quede pegajoso.

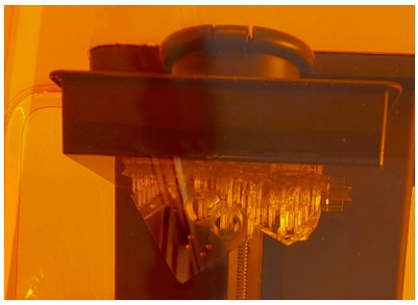


Fig. 4. Piezas del hexápodo en la impresora SLA

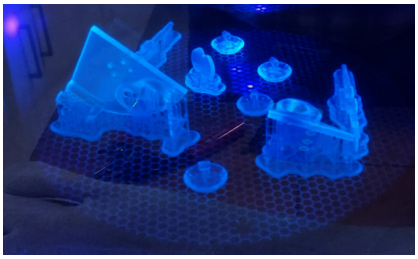


Fig. 5. Proceso de curado

c) Curado: Después del enjuague, el objeto a menudo se cura posteriormente bajo luz UV para endurecer y fortalecer completamente la resina. La Figura 5 muestra piezas durante el proceso de curado.
d) Eliminación de soportes y acabado: Cualquier estructura de soporte unida al objeto se elimina con alicates. Finalmente, los objetos pasan por un pequeño proceso de lijado para el acabado, con el resultado final mostrado en la Figura 6.

La impresión de resina SLA ofrece una alta resolución y precisión, lo que la hace adecuada para producir objetos detallados e intrincados con acabados de superficie suaves. Sin embargo, requiere un manejo cuidadoso de los materiales de resina y pasos de post-procesamiento para lograr resultados óptimos. Las piezas se imprimieron varias veces hasta alcanzar la calidad y especificaciones deseadas.

El material utilizado para la impresión fue la Clear Resin V4 de Formlabs [2].

Una vez impresas las piezas, los motores tuvieron que ser pegados a las patas. Dada la precisión del hexápodo de 3.5 micrones, no se pueden cometer errores con respecto a este aspecto del ensamblaje. Aquí es donde la mecánica y la

Fig. 6. Piezas tras lijado

electrónica van de la mano. Es por eso que, antes de ensamblar el motor en la plataforma, cada efector tuvo que ser calibrado a su posición ”nula”. Se construyó un banco de pruebas con ese propósito, que incluía un microprocesador, un controlador de motor y un conjunto de cables para conectar cada motor para su programación. Utilizando un pequeño código en C++ con la biblioteca AccelStepper [3], los motores se movieron uno por uno hasta alcanzar la posición ’0’.

Después, necesitábamos 12 juntas esféricas, dos para cada pata. Dado que el tamaño y la forma deseados no se encontraron, se cortaron 12 cojinetes de ojo de perno con una sierra eléctrica para quitar el gancho y dejar solo el rodamiento. Estos nuevos cojinetes se colocaron dentro de las salidas de plástico de la plataforma y se atornillaron tanto a una tuerca como a la pata de resina.

C. Ensamblaje Electrónico

Existen cuatro elementos principales en cuanto a la electrónica de control para el hexápodo:

Microcontrolador LGT8F328P: Crea el bucle de retroalimentación entre el motor y el potenciómetro, comanda el movimiento del motor a la posición deseada y controla los errores derivados del movimiento. Cada pata tiene el suyo. Este chip es compatible con el ATmega328P, que es comúnmente utilizado en placas Arduino como Uno, Nano y Pro Mini. Algunas características clave del LGT8F328P incluyen:

- Puede funcionar a 32MHz, el doble de la velocidad del ATmega328P que funciona a 16MHz.
- Tiene un ADC (convertidor analógico a digital) de 12 bits en lugar del ADC de 10 bits en el ATmega328P, proporcionando una entrada analógica de mayor resolución.
- Incluye un DAC (convertidor digital a analógico) integrado para salida analógica, que carece el ATmega328P.
- Tiene tres opciones de voltaje de referencia interno (1.024V, 2.048V, 4.096V) para el ADC y el DAC, en comparación con solo dos opciones en el ATmega328P.
- Tiene algunos pines de GPIO (entrada/salida de propósito general) adicionales en comparación con el ATmega328P.
- Puede operar a voltajes desde 1.8V hasta 5V, mientras que el ATmega328P requiere 5V.

El LGT8F328P es una alternativa más económica al ATmega328P que ofrece algunas ventajas técnicas, por lo que es una opción popular para placas compatibles con Arduino. Para usarlo en el IDE de Arduino, es necesario instalar un paquete de placas personalizado, lo cual es fácil de hacer.

Driver DRV883: Convierte la salida del procesador a la entrada necesaria para el control del motor. También es un interruptor de control adicional, ya que su desconexión de la placa impide que el motor se mueva. Cada pata tiene el suyo. Este driver se puede utilizar para controlar pequeños motores de CC, motores paso a paso y otras cargas inductivas. Algunas de sus especificaciones clave son:

- Es un controlador de motor de puente H dual que puede controlar dos motores independientes o un motor paso a paso bipolar.

- El DRV883 puede manejar motores de hasta 1.2A por canal, con una corriente total máxima de 2.4A.
- Opera en un rango de voltaje de alimentación amplio de 8V a 45V, lo que lo hace adecuado para una variedad de aplicaciones de motor.
- El DRV883 incluye limitación de corriente incorporada, protección térmica y protección contra sobrecorriente para proteger el controlador y los motores conectados [4].

Microprocesador TTGO-T7 V1.3 MiniESP32: Microprocesador central que conecta el gemelo digital al prototipo físico. Recibe la posición deseada de los efectores a través de WiFi y la

envía a todos los microprocesadores. También controla los errores centrales. Aquí están los detalles clave sobre esta placa:

- Está alimentado por el microcontrolador ESP32, que es un sistema en un chip (SoC) de bajo costo y bajo consumo de energía con conectividad Wi-Fi y Bluetooth integrada.
- El ESP32 en el TTGO T7 V1.3 Mini32 funciona a 240MHz y tiene 520kB de SRAM.
- La placa viene con 4MB o 16MB de memoria flash, y algunas versiones también incluyen 8MB de PSRAM.
- Cuenta con un chip USB a serie (CH9102) para programación y depuración, así como un botón de reinicio.
- El TTGO T7 V1.3 Mini32 tiene un tamaño compacto de 40.27mm x 31.07mm x 8.13mm, lo que lo hace adecuado para proyectos con espacio limitado.
- Puede ser alimentado a través del puerto Micro-USB o un conector JST de 2 pines y 1.25mm, con un rango de voltaje de operación de 2.7V a 3.6V.
- La placa admite varios interfaces de comunicación como UART, SPI, I2C y PWM, lo que le permite conectarse con una amplia gama de sensores y periféricos.
- Para el desarrollo de software, el TTGO T7 V1.3 Mini32 es compatible con el IDE de Arduino y el Marco de Desarrollo IoT de Espressif (ESP-IDF).

En general, el TTGO T7 V1.3 Mini32 es una placa de desarrollo compacta y capaz basada en ESP32 que es adecuada para proyectos de IoT, inalámbricos y embebidos [5]

Adaptadores de nivel TXS0108E: Convierten la salida de 5V del TTGO a la entrada de 3.3V del LGT8F. Se proporciona un esquemático para una correcta comprensión de la interconexión dentro de los módulos (Figura **??**).

Para ensamblar estos componentes, se necesitaron placas de soldadura perforadas, así como cables y un soldador. Cada efector tiene su placa de soldadura y una etiqueta Dymo que identifica el motor correspondiente. Todos ellos se han construido en una plataforma de metacrilato cortada con láser que se coloca debajo de la plataforma Stewart.

También se proporcionaron algunos conectores para conectar los motores a sus controladores eléctricos con buses de cables de 30 hilos de 28AWG. Además, la placa tiene interruptores de encendido y apagado que pueden controlar cada motor y evitar movimientos no deseados (Figura 8).

Dada la precisión alcanzada por el motor, es esencial que el convertidor AD tenga una desviación menor a 2.4 mV. Esta desviación es clave para todo el diseño y debe tenerse en cuenta en todo momento. Sin embargo, el factor más influyente para evitar esta desviación es utilizar una electrónica de potencia defensiva y correcta que alimente los circuitos con el menor ruido posible. Por esta razón, se ha conectado un regulador lineal de 5V a la salida de nuestra batería de Ión de Litio de 7.4V.

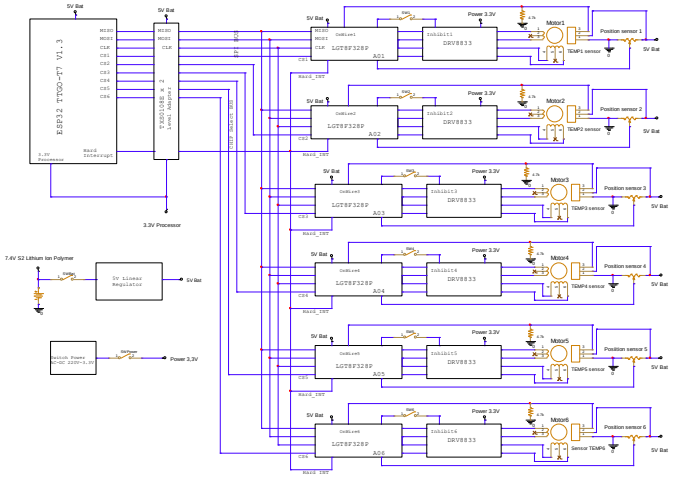


Fig. 7. Esquema eléctrico

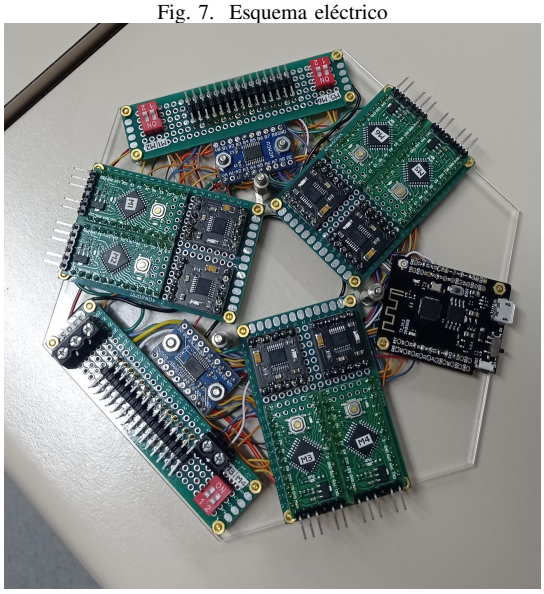


Fig. 8. Placas electrónicas montadas

IV. Configuración de la Plataforma

A. Carga de Firmware

Finalmente, el firmware necesita ser cargado dentro de la plataforma. El enfoque utilizado para la definición y carga del firmware satisface la condición de control distribuido y autónomo mencionada en la introducción. Dado que cada pata

se considera un elemento autónomo, pero, sin embargo, todas las patas tienen el mismo algoritmo de control, se utilizó un concentrador para programar cada una de las placas LGT8F. Por lo tanto, cada una de ellas tenía una IP y un puerto asignado, que se conmutaba al siguiente después de la carga.

El software utilizado para controlar el hexápodo se programó en C++ tanto en el TTGO como en el LGT8F. Como se menciona en el documento que se refiere al alcance más teórico de este proyecto, nos aseguramos de que la mayor cantidad de código se asignara a la placa de baja gama (LGT8F) y la menor cantidad se asignara al TTGO. Esto garantiza un tiempo de respuesta más bajo y un control más efectivo sobre la Plataforma Stewart.

Una de las mayores dificultades del diseño del hexápodo es su tamaño: lograr una precisión tan alta en un diseño tan pequeño definitivamente ha sido una tarea compleja. Los mecanismos de nanoposicionamiento requieren una precisión muy alta. Esto implica que la baja latencia también es crucial para una ejecución correcta.

Además, aunque la interfaz de usuario (UI) del hexápodo esté en una computadora, para que se posicione libremente en cualquier espacio, la comunicación debe ser inalámbrica desde la computadora hasta las placas. Por esa razón, se utilizó el protocolo UDP WiFi para comunicar el software Simscape Multibody con el TTGO.

Con respecto al extremo más alto del software, la comunicación, el gemelo digital es el responsable de resolver la cinemática inversa. Por lo tanto, envía una matriz 6x2 que contiene la posición deseada y el intervalo de tiempo de cada efector. Para minimizar la latencia, se utilizó UDP para enviar esta matriz al TTGO. Después, la placa TTGO envía el marco de datos específico a cada uno de los efectores a través de SPI.

B. Algoritmo de Inicio

Antes de comenzar a mover la plataforma, se debe ejecutar un algoritmo de inicio. Este algoritmo tiene dos procesos básicos.

1) Obtener una calibración mecánica correcta
   - Verificar si todos los potenciómetros devuelven un valor
   - Verificar que todos los termómetros devuelvan un valor. Si es así, definir la bandera de temperatura.
   - Configurar todos los motores en la posición '0' (inicio).
2) Seguir barridos básicos que cubran todos los límites del espacio de trabajo
3) Volver a la posición de inicio: enviar una bandera para comenzar a recibir entradas del usuario.

C. Calibración

Los cálculos de posición realizados por el gemelo digital se realizan inicialmente a partir del modelo ideal generado en Solidworks. Sin embargo, si pretendemos que el cálculo de posición coincida con la posición real del hexápodo físico, se deben realizar los siguientes ajustes de calibración:

1) Medición con calibre de las longitudes de cada una de las patas, inicialmente solidarias, pegadas y precalibradas al motor paso a paso lineal. Las longitudes efectivas de cada pata se miden después del ensamblaje y el roscado en las articulaciones de bola de la base inferior y superior. Determinación de errores de medición.
2) Medición por calibre de los espesores de las plataformas inferior y superior y de las distancias a los orígenes de cada una de las articulaciones de bola. Determinación de errores de medición.
3) Estas mediciones experimentales con sus valores de error se transfieren al modelo diseñado en Solidworks previamente parametrizado para este propósito.
4) En el modelo de Solidworks, las posiciones de las coordenadas de la base inferior y la base superior se establecen en su coordenada cero. Recuerde que el cero de la plataforma se mueve de manera simétrica en posiciones negativas y positivas en sus seis grados de libertad.
5) Transferencia del nuevo modelo 3D ajustado al formato XML para su procesamiento adicional con la herramienta Simscape. Una vez capturado, el Solver de Mathworks mostrará soluciones presumiblemente de acuerdo con el modelo real.

Sin embargo, para realizar una verificación exhaustiva del orden de posición por parte del gemelo y la posición física real que

adquirirá el hexápodo, tenemos que cerrar el ciclo realizando nuevas mediciones en las posiciones programadas en el gemelo. Para hacer esto, medimos con calibre lineal y angular un conjunto de posiciones objetivo que implican un error máximo: posiciones extremas en ejes cartesianos y posiciones extremas en ejes angulares.

Los datos experimentales en el momento de la edición de este documento aún se encuentran en la fase de recopilación y estudio.

V. Interfaz de Usuario

Simscape permite la creación de bloques interactivos para la simulación: perillas virtuales, luces, interruptores o incluso animaciones se combinan para crear una interfaz de usuario que se puede utilizar para probar tanto el gemelo digital como el prototipo en tiempo real.

En nuestro caso, utilizamos tanto un control deslizante como un cuadro de texto numérico como entradas para cada grado de libertad, cubriendo todo el espacio de trabajo de la Plataforma Stewart:

- Izquierda/Derecha: $-8.3 \leq X \leq 8.3$
- Adelante/Atrás: $-8.3 \leq Y \leq 8.3$
- Arriba/Abajo: $-4.2 \leq Z \leq 4.2$
- Rotación alrededor de Z (Guiñada): $-15 \leq X \leq 15$
- Rotación alrededor de X (Cabeceo): $-10 \leq X \leq 10$
- Rotación alrededor de Y (Alabeo): $-10 \leq X \leq 10$

Además, la interfaz incluye Diodos Emisores de Luz (LED) virtuales que, como sucedería en un Controlador Lógico

Programable (PLC), se ponen rojos cuando alguna de las patas ha excedido su dominio de espacio de trabajo. En la parte inferior, también se muestra un dígito con la posición actual de cada pata, lo que permite al usuario verificar si el hexápodo real también está en la posición correcta o readaptar la posición de esa pata específica. Esta interfaz también contiene una animación en tiempo real del gemelo digital. Juntos, sirven como una prueba de concepto perfecta de una conexión de control inalámbrico de una plataforma Stewart, factible para su uso en entornos industriales.

Los avances adicionales de esta interfaz implican un seguimiento preciso de la spline.

VI. Conclusiones

Este proyecto está orientado al desarrollo de un sistema mecatrónico multidisciplinario, donde se combinan electrónica, mecánica, control distribuido y matemáticas orientadas a la cinemática, software de diseño mecánico, software de ingeniería de sistemas. Esto es significativamente útil para prácticas de laboratorio que pueden ser transversales a diferentes departamentos dentro de una facultad de ingeniería. Así, con un mismo objetivo, se pueden enseñar muchas asignaturas curriculares. Esto puede ser el comienzo de proyectos educativos innovadores desarrollados en la Universidad de Málaga.

- Hemos desarrollado y caracterizado un efector autónomo y modular.
- Hemos modelado, impreso en SLA y ensamblado nuestra propia Plataforma Stewart.
- Hemos creado un algoritmo de control distribuido y un algoritmo de inicio que se han cargado en el hexápodo.
- También hemos diseñado un proceso de calibración.
- Finalmente, hemos desarrollado un gemelo digital y una interfaz de usuario para controlar todo el sistema.

En general, podemos ver que la configuración completa es suficiente como prueba de concepto tanto en el significado pedagógico del proyecto como en sus beneficios para la industria con respecto al enfoque adoptado (Fig. 9).

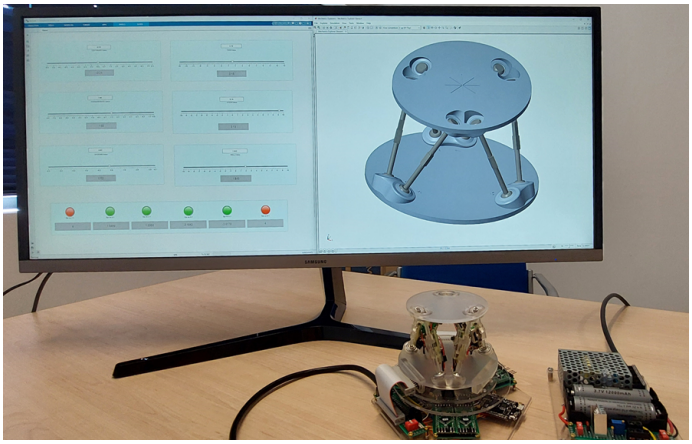


Fig. 9. Configuración completa de la Plataforma Stewart y el Gemelo Digital

VII. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Universidad de Málaga por permitir el desarrollo de nuestra investigación y fomentar nuestras mejoras en metodologías educativas.

References

[1] A. Correal and F. J. Ríos, “Design, characterization, prototyping and digital twin of a stewart platform.”
[2] Formlabs, “Clear resin — formlabs.” [Online]. Available: https://formlabs.com/store/materials/clear-resin/
[3] M. McCauley, “Accelstepper: Accelstepper library for arduino.” [Online]. Available: https://www.airspayce.com/mikem/arduino/AccelStepper/
[4] “Motor shield reference manual - digilent reference.” [Online]. Available: https://digilent.com/reference/add-ons/motor-shield/reference-manual
[5] “Ttgo t7 v1.3 mini32 — platformio v6.1 documentation.” [Online]. Available: https://docs.platformio.org/en/stable/boards/espressif32/ttgo-t7-v13-mini32.html

Laboratorio Remoto para Múltiples Plataformas de Desarrollo Basadas en FPGA

Óscar Oballe-Peinado
Departamento de Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
oballe@uma.es

Julián Castellanos-Ramos
Departamento de Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
jcramos@uma.es

José Antonio Sánchez-Durán
Departamento de Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
jsd@uma.es

Andrés Trujillo-León
Departamento de Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
atrujilloleon@uma.es

***Abstract*—En este trabajo se presenta una mejora de un laboratorio remoto basado en miniordenadores de bajo coste Raspberry Pi 4 y placas de desarrollo basadas en FPGA Nexys 3. En este caso, se han actualizado las Raspberry Pi a la nueva versión 5, para conseguir una emulación más cercana al tiempo real de periféricos externos conectados a las placas de desarrollo, y se ha añadido la posibilidad de trabajar con otra plataforma basada en FPGA (Basys 3) además de con la originalmente empleada, dando así soporte a nuevas herramientas de diseño y a necesidades de distintas asignaturas.**

Keywords—e-learning, laboratorio remoto, FPGA, Raspberry Pi, periféricos virtuales

I. Introducción

La utilización de laboratorios remotos de electrónica está experimentando un crecimiento notable, no solo en el ámbito de la educación en línea, sino también como un complemento a la enseñanza presencial [1]–[3]. En el contexto específico de asignaturas relacionadas con la electrónica digital (diseño hardware, sistemas embebidos, etc.) las placas de desarrollo basadas en FPGA se han convertido en la opción más extendida para realizar prácticas de laboratorio, dada su versatilidad [4]–[6]. Estas soluciones reconfigurables de bajo coste permiten el diseño y verificación de sistemas hardware, sistemas basados en microcontroladores y escenarios donde ambos tipos actúan en paralelo.

II. Antecedentes

El trabajo que aquí se presenta supone una mejora sobre un laboratorio remoto [7] que se diferencia de la gran mayoría de herramientas de este tipo, en que la realimentación de lo que está ocurriendo remotamente no se obtiene a partir de una señal de video proveniente de una webcam que monitoriza el comportamiento del sistema. En estos casos, el gran ancho de banda necesario para las comunicaciones entre servidor y cliente dificulta el uso de esta solución cuando las conexiones son limitadas o inestables.

Por este motivo, en nuestro laboratorio remoto los cambios de estado de los distintos periféricos que incluyen las placas de desarrollo son monitorizados en tiempo real por un miniordenador de bajo coste (Raspberry Pi) que también hace las veces de servidor de aplicación. Cada vez que se detectan estos cambios, se envía a la aplicación web los estados de los periféricos afectados para que unos componentes gráficos, que se muestran en la pantalla del ordenador, representen lo que realmente está ocurriendo en el dispositivo remoto. Hay que destacar que los diseños no son "simulados" o "emulados" de ninguna forma. Se implementan sobre hardware real y los resultados que se muestran en la pantalla de la aplicación web del laboratorio remoto muestran el estado real de la placa de desarrollo en cada momento.

Otra de las características diferenciadoras de nuestra propuesta tiene que ver con la posibilidad de emular periféricos externos que pudiesen conectarse a la propia placa de desarrollo a través de sus puertos de expansión. Procesos que corren en la placa Raspberry Pi, son capaces de recibir y enviar señales mediante los pines de entrada/salida digitales, simulando así el comportamiento de dichos periféricos externos. En nuestro caso, empleamos la placa de desarrollo Nexys 3 de Digilent [8], la cual dispone de cuatro conectores de expansión Pmod™. El catálogo de Digilent de este tipo de módulos de expansión es muy grande y variado [9], por lo que las posibilidades a la hora de desarrollar prácticas docentes son casi infinitas. La Fig. 1 muestra el laboratorio remoto que ha sido revisado en el presente trabajo.

Fig. 1 Laboratorio remoto basado en Raspberry Pi 4 y placas de desarrollo Nexys 3 de Digilent.

Precisamente, algunas de las características de esta placa de evaluación son las que han motivado la revisión del laboratorio remoto pues, en la actualidad, presenta ciertos inconvenientes:

- Está basada en una FPGA, Xilinx Spartan-6™ LX16, que no está soportada por la actual herramienta de desarrollo del fabricante, Vivado Design Suite. Esto

Este trabajo ha sido desarrollado bajo el Proyecto de Innovación Educativa PIE22-189 y financiado por el Departamento de Electrónica de la Universidad de Málaga.

obliga a seguir trabajando con una versión obsoleta del software, ISE Design Suite, cuyo ciclo de vida concluyó en febrero del año 2020 con la versión 14.7. Además, esta última versión de la aplicación fue desarrollada para ser usada sobre Windows 7 y, aunque es posible instalarla sobre Windows 10 modificando ciertos archivos después de su instalación, es totalmente incompatible con Windows 11.

- Los recursos propios de la FPGA incluida en la Nexys 3 son limitados, por lo que también tiene sentido el uso de nuevas placas de desarrollo con dispositivos FPGA con más recursos que posibiliten desarrollar diseños más complejos en asignaturas que así lo precisen.
- La placa de desarrollo Nexys 3 se encuentra actualmente descontinuada y sin stock por lo que sería imposible sustituirlas en caso de avería.

Por todo lo anterior, en este trabajo se añade al laboratorio remoto la posibilidad de trabajar con la placa Basys 3, también fabricada por Digilent y compatible con el software de diseño Vivado. El soporte de las Nexys 3 no se elimina, pues hay asignaturas que siguen basando sus sesiones prácticas en estas placas, con un alto grado de satisfacción entre estudiantes y docentes [10].

III. Descripción del Trabajo

Tras una primera migración [11] del servidor encargado del funcionamiento del laboratorio remoto desde un ordenador personal a un miniordenador Raspberry Pi 4 [12] (Fig. 1), se hacía necesario una actualización del hardware del servidor para acometer las necesidades del empleo de dos plataformas de desarrollo diferentes. Dado que se pretendía mantener el bajo coste y consumo de la anterior propuesta, se optó por la sustitución de las Raspberry Pi 4 por su versión más moderna y renovada. Las nuevas Raspberry Pi 5 están basadas en una CPU mejorada de 64 bits, 2 GHz y una GPU Cortex-A76 de cuatro núcleos basada en ARM 8.2, que proporciona un aumento de rendimiento notable con respecto a su anterior generación (2 a 3 veces en la capacidad de procesamiento), sin un aumento significativo del consumo energético (12W frente a los 8W de la Raspberry Pi 4) [13]. Esto es muy importante en nuestro caso puesto que, además de mejorar la respuesta del servidor de aplicación, permite una emulación de los periféricos externos a través de los puertos entrada/salida más cercana al tiempo real.

En el caso de la placa de desarrollo Basys 3, además de su compatibilidad con la última versión del software de diseño Vivado de Xilinx, posee características que mejoran a la Nexys 3:

- Está basada en una FPGA Artix-7™ de bajo coste, Xilinx XC7A35T-1CPG236C, que dispone de más recursos en términos de celdas lógicas, bloques de RAM, multiplicadores DSP, etc.; lo que permite soportar diseños más complejos.
- En lo que se refiere a los periféricos incluidos en la placa de evaluación, aumenta el número de interruptores y ledes de ocho a dieciséis manteniendo los cuatro displays 7 segmentos y los cinco pulsadores de la Nexys 3. En el caso de los puertos de expansión Pmod™, siguen siendo cuatro con la salvedad de que uno de ellos está conectado con el módulo XADC de la FPGA, por lo que puede configurarse para trabajar con entradas/salidas digitales o para llevar señales analógicas al dispositivo.
- Debido a sus reducidas dimensiones, permite que el laboratorio remoto siga siendo una solución compacta.

Todas estas características permiten la migración, prácticamente automática, de todo el catálogo de prácticas propuestas en las asignaturas donde hasta este momento se venía usando el laboratorio remoto como complemento a la docencia presencial en los laboratorios docentes.

A continuación, se detallan los cambios que se han introducido en el laboratorio remoto tras la actualización de la Raspberry Pi y la incorporación de la nueva placa de desarrollo (Fig. 2).

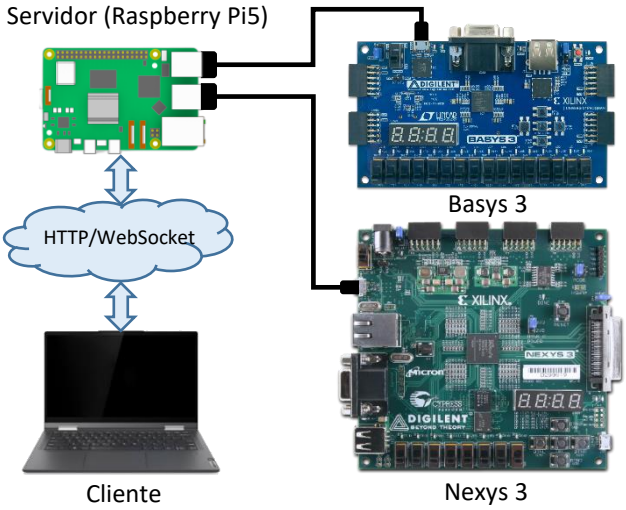


Fig. 2 Diagrama de conexiones del nuevo laboratorio remoto.

En la Fig. 3 se muestra la nueva revisión del laboratorio remoto, basado en la Raspberry Pi 5 y las placas de desarrollo Nexys 3 y Basys 3 de Digilent.

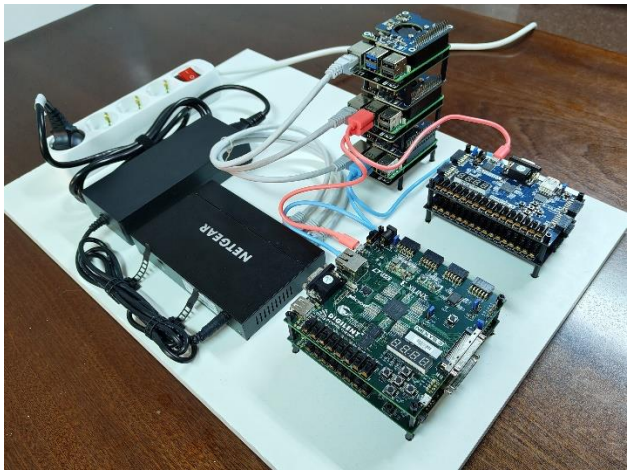


Fig. 3 Laboratorio remoto basado en Raspberry Pi 5 y placas de desarrollo Nexys 3 y Basys 3 de Digilent.

A. *Raspberry Pi 5*

Tradicionalmente, los miniordenadores Raspberry Pi usan como único dispositivo de almacenamiento una tarjeta microSD, que alberga tanto el sistema operativo como las aplicaciones y los datos. Estas tarjetas no son comparables en términos de rendimiento, capacidad y fiabilidad con otros

dispositivos de almacenamiento, pues son lentas, de baja capacidad y, lo más importante, muy poco fiables dada su facilidad para corromper los datos almacenados por fallos en la alimentación del sistema o por su uso intensivo, sobre todo con operaciones de escritura. Por todo lo anterior y gracias a que la nueva Raspberry Pi 5 dispone de soporte PCI Express, en esta revisión del laboratorio remoto se han sustituido las tarjetas microSD de 32GB por discos SSD NVMe M.2 de 250GB. Para poder conectar este dispositivo a la Raspberry Pi 5 es necesario usar una PCB adaptadora. En nuestro caso, nos hemos decantado por la "NVMe Base for Raspberry Pi 5" desarrollada por Pimoroni [14].

Otro de los cambios introducidos en el nuevo laboratorio remoto ha tenido que ver con su sistema de alimentación. En la anterior versión de nuestro laboratorio remoto, las cinco Raspberry Pi 4 usadas eran alimentadas con un cargador de diez puertos "Anker 60W PowerPort 10". Aunque este cargador ofrece un máximo, para los diez puertos, de 12A@5V, es capaz de proporcionar hasta un máximo 2,4A@5V por puerto, corriente suficiente para nuestras Raspberry Pi 4. Sin embargo, para la nueva versión 5, la Fundación Raspberry indica que pueden llegar a ser necesarios 5A@5V para alimentar cada placa [15], por lo que recomienda el uso de adaptadores de corriente de 27W para cubrir las necesidades energéticas, especialmente para aplicaciones que necesiten controlar periféricos de alta potencia, como discos duros, unidades SSDs y dispositivos externos conectados a cualquiera de los cuatro puertos USB tipo A de la Raspberry Pi 5.

Dado que, desde sus inicios, el laboratorio remoto ha sido ideado para ser eficiente en términos de consumo y espacio ocupado, se decidió usar la tecnología POE+ (Power Over Ethernet), también compatible con esta versión de la Raspberry Pi, que permite alimentar las tarjetas desde el conector ethernet. Para ello, en lugar de usar un adaptador de corriente por cada una de las placas, hemos sustituido el conmutador Gigabit de ocho puertos que usábamos en la versión anterior (TP-Link TL-GS108E) por el conmutador Gigabit Ethernet PoE+ de ocho puertos GS308EPP de Netgear. Este conmutador ofrece un total de 123W a través de sus ocho puertos Ethernet, aunque es capaz de proporcionar hasta un máximo de 30W por puerto, según el estándar 802.3at. Otra de las ventajas de este sistema de alimentación, la encontramos en la posibilidad de gestionar el encendido o apagado de las placas mediante la aplicación web integrada en el propio conmutador, decidiendo qué puertos tienen o no la alimentación activa.

Como en el caso de los discos SSDs, para poder trabajar con la tecnología PoE+ es necesario conectar una placa HAT (Hardware Attached on Top) a la propia Raspberry Pi 5. La placa empleada ha sido la "Power Over Ethernet HAT (F) for Raspberry Pi 5" del fabricante Waveshare [16]. En definitiva, utilizando esta pequeña placa HAT y un conmutador compatible con el estándar 802.3af/at, es posible proporcionar conexión de red y alimentación a una Raspberry Pi 5 a través de un solo cable Ethernet.

La Fig. 4 muestra la placa Raspberry Pi 5 con la placa NVMe conectada por la parte inferior y la placa HAT PoE+ en la parte superior.

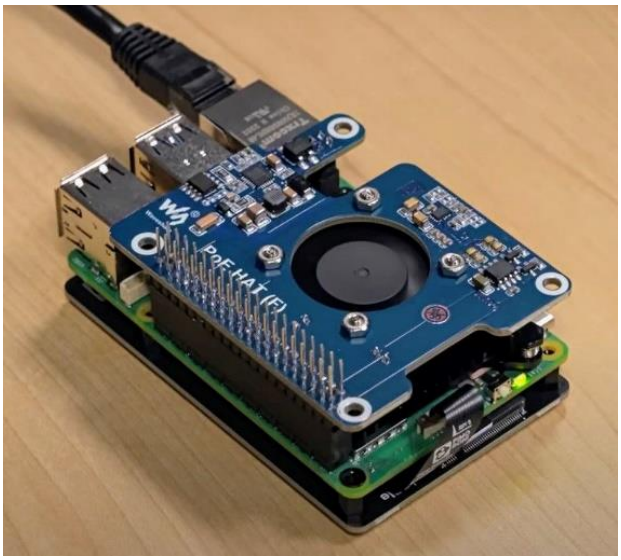


Fig. 4 Raspberry Pi 5 conectada a las placas NVMe y HAT PoE+

B. Actualización del software

El hecho de cambiar el hardware del servidor nos ha llevado a una revisión de todos los componentes software del laboratorio remoto.

- Sistema Operativo: en nuestra anterior versión basada en placas Raspberry Pi 4, se instaló la última versión disponible en aquel momento de Raspbian OS Lite (sin interfaz gráfica). Concretamente, la versión 11 (bullseye) de 32 bits. Sin embargo, para la nueva Raspberry Pi 5, hemos optado por la última versión disponible de Raspberry Pi OS Lite, 12 (bookworm), pero esta vez en su versión de 64 bits. Dado que el modelo de Raspberry Pi 5 que empleamos dispone de 8Gb de memoria RAM, con un sistema operativo de 32 bits no se podría direccionar el total de los 8Gb de RAM, por lo que emplear la versión de 64 bits se hace necesario para obtener el máximo rendimiento del hardware utilizado. Esto motivó que todo el software que corre sobre el S.O. debiera ser compatible con un sistema operativo Linux basado en Debian de 64 bits. Todos los componentes software empleados en el laboratorio remoto (servidor web, servidor de base de datos, bróker de mensajes, backend de aplicación, etc.) disponen en la actualidad de soporte de 64 bits para sistemas operativos Linux basados en Debian, incluido el paquete de utilidades que proporciona Digilent para la configuración de las FPGAs de sus placas de evaluación.
- Servidor web: en la versión previa usamos Apache, en su versión 2.4.54, como servidor web. En esta ocasión, hemos instalado su última versión estable (2.4.58).
- Servidor de base de datos: nuestro laboratorio remoto usa PostgreSQL como motor de bases de datos y, en este caso, hemos migrado de la versión 13.8 a la 15.6.
- Bróker de mensajes entre procesos en el servidor: las comunicaciones asíncronas entre los distintos procesos que conforman el laboratorio remoto se realizan a través de un motor de bases de datos en memoria llamado Redis. Entre sus aplicaciones se encuentra la de ser un bróker de mensajes y justo ese es el uso que

le damos nosotros a Redis. La versión 6.0.16 ha sido actualizada a la 7.2.4.

- Backend: el backend de la aplicación web del laboratorio remoto se ha desarrollado usando el framework de desarrollo web Django. Es de código abierto y está basado en Python. La versión 4.0.4 se ha actualizado a la 5.0.3.
- Balanceo de carga: el laboratorio remoto emplea una Raspberry Pi adicional, solo para actuar como servidor de base de datos y como balanceador de carga. Su principal cometido consiste en redireccionar las peticiones que el laboratorio remoto recibe por parte de los clientes web de los usuarios que usan el sistema, a la Raspberry Pi concreta que le fue asignada en el momento en el que ingresaron a la aplicación. Esto permite la verificación de tantos proyectos simultáneos como placas Raspberry Pi disponga el laboratorio remoto, sin que interfieran entre ellas. Además, la escalabilidad del sistema es inmediata y muy sencilla, pues bastaría con incluir un mayor número de miniordenadores Raspberry Pi conectados a placas de desarrollo, y añadir unas cuantas líneas de código en el archivo de configuración del balanceador de carga para que el laboratorio remoto pueda ser usado por un mayor número de usuarios de forma simultánea. Nosotros hemos utilizado HAProxy para estas tareas de balanceo de carga, actualizando la versión 2.2.9 por la 2.8.7.

C. Nuevo procedimiento de monitorización de periféricos

En la placa Nexys 3, el estado de sus periféricos es consultado (en el caso de los de salida) y fijado (en el caso de los de entrada) por el servidor mediante la lectura y escritura de registros implementados en la propia FPGA. La placa de desarrollo está conectada con la Raspberry Pi por su conector USB de configuración/comunicación a través de un controlador USB-JTAG/EPP (Joint Test Action Group /Enhanced Parallel Port). Por tanto, el proceso del servidor que se encarga de la motorización/actualización del estado de los periféricos emplea este protocolo EPP para las comunicaciones.

Sin embargo, la incorporación de la placa de desarrollo Basys 3 ha obligado a redefinir el procedimiento de monitorización del estado de los periféricos para dicha placa, puesto que el puerto USB de la tarjeta está conectado a un controlador USB-JTAG/UART. Este controlador se encarga de configurar el dispositivo a través del protocolo JTAG y de las comunicaciones con el servidor por el puerto UART. Por ello, el proceso de monitorización de los periféricos implementado en el servidor para esta placa tiene que ser distinto al que se emplea en la Nexys 3. De hecho, dado que uno de los periféricos implementados en el laboratorio remoto es precisamente una UART para poder recibir y enviar información a través de un puerto serie en los diseños propuestos en las prácticas, se ha tenido que desarrollar un pequeño protocolo a nivel de paquetes de datos para diferenciar lo que son consultas del estado de los periféricos por parte del servidor de la información serie, propia de los diseños de los usuarios.

D. Nuevo módulo hardware para la Basys 3

Para el correcto funcionamiento del laboratorio remoto se ha de incluir en los diseños implementados sobre las FPGAs un componente que permita la comunicación con el servidor para la monitorización de los periféricos. Dado que en la placa Basys 3, éstos han cambiado en número y que el propio protocolo de comunicación también lo ha hecho, el módulo ha tenido que ser rediseñado específicamente para esta nueva placa de desarrollo.

El módulo que permite la monitorización de los periféricos realiza dos tareas: por una parte, tiene una serie de registros en los que se almacenan los datos tanto de los periféricos de entrada como de los de salida; y, por otro lado, realiza la comunicación con la Raspberry Pi 5 para enviar y/o recibir los datos a escribir y/o leer de estos registros.

Los periféricos de entrada son mapeados en registros que son escritos por la Raspberry Pi 5 y leídos por el circuito hardware configurado en la FPGA por el usuario. Realmente, el circuito configurado hace uso de la OR lógica entre los registros de estos periféricos de entrada y los valores reales de la placa física, permitiendo así que los diseños puedan ser verificados tanto in situ como a distancia con el mismo archivo de configuración. Los periféricos de entrada disponibles en la placa de evaluación Basys 3 son dieciséis interruptores y cinco pulsadores. Es importante, para el correcto funcionamiento del laboratorio remoto, que estos interruptores y pulsadores estén siempre en el estado ‘0’ lógico en la placa conectada a la Raspberry Pi 5. Puesto que los interruptores en la Basys 3 son el doble que en la anterior placa (Nexys 3), se tiene que duplicar el número de estos registros. Este aumento es despreciable, ya que es mucho mayor el aumento en capacidad de la FPGA de la placa de evaluación Basys 3.

Los periféricos de salida son también mapeados en registros, pero esta vez es el circuito configurado en la FPGA por el usuario el que escribe en ellos, y la Raspberry Pi 5 quien lee la información almacenada. Los periféricos de salida son dieciséis ledes y cuatro displays 7 segmentos. En este caso los ledes también se duplican, pasando de ocho en la Nexys 3 a dieciséis en la Basys3, por lo que también hay que duplicar el número de los registros asociados. Este aumento carece nuevamente de importancia, pero asociado a estos periféricos de salida hay otros circuitos adicionales. En el caso de los ledes, la información que se guarda no es el estado de estos, ‘0’ o ‘1’ lógico, sino un valor codificado en 4 bits por cada led que indica un valor de luminosidad. Esto se realizó como una mejora para poder visualizar en la aplicación web distintas intensidades lumínicas cuando un led se excitaba con una señal PWM. Entonces, asociado a cada led hay un circuito que calcula el porcentaje en alto de esta señal PWM y se guarda en el registro de 4 bits antes mencionado. Estos circuitos también hay que duplicarlos, y aunque están optimizados para usar el mínimo de recursos de la FPGA, ya se trata de un aumento apreciable en comparación con el simple aumento de los registros.

Por último, hay que realizar también un cambio en el protocolo empleado para comunicar el módulo hardware requerido para el control del laboratorio remoto en la Basys 3 con la Raspberry Pi 5. En este caso, hay que usar el puerto serie UART. Ya se ha mencionado anteriormente que este puerto de comunicaciones también puede ser usado como periférico por los usuarios, luego hay que diferenciar si los datos que se escriben y/o se leen por el puerto son para la actualización o lectura de los periféricos, o por el contrario son datos para los diseños implementados por los usuarios en la FPGA. Por este motivo, se implementa un sencillo protocolo de comunicaciones basado en comandos. Cuando la

Raspberry Pi 5 tiene que actualizar un periférico de entrada, envía un paquete que consiste en una cabecera, seguida de un comando indicando una escritura, la dirección del registro correspondiente y finalmente el dato a escribir. Por otro lado, la Raspberry Pi 5 también puede solicitar una lectura de los registros de salida. En este caso, envía un paquete que consiste en una cabecera, seguida de un comando indicando una lectura, y finalmente la dirección del registro correspondiente. En este último caso, el módulo le responde con otro paquete consistente en la cabecera y el valor del dato solicitado.

Este protocolo de comunicaciones empleado tiene la ventaja de la simplicidad, pero es sensible a ser optimizado en futuras actualizaciones del módulo para mejorar el rendimiento de los procesos de comunicación.

IV. Conclusiones

Tras la revisión del hardware del laboratorio remoto que se presenta en este trabajo, se ha conseguido una mejora significativa tanto en términos de rendimiento como desde un punto de vista operativo.

Por un lado, se han renovado las Raspberry Pi por su última versión disponible, aumentando con ello las capacidades del servidor y consiguiendo una mejora en la respuesta de los periféricos externos emulados, eliminando así las restricciones temporales que limitasen los proyectos que pudieran ser validados a través del laboratorio remoto.

Por otro lado, se ha añadido el soporte para una nueva placa de desarrollo basada en FPGA (Basys 3). Así, el servidor es capaz de ofrecer al usuario la posibilidad de elegir entre dos plataformas de desarrollo (Nexys 3 y Basys 3) basadas en dos FPGAs distintas. Para ello se han redefinido los procesos de configuración/monitorización de periféricos para la Basys 3 y el módulo a incluir en los diseños en la FPGA, pues no disponen de los mismos periféricos, ni la comunicación entre la Raspberry Pi y la FPGA se realiza de la misma forma (protocolo EPP para la Nexys 3 y UART en el caso de la Basys 3).

Referencias

[1] M. Tawfik *et al.*, "Virtual instrument systems in reality (VISIR) for remote wiring and measurement of electronic circuits on breadboard," *IEEE Trans. Learn. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 60–72, 2013, doi: 10.1109/TLT.2012.20.

[2] The LiLa Project, "LiLa - Library of Labs." https://www.lila-project.org/ (accessed Mar. 31, 2024).

[3] F. Garcia-Loro *et al.*, "Remote laboratory VISIR: Recent advances, initiatives, federation, limitations and future," *IEEE Glob. Eng. Educ. Conf. EDUCON*, vol. 2021-April, pp. 1754–1757, Apr. 2021, doi: 10.1109/EDUCON46332.2021.9453961.

[4] C. Aramburu Mayoz *et al.*, "FPGA Remote Laboratory: Experience in UPNA and UNIFESP," *Adv. Intell. Syst. Comput.*, vol. 1231 AISC, pp. 112–127, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-52575-0_9/COVER.

[5] C. Monzo, G. Cobo, J. A. Morán, E. Santamaría, and D. García-Solórzano, "Remote Laboratory for Online Engineering Education: The RLAB-UOC-FPGA Case Study," *Electronics*, vol. 10, no. 9, p. 1072, May 2021, doi: 10.3390/electronics10091072.

[6] A. Magyari and Y. Chen, "FPGA Remote Laboratory Using IoT Approaches," *Electron. 2021, Vol. 10, Page 2229*, vol. 10, no. 18, p. 2229, Sep. 2021, doi: 10.3390/ELECTRONICS10182229.

[7] Ó. Oballe-Peinado, J. Castellanos-Ramos, J. A. Sanchez-Durqan, R. Navas-Gonzalez, A. Daza-Marquez, and J. A. Botin-Cordoba, "FPGA-Based remote laboratory for digital electronics," *Proc. - 2020 14th Technol. Appl. to Electron. Teach. Conf. TAEE 2020*, Jul. 2020, doi: 10.1109/TAEE46915.2020.9163676.

[8] Digilent Inc., "Nexys 3 Spartan-6 FPGA Trainer Board - Digilent." https://digilent.com/reference/programmable-logic/nexys-3/start (accessed Mar. 31, 2024).

[9] Digilent Inc., "Digilent Pmod™ Modules and Connectors - Interface with Development Boards." https://digilent.com/reference/pmod/start (accessed Mar. 31, 2024).

[10] R. Navas-González, Ó. Oballe-Peinado, J. Castellanos-Ramos, D. Rosas-Cervantes, and J. A. Sánchez-Durán, "Practice Projects for an FPGA-Based Remote Laboratory to Teach and Learn Digital Electronics," *Information*, vol. 14, no. 10, p. 558, Oct. 2023, doi: 10.3390/INFO14100558.

[11] Ó. Oballe-Peinado, J. Castellanos-Ramos, J. A. Sánchez-Durán, R. Navas-González, and J. A. Hidalgo-López, "Improving a Digital Electronics Remote Laboratory with a Raspberry Pi 4," *15th Int. Conf. Technol. Learn. Teach. Electron. TAEE 2022 - Proc.*, 2022, doi: 10.1109/TAEE54169.2022.9840642.

[12] Raspberry Pi Foundation, "Raspberry Pi 4 Model B," 2019. https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/ (accessed Mar. 31, 2024).

[13] Raspberry Pi Foundation, "Raspberry Pi 5," 2023. https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5 (accessed Mar. 31, 2024).

[14] Pimoroni Ltd., "NVMe Base for Raspberry Pi 5 – NVMe Base," 2023. https://shop.pimoroni.com/products/nvme-base (accessed Mar. 31, 2024).

[15] Raspberry Pi Foundation, "Raspberry Pi - Recommended power supplies," 2023. https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html#recommended-power-supplies (accessed Mar. 31, 2024).

[16] Waveshare, "Power Over Ethernet HAT (F) For Raspberry Pi 5," 2023. https://www.waveshare.com/poe-hat-f.htm (accessed Mar. 31, 2024).

JUEVES 27

S3A – POWER ELECTRONICS

Trazador didáctico de curvas *I-V* de módulos fotovoltaicos basado en un convertidor DC-DC comercial

Vicente Muñoz Díez
Dpto. de Ing. Electrónica y Automática
Universidad de Jaén
Jaén, España
jmunoz@ujaen.es

Luis Miguel Nieto Nieto
Dpto. de Ing. Electrónica y Automática
Universidad de Jaén
Jaén, España
lmnieto2@ujaen.es

Juan Francisco Canalejo Rodriguez
Dpto. de Ing. Electrónica y Automática
Universidad de Jaén
Jaén, España
jfcr0005@red.ujaen.es

Angel Gaspar González Rodriguez
Dpto. de Ing. Electrónica y Automática
Universidad de Jaén
Jaén, España
agaspar@ujaen.es

Slawomir Gulkowski
Institute of Renewable Energy Engineering
Lublin University of Technology
Lublin, Poland
s.gulkowski@pollub.pl

***Abstract*—El mercado de las energías renovables y en especial el sector fotovoltaico ha experimentado un significativo aumento en la última década. Los centros de enseñanza superior han de jugar un papel relevante en la formación de los profesionales que el sector está demandando y demandará en un futuro. La realización de prácticas de laboratorio resulta de vital importancia para entender el funcionamiento de estos sistemas. La caracterización eléctrica de un módulo fotovoltaico descansa en el trazado de su curva *I-V* característica. El presente trabajo presenta un novedoso trazador de curvas *I-V* con fines didácticos diseñado para ser utilizado en interior. Utilizando un convertidor DC-DC comercial de bajo coste permite representar la curva *I-V* de baja potencia (5 W) iluminado mediante un lampara halógena. Un Arduino UNO sirve de interfaz entre la electrónica implementada y un programa en LabVIEW de monitorización y control.**

***Index Terms*—Energía solar fotovoltaica, trazador de curvas *I-V*, convertidor DC-DC, sesiones prácticas, caracterización eléctrica.**

I. Introducción

El último informe de la Agencia Internacional de la Energía de 2023 [1] indica que España con un 19.1% de la demanda eléctrica cubierta con energía solar fotovoltaica, es a nivel mundial el país donde mayor penetración tiene esta fuente de energía renovable. Según esta misma agencia, España fue el cuarto mercado más dinámico en 2022 a nivel mundial, al instalar 5.45 GW de potencia fotovoltaica [2]. El número de empresas que han aparecido alrededor de este sector en los últimos años es también significativo. La asociación Unión Española Fotovoltaica (UNEF) estima que el sector emplea en España a algo más de 138.000 personas entre puestos directos e indirectos [3].

Las universidades españolas, conocedoras de la demanda de profesionales que el sector está requiriendo, han comenzado a ofertar grados y másteres centrados en la generación de energía a partir de fuentes renovables y en especial de origen fotovoltaico. Así, según la web del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades [4], el Grado en Ingeniería de la Energía se estudia en 18 universidades españolas[1]. En lo tocante a másteres relacionados con la ingeniería de las energías renovables o específicamente con fotovoltaica, 38 universidades españolas ofertan alguna titulación de esta índole. Con estos guarismos se puede afirmar que en una de cada dos universidades españolas se estudia alguna asignatura relacionada con la respuesta eléctrica de los módulos fotovoltaicos[2]

En el contexto de la ingeniería las prácticas de laboratorio tienen una vital importancia. El análisis del comportamiento eléctrico de un módulo fotovoltaico está estrechamente ligado a la medida de su curva *I-V*. De ella se pueden obtener sus parámetros característicos como la corriente de cortocircuito (I_{sc}), la tensión en circuito abierto (V_{oc}), la corriente en el punto de máxima potencia (I_{mpp}), la tensión en el punto de máxima potencia (V_{mpp}) el factor de forma (FF), y posiblemente el parámetro más importante, su potencia máxima ($P_{max} = V_{mpp} \times I_{mpp}$). El trazado de dicha curva resulta de suma importancia y debe ser parte imprescindible de las prácticas de laboratorio [5], [6], [7]. Sin embargo, la realización de una práctica de estas características con módulos fotovoltaicos comerciales de potencia elevada (>100 W) cuenta con ciertas dificultades:

- Se ha de contar con instalaciones al aire libre sin sombras donde colocar los módulos fotovoltaicos utilizando unos anclajes adecuados

[1]Se contabilizan los siguientes grados: Ingeniería de la Energía, Energía y Recursos Minerales e Ingeniería de Energías Renovables

[2]Se consideran las 86 universidades españolas existentes y en aquellas donde hay un grado o máster relacionado.

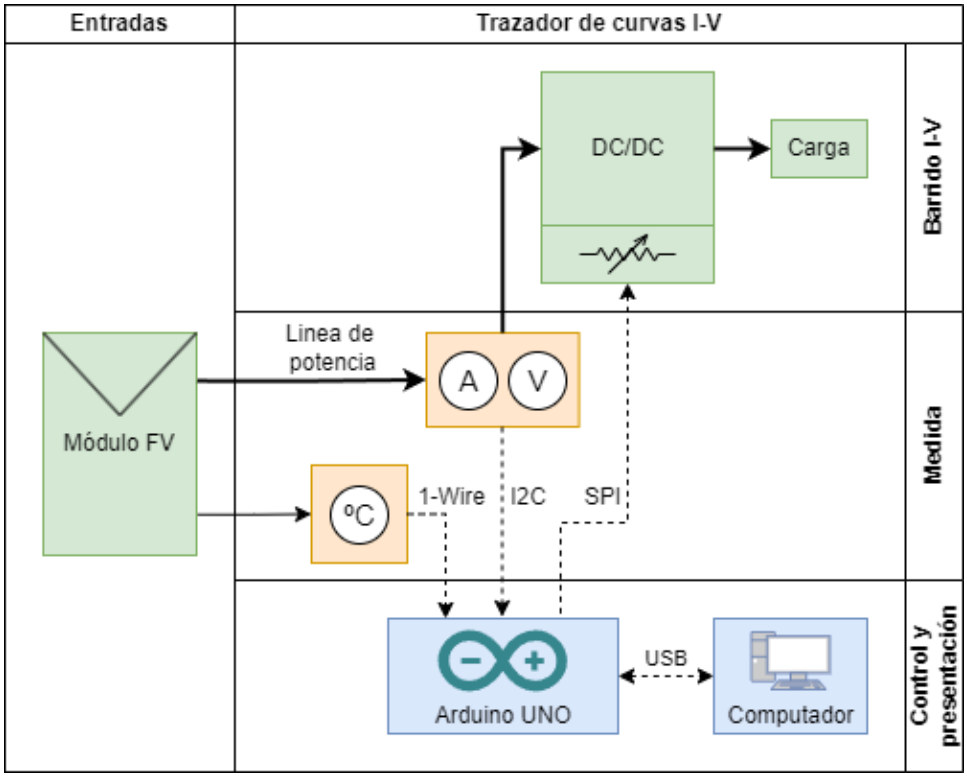


Fig. 1. Organización del hardware implementado en el trazador de curvas *I-V* didáctico.

- Los experimentos están sujetos a las condiciones climáticas y a la disponibilidad de luz solar.
- En caso de utilizar equipo comercial para trazar la curva *I-V* hay que hacer un desembolso inicial elevado.

Aunque el último de los puntos señalados ha sido salvado con mucho éxito por numerosos docentes e investigadores [8], [9], [10], [11], lo dos primeros puntos y en especial las condiciones climáticas, resultan en ocasiones insalvables. Es por ello que algunos docentes han dirigido sus esfuerzos construir sistemas de trazado de la curva *I-V* en interior utilizando una fuente de luz (lampara incandescente, halógeno, etc.) para iluminar un módulo de dimensiones reducidas.

El trabajo que a continuación se presenta aborda el diseño, implementación y ensayo de un trazador de curvas *I-V* didáctico para ser utilizado en un laboratorio docente en interior. El dispositivo es capaz de trazar la curva *I-V* de un módulo de baja potencia (5 W, $V_{oc} \approx 22$ V) utilizando una luz halógena. El principio de funcionamiento descansa en un conversor DC-DC, y si bien éste está ampliamente documentado [12], [13], el diseño que se presenta incorpora una importante mejora, al utilizar un circuito comercial de extracción de energía (del termino en inglés, *Energy Harvesting*). El sistema que se presenta tiene la ventaja –sobre otros ya existentes– de permitir la modificación de su ciclo de trabajo mediante la modificación de una red resistiva externa. Así, el punto de trabajo de este último circuito es controlado externamente a través de un Arduino UNO que hace de interfaz entre toda la electrónica (conversor DC-DC, sensor de temperatura, vatímetro, entre otros) y un PC. Una aplicación desarrollada en LabVIEW es la encargada de controlar el proceso, visualizar los resultados y almacenar los datos. La Figura 1 muestra un diagrama de la organización del hardware.

Junto con la presente introducción, el documento se divide en las secciones que se detallan a continuación. En la sección Materiales y Métodos se describe el principio utilizado para realizar el proceso de trazado de la curva *I-V*, así como la electrónica que involucra a nivel de bloques. En la sección Montaje Experimental se detalla a nivel de circuito y componentes los diferentes bloques funcionales que componen el trazador de curvas *I-V*. En el apartado Resultados Experimentales se muestran los datos obtenidos y se analiza la bondad de la herramienta construida. En la sección Conclusiones se enumeran las principales objetivos que se han alcanzado con este trabajo, mientras que en el apartado Líneas Futuras de Trabajo, se abordan los posibles avances y desarrollos que este trabajo deja abiertos.

II. Materiales y Métodos

Son varios los principios físicos que pueden ser utilizados para hacer variar la resistencia de entrada de un sistema que conectado a un módulo fotovoltaico, actué como carga de este último [12] [14]. Cuando se trata de aplicaciones donde se desea tener un control total del punto de trabajo del módulo

fotovoltaico, los trazadores basados en convertidores DC-DC son una solución muy utilizada [15], [16].

Los trazadores de curva *I-V* basados en convertidores DC-DC permiten variar su punto de trabajo, para de este modo modificar la resistencia de entrada del sistema. Una forma de realizar esta variación es actuando sobre el circuito de control que acciona el elemento de conmutación del convertidor, típicamente un transistor MOSFET. Técnicamente, este enfoque significa implementar un sistema que genere una señal PWM de control. Dicha implementación requiere de un diseño cuidadoso, dado que el lazo de realimentación, unido a las frecuencias de trabajo del convertidor pueden dar lugar a que el sistema no sea estable.

Sin embargo, en la actualidad los sistemas conocidos como *Solar Energy Harvesting* son capaces de modificar externamente su ciclo de trabajo actuando sobre una red de realimentación resistiva externa. Esta característica les confiere una ventaja diferenciada: pueden hacer trabajar al módulo fotovoltaico en su punto de máxima potencia. De entre las múltiples variantes de circuitos *Solar Energy Harvesting* que existen en el mercado, existe una variante de sumo interés dadas sus potenciales aplicaciones en el trazado de la curva *I-V*. Acuñados por Texas Instruments como NVDC (Narrow Voltage DC-DC), esta variante de circuitos integrados permiten controlar la tensión de trabajo del módulo fotovoltaico mediante una red resistiva externa de realimentación. Sin embargo, se debe señalar que los dispositivos NVDC carecen de un algoritmo de búsqueda del punto de máxima potencia. Tan solo son capaces de modificar su punto de trabajo en función de los valores de la red resistiva.

Estos dispositivos como el LT3652 de Analog Devices o el CN3722 de Consonance Electronics son de bajo coste e idóneos para ser conectados a módulos fotovoltaicos de baja y media potencia (2-40 W). Desde un punto de vista técnico y de prototipado presentan la desventaja de que no se fabrican en encapsulados de agujero pasante. Sin embargo, las variantes SMD existentes en el mercado, permiten una fácil implementación sobre zócalos de agujero pasante utilizando herramientas convencionales. Además y más importante, existe en el mercado un gran número de placas comerciales de bajo coste (<15 €) totalmente funcionales cuyos componentes –y en especial los componentes de la red de realimentación externa– son accesibles y reemplazables.

El trazador de curvas *I-V* de carácter didáctico que se ha implementado está basado en un un sistema de desarrollo comercial NVDC que monta el circuito integrado CN3722 de Consonance (Figura 2). Este circuito permite cargar una batería a partir de un módulo fotovoltaico. Tanto la tensión de carga de la batería como el punto de trabajo del módulo fotovoltaico pueden ser regulados mediante dos potenciómetros, respectivamente (Figura 2). De este modo si la batería demanda una potencia igual o superior a la potencia suministrada por el módulo y se actúa de manera controlada sobre la red de resistencias, la tensión de funcionamiento del módulo fotovoltaico puede variar desde la tensión de carga de la batería hasta V_{oc}. Este constituye el principio de funcionamiento de trazador de curva didáctico implementado.

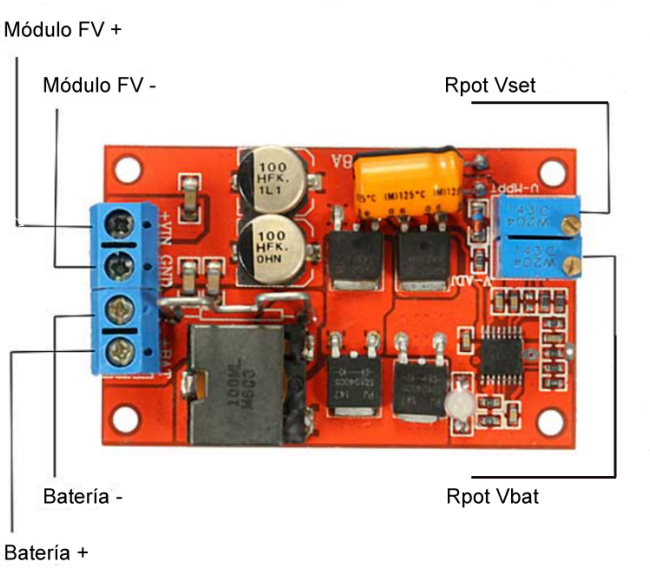


Fig. 2. Sistema de desarrollo comercial basado en el circuito integrado CN3722 de Consonance.

La variación controlada de la red resistiva puede realizarse mediante un potenciómetro digital. Si durante este barrido se registra la corriente de salida y de entrada, se obtiene la curva *I-V* del módulo fotovoltaico. Dadas las potencias manejadas (5 W) se puede utilizar un vatímetro comercial con conexión I2C capaz de registrar la tensión y la corriente de forma simultanea. Una placa Arduino UNO se encargará de ajustar el valor del potenciómetro digital y de registrar los valores de corriente y voltaje.

El Arduino permite igualmente medir la temperatura del módulo FV y de este modo predecir el punto de máxima potencia conocido V_{oc-stc}. Es sabido que para módulos de tecnología de silicio monocristalino [17], V_{mmp} puede ser calculado de forma aproximada mediante la ecuación 1.

$$V_{mpp} \approx 0.8 \times V_{oc} = 0.8 \times V_{oc-stc}(1 + \beta(T_{mod} - T_{stc})) \quad (1)$$

Donde, β en es coeficiente de temperatura de tensión en circuito abierto ($\%/°C$), T_{mod} es la temperatura del módulo fotovoltaico ($°C$) y T_{stc} es la temperatura en condiciones estándar de medida ($25\,°C$).

Conocer V_{mpp} permite espaciar los puntos de la curva *I-V* adecuadamente para aumentar la densidad de los mismos en la cercanía del punto de máxima potencia.

Cabe decir que el Arduino UNO actúa únicamente a modo de interfaz entre los periféricos conectados a éste y un PC. El microcontrolador ejecuta ordenes con arreglo a lo que se envía desde el puerto USB a través de una aplicación en LabVIEW. El Arduino UNO cuenta con un firmware específico, íntegramente desarrollado para esta aplicación que permite

una comunicación bidireccional por puerto serie implementado sobre USB.

III. Montaje experimental

A. Convertidor DC-DC

Para adaptar el sistema comercial basado en el integrado CN3722 (Figura 2) a las necesidades de la aplicación de trazado de la curva *I-V*, se ha actuado sobre la red resistiva de control del punto de operación. En la Figura 3-B aparece el sistema comercial modificado donde se han retirado las resistencias de la red resistiva de control y se han sustituido por terminales de conexión. Esta actuación posibilita la interconexión del potenciómetro digital MCP4151-104E/P, y así modificar la tensión de trabajo del conversor (V_{set}). La Figura 3-A recoge las conexiones de la nueva red resistiva formada por resistencias fijas como Ra, Rb y Rc así como el potenciómetro digital de 100 $k\Omega$ denotado por R_{pot}. Considerando la modificación llevada a cabo y teniendo en cuanta la hoja de características del CN3722, la tensión de funcionamiento del módulo fotovoltaico está dada por la ecuación 2.

$$V_{set} = V_{ref}\left(1 + \frac{Ra}{Rb + (R_{pot}||Rc)}\right. \tag{2}$$

Donde, V_{ref} es una tensión de referencia interna del integrado CN3722 que a 25°C toma un valor de 1.04 V, pero que varía con la temperatura a razón de -0.4%/°C.

La disposición de resistencias mostrada en la Figura 3-A permite aprovechar el carácter no lineal de la ecuación 2 para un óptimo desempeño del rango del potenciómetro digital. Así, para el módulo fotovoltaico que se pretende ensayar (5 W, $V_{oc} \approx$ 22 V) la densidad de puntos queda concentrada en la zona alrededor del punto de máxima potencia, estimado mediante la ecuación 1. Por último, se ha de señalar que a placa de la Figura 3-B se le ha de conectar una batería de ión-litio 18650 (2.600 mAh) de 3.7 V de tensión nominal. El potenciómetro de regulación de la tensión de la batería (Figura 2) se ha de ajustar a una tensión de carga de 5 V. La batería debe estar descargada en el momento de trazar la curva *I-V* para que el integrado CN3722 trabaje en todo momento con una potencia de entrada (módulo fotovoltaico) inferior a la potencia de salida demandada (batería).

B. Sensores

Para la medida de los valores de voltaje y corriente de los puntos de la curva *I-V* se ha empleado el módulo ADS1115 fabricado por Gravity, que monta un vatímetro INA219 fabricado por Texas Instruments junto con una resistencia shunt para la medida de la corriente. Este dispositivo se alimenta con 5 *V* desde la misma placa Arduino UNO y cuenta con una conexión I2C para la transmisión de los valores de voltaje y corriente, medidos en un rango de valores de hasta 26 *V* y 8 *A* con resoluciones de 4 *mV* y 1 *mA*. Por otra parte, para incluir los efectos de la temperatura del módulo FV en análisis posteriores, se ha incorporado un sensor de temperatura digital DS18B20. Este dispositivo es alimentado también a 5 *V* e integra, en un encapsulado TO-92, un conversor AD con resolución configurable de hasta 12 bits, y una interfaz para transmisión de las medidas sobre bus serie 1-Wire. Este bus se conecta a la placa Arduino UNO mediante tres hilos y varios metros de longitud, sin requerir etapas de acondicionamiento o de alimentación adicionales y sin necesidad de calibración previa.

C. Placa Arduino UNO

Como se indica en la Figura 1, se ha escogido una placa Arduino UNO como interfaz entre el computador, los sensores y el potenciómetro digital de control del conversor DC-DC. Con objeto de facilitar futuras expansiones y actualizaciones de la aplicación basada en LabVIEW, las funciones implementadas en el microcontrolador se han reducido a las más básicas. Una consiste en servir de interfaz entre el computador y los periféricos sobre distintos buses: 1-Wire para el termómetro digital, I2C para el vatímetro y SPI para el control del potenciómetro digital, además de las comunicaciones COM sobre USB con el computador. Estas últimas se basan en el intercambio de mensajes y paquetes de datos de longitud variable en formato ASCII, y se emplean para la transmisión de comandos y de grupos de datos. Otra función implementada en la placa Arduino consiste en la adquisición en lote de hasta 50 muestras de la curva *I-V* del módulo FV. Este proceso se inicia con la recepción de un conjunto de valores de ajuste del potenciómetro digital, que han sido previamente calculados por la aplicación LabVIEW que se ejecuta en el computador. Una vez recibidos, cada valor se aplica sucesivamente al potenciómetro digital y se adquiere la medida de voltaje y de corriente correspondiente. Siguiendo las recomendaciones indicadas en [15], en este proceso se intercalan retardos entre las muestras. Por otra parte, con objeto de reducir las exigencias de memoria en el microcontrolador, las medidas se registran como valores enteros de 16 bits, quedando expresadas en unidades de 1 *mV* para la tensión y de 1 *mA* para la corriente. Al finalizar la adquisición de la curva *I-V*, las medidas son enviadas en lote al computador para su presentación y análisis.

D. Aplicación en LabVIEW

Un programa en LabVIEW en su versión Community 2023 que cuenta con la ventaja de ser libre, es el encargado de controlar las acciones del Arduino UNO y en última instancia trazar, visualizar y almacenar los datos de la curva *I-V*. El usuario debe acceder en primer lugar a la pestaña de configuración e introducir los datos de V_{oc} y β. Tras esto tiene la opción de incorporar la temperatura del módulo o realizar una medida del mismo a través del sensor DS18B20. Tras realizar este proceso, se estima el punto de máxima potencia y a continuación el programa calcula los valores de tensión que serán barridos durante el trazado de la curva característica. Los valores de tensión se representan junto con los valores de resistencia del potenciómetro digital, los cuales tras ser debidamente codificados han de ser enviados a la memoria

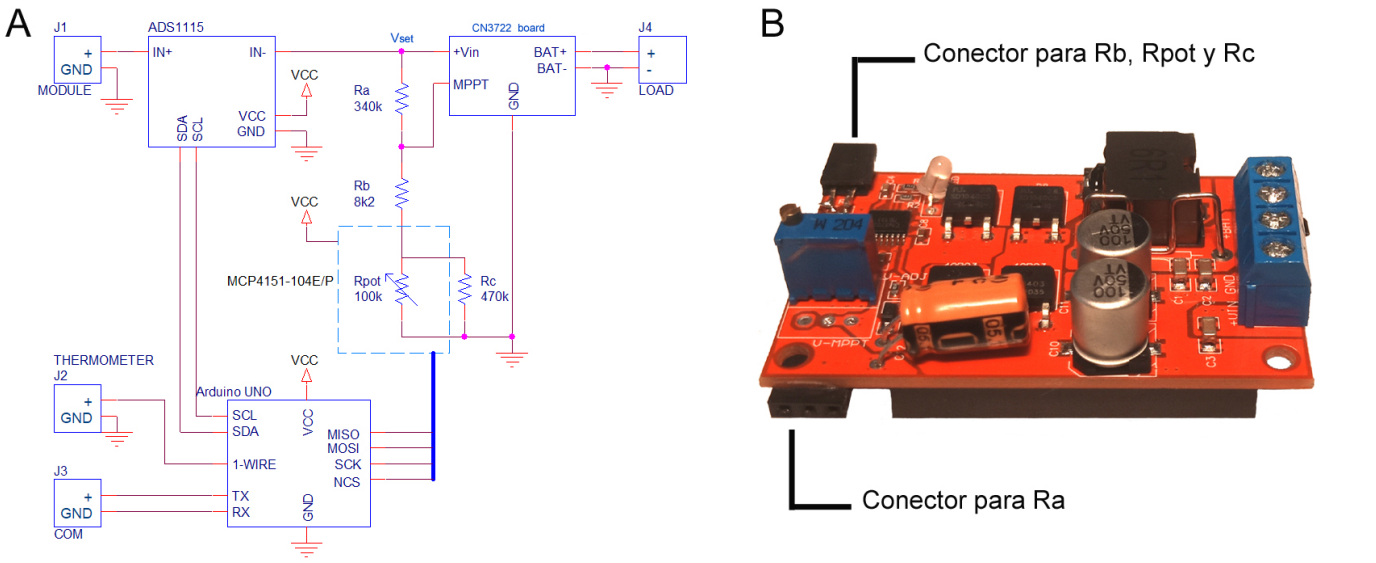


Fig. 3. A) Esquemático de conexiones del trazador de curvas *I-V* didáctico implementado. B) Sistema de desarrollo comercial basado en el integrado CN3722 tras ser reemplazada la red resistiva de control.

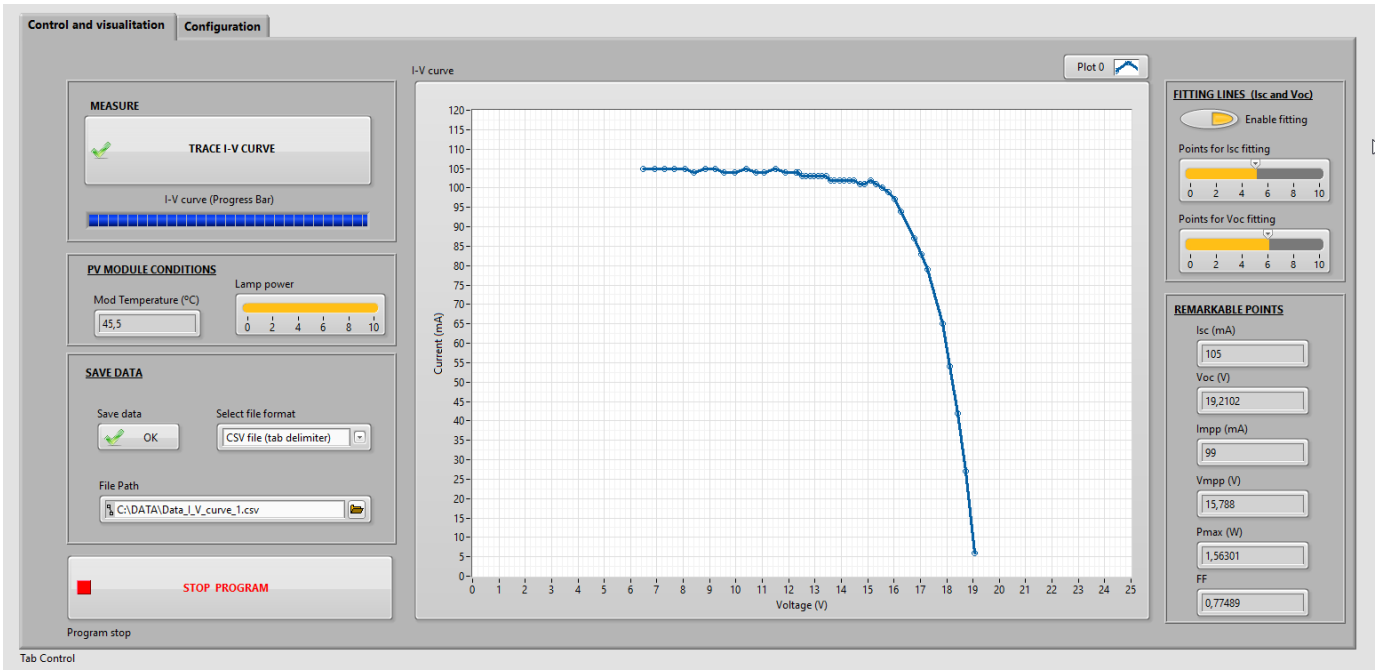


Fig. 4. Programa en LabVIEW implementado para el control, visualización y almacenamiento de los datos generados por el trazador de curvas *I-V* didáctico.

del Arduino UNO. Tras este proceso el sistema ya estaría listo para trazar la curva *I-V*.

Como se muestra en la Figura 4, en la pestaña *Control and Visualisation* se encuentran los controles que permiten al usuario lanzar la curva *I-V* y visualizarla. En la mencionada sección del programa también se muestran los puntos característicos (I_{sc}, V_{oc}, I_{mpp} y V_{mpp}), el factor de forma y la potencia máxima de la curva *I-V* experimental. Los datos obtenidos pueden ser salvados en formato CSV o Excel para su posterior análisis.

IV. Resultados Experimentales

El la Figura 4 aparece representada la curva *I-V* para el módulo fotovoltaico bajo estudio. Es importante señalar que los datos de la curva mostrada corresponden a los devueltos por Arduino UNO sin ningún tipo de posprocesado tras la captura en LabVIEW. Los resultados indican que los valores obtenidos para los puntos característicos de la curva

son coherentes considerando la temperatura de trabajo del módulo (45ºC) y que la irradiancia suministrada por la lampara halógena [3] de 500 W de potencia fue de 384 W/m^2.

Cabe mencionar que los resultados experimentales presentan una variación o rizado en la corriente, que es más acusado en la zona de la meseta de la curva *I-V* (Figura 4). Si bien son muchos los factores que se encuentran detrás de este factor indeseado, cabe citar tres. En primer lugar la irradiancia incidente es muy baja, lo que hace que la corriente generada (105 mA, máximo) sea también pequeña y los fenómenos de ruido inherentes a la medida se vuelvan más visibles. En segundo lugar la luz no incide de forma homogénea en todo el módulo. Esto último, unido a que se trata de un módulo con 36 células en serie, provoca que no solo unas células estén más iluminadas que otras, sino que también estén a diferentes temperaturas. Todo ello da lugar a una repuesta eléctrica no homogénea que es otra de las causas del mencionado rizado. Por último y no menos importante, el rizado en la corriente, que está en un rango de 4 mA, es del mismo orden que la resolución del vatímetro ADS1115 (1 mA). A modo de resumen se ha de decir que aún y cuando este efecto en la corriente es visualmente apreciable, el rizado esta en un rango del 4% de la corriente generada y por tanto, su impacto en la medida de los puntos representativos de la curva es prácticamente despreciable.

Como puede observarse en la Figura 4, la tensión mínima a la que el dispositivo puede operar se sitúa en un valor de 6,2 V, es decir, una tensión ligeramente superior a la tensión de carga de la batería conectada a la placa de desarrollo donde se integra el CN3722. Este resultado es el esperado dado que el CN3722 es un convertidor DC-DC reductor y por tanto, su tensión de trabajo mínima a la entrada está limitada por la tensión a la salida. Si se considera que la tensión de carga de la batería se ha fijado a 5 V y son tenidas en cuenta las perdidas de los elementos internos de conmutación, se puede deducir que la tensión mínima de trabajo debe estar entorno a los 6 V, como es el caso.

Esta última circunstancia obliga a estimar la corriente de cortocircuito del módulo fotovoltaico. Para ello el programa en LabVIEW incorpora una utilidad que realiza un ajuste lineal con los puntos de menor tensión (más a la izquierda en la curva de la Figura 4). El corte en ordenadas de dicho ajuste lineal correspondería con la corriente de cortocircuito. El usuario puede seleccionar desde el menú de control el número de puntos que pueden ser incorporados en dicho ajuste. De igual modo se ha actuado para proceder al cálculo de V_{oc}. Se ha implementado un ajuste lineal con los puntos de mayor tensión de la recta resultante y se ha calculado el punto de corte con el eje de abscisas. El usuario puede del mismo modo elegir el número de puntos en dicho cálculo. Se ha de destacar que de las pendientes de las rectas obtenidas para I_{sc} y V_{oc} se pueden obtener parámetros experimentales interesantes desde un punto de vista didáctico, como son la resistencia paralelo (R_p) y la resistencia serie (R_s), respectivamente.

[3]Para en el ensayo realizado la irradiancia fue medida mediante una célula calibrada de igual tecnología que el módulo utilizado

V. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un novedoso trazador de curvas *I-V* didáctico que utiliza un circuito integrado comercial de extracción de energía (*energy harvesting*). El sistema ha demostrado su eficacia a la hora de trazar la curva *I-V* de un módulo fotovoltaico comercial de pequeña potencia (5 W, V_{oc}= 22 V). El trazador está pensado para ser utilizado en interior utilizando una lampara halógena de 500 W de potencia. Esta característica lo hace idóneo para laboratorios docentes que no disponen de instalaciones al aire libre o cuando las condiciones climáticas no son las apropiadas. Su bajo coste y la utilización de componentes electrónicos disponibles en los canales de distribución habituales, representa otro punto a favor del diseño presentado. El sistema cuenta con una aplicación en LabVIEW de control y visualización que permite almacenar los datos de la curva para su posterior análisis. Por último, el preciso control del punto de trabajo del módulo FV que el sistema proporciona, abre la puerta a la implementación de extensiones software que permitirán estudiar y ensayar en el laboratorio, diferentes algoritmos de búsqueda del punto de máxima potencia programados por el alumno.

VI. Líneas futuras de trabajo

En relación al hardware, actualmente está en desarrollo el control de un sistema de iluminación para ofrecer al usuario el ajuste de la irradiancia incidente sobre el módulo FV. Otro objetivo consiste en calibrar el módulo bajo test para implementar un sistema de medida de I_{sc} y de la irradiancia. Otra mejora consistirá en el diseño y fabricación de una PCB que integre las funcionalidades que ofrecen las placas comerciales empleadas en este trabajo. Una vez se cuente con un diseño definitivo se procederá a realizar un análisis comparado de los resultados utilizando otras sistemas de medida de la curva *I-V*. Igualmente se estimará la incertidumbre de la medida asociada al sistema construido.

En relación al software, se tiene previsto adaptar la aplicación LabVIEW para que pueda ser expandida con la implementación de diversos algoritmos de búsqueda del punto de máxima potencia del módulo FV. Esta última funcionalidad se pretende integrar junto con una aplicación remota que facilite la operativa del usuario a través de Internet. Por último, una vez se cuente con un diseño definitivo, resulta imprescindible realizar un análisis del nivel aceptación que esta herramienta tenga entre alumnos y docentes, una vez se implemente en asignaturas relacionadas con sistemas fotovoltaicos.

References

[1] IEA, "Snapshot of global pv markets 2023. task 1 strategic pv analysis and outreach," International Energy Agency. Photovoltaic power systems programme, Tech. Rep. Report IEA-PVPS T1-44:2023, 2023, http://www.iea-pvps.org.

[2] IEA "Trends in photovoltaic applications. task 1 strategic pv analysis and outreach," International Energy Agency, Tech. Rep. REPORT IEA PVPS T1-43:2023, 2023, http://www.iea-pvps.org.

[3] UNEF, "Informe anual. unef 2023," Unión Española Fotovoltaica, Tech. Rep., 2023, https://www.unef.es/es/descargar-documento/ce908f58c52f03cb7f29e699dff644b7.

[4] I. y. U. Ministerio de Ciencia, "Qué estudiar y dónde en la universidad (qedu). busqueda de títulos," página web del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Último Acceso 31 de marzo 2024. http://siiu.universidades.gob.es/QEDU/.

[5] M. Premkumar, R. Sowmya, M. I. Mosaad, and T. A. Abdul Fattah, "Design and development of low-cost photovoltaic module characterization educational demonstration tool," *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 5433–5440, 2021, international Conference on Innovations in Clean Energy Technologies (ICET2020). [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320368322

[6] A. Cordeiro, M. Chaves, P. Gâmboa, F. Barata, P. Fonte, H. Lopes, V. F. Pires, D. Foito, T. G. Amaral, and J. F. Martins, "Automated solar pv simulation system supported by dc–dc power converters," *Designs*, vol. 7, no. 2, 2023. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2411-9660/7/2/36

[7] C. Jamroen, P. Komkum, S. Kohsri, W. Himananto, S. Panupintu, and S. Unkat, "A low-cost dual-axis solar tracking system based on digital logic design: Design and implementation," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 37, p. 100618, 2020.

[8] P. Casado, J. Blanes, C. Torres, C. Orts, D. Marroquí, and A. Garrigós, "Raspberry pi based photovoltaic i-v curve tracer," *HardwareX*, vol. 11, p. e00262, 2022.

[9] R. dos Santos, J. Ferreira, G. Martins, K. de Souza, and E. Sá, "Low cost educational tool to trace the curves pv modules," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 8, pp. 1392–1399, 2017.

[10] J. J. Maestro Ibirriaga, X. M. de Mendiluce Pena, A. Opritescu, D. Sera, and R. Teodorescu, "Low-cost, high flexibility i-v curve tracer for photovoltaic modules," in *2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, May 2010, pp. 1210–1215.

[11] J. Montes-Romero, M. Piliougine, J. V. Muñoz, E. F. Fernández, and J. De la Casa, "Photovoltaic device performance evaluation using an open-hardware system and standard calibrated laboratory instruments," *Energies*, vol. 10, no. 11, 2017.

[12] Z. Y. and X. W., "A comprehensive review of topologies for photovoltaic i–v curve tracer," *Solar Energy*, vol. 196, pp. 346–357, 2020.

[13] E. Duran, J. M. Andujar, J. M. Enrique, and J. M. Perez-Oria, "Determination of pv generator i-v/p-v characteristic curves using a dc-dc converter controlled by a virtual instrument," *International Journal of Photoenergy*, p. 13, 2012.

[14] E. Duran, M. Piliougine, M. Sidrach-de Cardona, J. Galan, and J. M. Andujar, "Different methods to obtain the i-v curve of pv modules: A review," in *2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, May 2008, pp. 1–6.

[15] Y. Zhu, "An adaptive i-v curve detecting method for photovoltaic modules," in *2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*, 2018, pp. 1–6.

[16] K. Tse, B. Ho, H. Chung, and s. Hui, "A comparative study of maximum-power-point trackers for photovoltaic panels using switching-frequency modulation scheme," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 51, pp. 410 – 418, 05 2004.

[17] F. Spertino, J. Ahmad, A. Ciocia, P. Di Leo, A. F. Murtaza, and M. Chiaberge, "Capacitor charging method for i–v curve tracer and mppt in photovoltaic systems," *Solar Energy*, vol. 119, pp. 461–473, 2015.

Un enfoque educativo en ingeniería a través del diseño de un vehículo eléctrico fotovoltaico

Daniel Rosas-Cervantes
Departmento de Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
dr@uma.es

José Fernández-Ramos
Departmento de Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
jfernandezr@uma.es

***Abstract*— En el presente trabajo se presentan dos ediciones de un proyecto dirigido al diseño y fabricación de prototipos de vehículos eléctricos ligeros cuya única fuente de energía proviene de un generador fotovoltaico. Estas experiencias de aprendizaje basado en proyectos (ABP) se proponen como alternativa para adquirir e integrar los conocimientos de ingeniería, y también como un complemento a la formación de los estudiantes, porque resultan una herramienta idónea para la enseñanza de dichos estudios, y además responden a la demanda de formación práctica de los estudiantes. El trabajo se completa con el análisis y valoración de la experiencia por parte de los estudiantes.**

Keywords—Vehículo eléctrico fotovoltaico, aprendizaje basado en proyectos (ABP), habilidades de ingeniería, tecnologías de aprendizaje, resolución de problemas.

I. INTRODUCCIÓN

Un problema común en los estudios de ingeniería es la alta tasa de abandono de estudiantes en los primeros cursos [1][2][3]. Este problema puede surgir debido a la percepción de los alumnos de que están aprendiendo una gran cantidad de conocimientos inconexos y no comprenden la utilidad o relevancia de cada uno [4][5]. Como respuesta a este problema, algunos autores [6][7][8] proponen el aprendizaje basado en proyectos (ABP) como una forma de presentar a los estudiantes problemas o proyectos complejos que requieren la aplicación de conocimientos de diversas disciplinas de ingeniería. Estas estrategias buscan integrar los contenidos de los primeros cursos, permitiendo a los estudiantes conectar los conceptos y entender cómo se relacionan entre sí en situaciones del mundo real [9]. Además, aplicando el ABP, se busca proporcionar a los estudiantes una visión más amplia y práctica de cómo aplicar sus conocimientos a problemas reales [10]. Este enfoque resulta idóneo para aumentar la motivación de los estudiantes al mostrarles la relevancia y el propósito de lo que están estudiando. Por otra parte, les proporciona habilidades prácticas, como trabajo en equipo, resolución de problemas complejos y toma de decisiones, que son fundamentales en el campo de la ingeniería para los futuros ingenieros. En este trabajo presentamos dos experiencias de proyectos interdisciplinarios que nos permiten replantear el enfoque educativo, integrando los conceptos de ingeniería sobre un vehículo eléctrico fotovoltaico. (Véase Fig. 1)

Fig. 1. Vehículo eléctrico fotovoltaico.

El vehículo es un cuadriciclo realizado con tubos de aluminio ensamblados y paneles sándwich. El ensamblaje del vehículo se ha realizado mediante unión mecánica con remaches. Asimismo, el sistema de tracción consta de dos motores (modelo Crystalyte G40), que dependiendo de su posición en el eje delantero o trasero proporcionarán una tracción delantera o trasera al vehículo. Además, estos motores se disponen en configuración de diferencial electrónico. Por otra parte, el vehículo cuenta con un sistema de dirección de barras y un sistema de frenado hidráulico. La única fuente de energía proviene del generador fotovoltaico que monta en la parte superior del chasis y que se ha diseñado y fabricado íntegramente con células SunPower™ C60.

II. HIPÓTESIS

Un programa de aprendizaje basado en proyectos (ABP), transversal a las titulaciones de Grado de Ingeniería, compartido por estudiantes de diferentes titulaciones y desarrollado en paralelo con los primeros cursos reforzará la motivación de los estudiantes por sus estudios, ayudará a reducir las tasas de abandono y reforzará la adquisición de competencias transversales de difícil adquisición en las asignaturas oficiales, tales como la integración de conocimientos adquiridos en diferentes materias, el trabajo en un equipo multidisciplinar, la comunicación con profesionales del sector, la participación en un proceso productivo real y la integración de requisitos de eficiencia económica junto a los estrictamente tecnológicos.

El diseño y desarrollo de vehículos eléctricos ligeros (VEL) se considera muy apropiado para integrarse en un programa de Aprendizaje basada en Proyectos (ABP) en el ámbito de la ingeniería por las siguientes razones:

- Requiere la implementación de una amplia gama de tecnologías en ingeniería industrial, como electrónica, automatización, estructuras, fluidos, mecánica, energía, diseño, expresión gráfica, fabricación, proyectos, entre otras. Esto posibilita su integración en la creación de un prototipo tangible y funcional.
- Es una tecnología de vanguardia en constante evolución, que está generando un impacto significativo en las nuevas formas de movilidad urbana. Hay una amplia gama de nuevos diseños disponibles que pueden desarrollar los estudiantes, como triciclos y cuadriciclos con tracción integral, vehículos de alta maniobrabilidad o la integración de energías renovables en los sistemas de alimentación. Estos proyectos podrían abordar problemas reales en el ámbito de la movilidad sostenible.
- Desde un enfoque económico, el desarrollo de vehículos eléctricos ligeros requiere recursos

asequibles gracias a la amplia disponibilidad en el mercado de sus componentes básicos, tales como motores, ruedas, baterías, frenos, reguladores de potencia, procesadores, displays, entre otros, que son actualmente utilizados en bicicletas y patinetes eléctricos.

- Son excelentes para organizar competiciones entre los prototipos desarrollados por distintos grupos de estudiantes, donde se premian aspectos destacados como la eficiencia energética, el diseño o la ergonomía en la conducción. Participar en este tipo de competiciones ofrece un estímulo adicional para los estudiantes, incrementando su motivación.

III. Descripción del trabajo

El programa del proyecto se ha estructurado en dos etapas claras: una centrada en la formación básica y otra en la aplicación práctica del conocimiento adquirido en el diseño, fabricación y evaluación de un vehículo eléctrico fotovoltaico. En la primera etapa, se proporcionó a los estudiantes los conocimientos teórico-prácticos necesarios sobre la fabricación y funcionamiento de los vehículos eléctricos fotovoltaicos, dado que los estudiantes involucrados en el proyecto provenían de diferentes titulaciones (Véase Fig. 2). En la segunda etapa se decidió aplicar una estrategia de división en grupos de trabajo y sesiones prácticas para abordar las diferentes tareas del proyecto.

Fig. 2. Sesión de formación sobre vehículos eléctricos.

La ingeniería-ABP se basa en una estrategia práctica en la que los estudiantes desarrollan habilidades para aplicar, comprender y ser capaces de evaluar un sistema real. En el proyecto de diseño y fabricación de un vehículo fotovoltaico, se involucran diferentes habilidades prácticas, como cortar, taladrar, adhesión de materiales plásticos, ensamblaje de sistemas mecánicos, distribución de elementos eléctricos, diseño, soldadura y montaje de componentes electrónicos en el vehículo. (Véase Fig. 3 y Fig. 4)

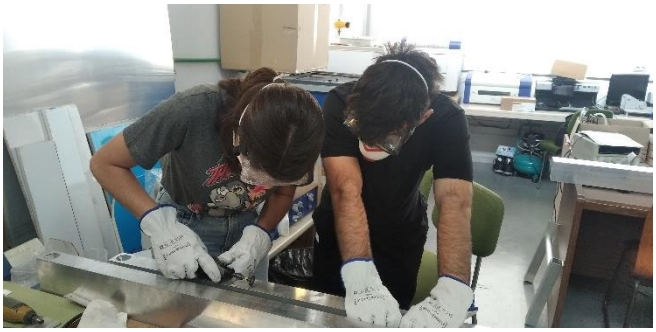


Fig. 3. Trabajos de mecanizado en el taller.

Fig. 4. Soldadura de células fotovoltaicas del generador.

Otro factor interesante para los estudiantes se encuentra en la detección de problemas y cómo abordarlos a la hora de fabricar un vehículo eléctrico fotovoltaico. Se enfrentan a menudo con problemas que tienen que resolver mediante pruebas de verificación, reajustes o incluso rectificaciones sobre la marcha. En este proceso aprenden a tomar decisiones y seleccionar materiales en función de sus ventajas e inconvenientes. Algunos ejemplos de esto son la redefinición del tamaño del chasis, si el vehículo frena de manera adecuada, óptimo radio de giro del vehículo, funcionamiento correcto de los sistemas electrónicos de control y de potencia del vehículo como los controladores de los motores eléctricos, verificación de luces, displays, etc.

Una vez se dispone de un vehículo funcional se realizan pruebas para evaluar el comportamiento dinámico y energético del vehículo, evaluar el modo de conducción más eficiente y establecer posibles modificaciones y/o mejoras.

Finalmente, una vez acabado el proyecto se obtienen resultados a partir de un cuestionario anónimo a los estudiantes que participaron en los proyectos que se han analizado y evaluado.

IV. PROCESO DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo pretende analizar el aprendizaje y logros alcanzados en materia de educación en ingeniería por los estudiantes que han participado en ambos proyectos de ABP. El proceso de investigación de este estudio discute y analiza la formación académica práctica en ingeniería. En los proyectos se espera que los estudiantes comprendan y conecten conocimientos básicos de ingeniería a través de aplicar el conocimiento a resolver un problema real. En este proyecto los estudiantes discuten cómo fabricar y desarrollar un vehículo eléctrico fotovoltaico, cómo es la generación de energía fotovoltaica y cómo aprovechar de forma óptima esta energía.

Se constata que los estudiantes obtienen una mayor compresión a través de ejemplos prácticos de los principios científicos, integrando teoría y práctica, que han estudiado en asignaturas tradicionales. Además, dichos estudiantes se benefician de otros conocimientos basados en la experiencia.

V. Valoración por los estudiantes

Para explorar la eficacia del ABP y el aprendizaje se preparó una encuesta, para conocer la opinión de los estudiantes sobre la experiencia de participación en los proyectos, cuyos resultados se recogen y analizan a continuación. Esta encuesta fue propuesta a los estudiantes al finalizar cada edición del proyecto. La encuesta constaba de 25 preguntas, agrupadas en diversas secciones, con las que se

pretendía recoger información sobre la experiencia del proyecto y los conocimientos adquiridos, el grado de satisfacción y, por último, recoger opiniones sobre posibles mejoras.

La mayoría de los estudiantes está de acuerdo en que el APB les motivó a poner en práctica teorías poco concretas de ingeniería eléctrica y electrónica.

En general los estudiantes consideran que han aprendido mucho más de lo que habían aprendido previamente con la metodología de clases tradicional mediante lecciones puramente teóricas o ejercicios planteados en clase. Se muestran satisfechos con la metodología empleada y el refuerzo de los conocimientos adquiridos.

En base a los resultados que se muestran en la Tabla I se pueden extraer varias conclusiones. En primer lugar, estos resultados indican que los estudiantes cuyos conocimientos previos eran insuficientes, muestran un correcto aprendizaje y mejora sustancial. Además, los estudiantes han adquirido confianza a la hora de afrontar problemas, y se sienten seguros sobre las nuevas competencias que les ha aportado su participación en el proyecto.

La Tabla I. muestra los principales datos recogidos en esta encuesta.

TABLA I. RESULTADOS DE LA ENCUESTA DE VALORACIÓN

UMA SVT (solar vehicle team) Cursos 2021/2022 y 2023/2024	
Estudiantes que han participado	20
N.º Total de encuestas / %	20 / (100%)
Frecuencia de asistencia (%) - Muy poco - Pocas veces - Media - Alta - Muy alta	 0,0 6,7 20,0 46,7 26,7
Nivel de esfuerzo (%) - Muy poco - Poco - Medio - Alto - Muy alto	 0,0 6,7 46,7 40,0 6,7
Satisfacción media (sobre 5 ptos) - Formación inicial impartida - ¿Ha contribuido afianzar y conectar conceptos de tus estudios de ingeniería? - Carga de trabajo - Nivel de habilidades o conocimientos adquiridos	**4,52** 4,8 4,46 4,73 4,1
Aumento interés por la tecnología de los vehículos eléctricos y fotovoltaicos **- Media (sobre 5 ptos) /(%Resp/%NS/NC)**	**4,6 / 100 / 0,0**
Aumento interés por las fuentes renovables de energía **- Media (sobre 5 ptos) /(%Resp/%NS/NC)**	**4,53 / 100 / 0,0**
Aumento interés por la mecánica **- Media (sobre 5 ptos) /(%Resp/%NS/NC)**	**4,46 / 100 / 0,0**
Aumento interés por la electrónica **- Media (sobre 5 ptos) /(%Resp/%NS/NC)**	**4,06 / 100 / 0,0**
Implantación como asignatura **- Media (sobre 5 ptos) / (%Resp / %N/NC)**	**4,8 / 100 / 0,0**
Satisfacción global con el proyecto	**4,93**

En la Tabla I se presenta la percepción de los estudiantes en relación con dos aspectos clave: la frecuencia de asistencia y el nivel de esfuerzo que les ha supuesto su participación en el proyecto. Estos datos subjetivos se contrastan con la información cuantitativa recopilada sobre la asistencia de los estudiantes. En este sentido, es importante destacar que el proyecto en su conjunto ha requerido un total de 695 horas de trabajo. Este valor representa el esfuerzo colectivo invertido en todas las fases y tareas del proyecto. Al analizar el promedio de horas dedicadas por estudiante, encontramos que este asciende a 27,82 horas, con una desviación estándar de 12,79 horas. El elevado valor de la desviación sugiere una importante variabilidad en el compromiso y la dedicación individual hacia el proyecto. Para visualizar de manera más clara la distribución de esfuerzo individual, la siguiente figura (ver Fig. 5) proporciona una representación gráfica de las horas dedicadas por cada estudiante. En ella se puede ver que, mientras que un conjunto importante de estudiantes ha invertido un tiempo considerablemente superior al promedio, otro conjunto ha estado muy por debajo de él. Este último conjunto ha estado formado fundamentalmente por los estudiantes que, por motivos personales o académicos, abandonaron el proyecto antes de su finalización, que ha ascendido al 20% del total. Con respecto al primer conjunto, su mayor implicación puede depender de una gran combinación de factores, aunque pensamos que los predominantes son el interés y la motivación personal. Suelen ser estudiantes con un fuerte interés y pasión en el proyecto, con un mayor sentido de responsabilidad hacia sus compromisos académicos y que quieren contribuir de manera significativa al trabajo de equipo.

Este análisis no solo nos permite comprender mejor la dinámica de trabajo dentro del grupo, sino que también puede ofrecer información valiosa para la optimización de futuras ediciones del proyecto o la implementación de nuevas estrategias.

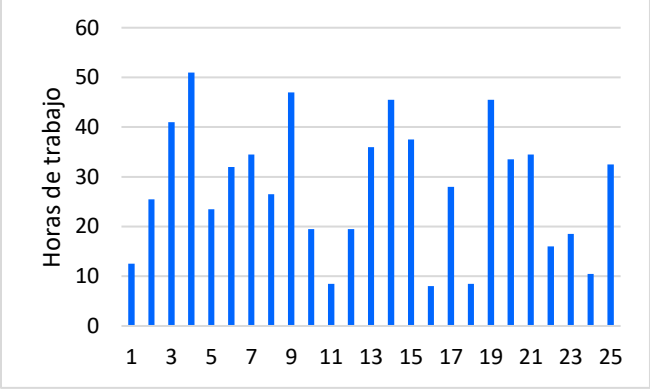


Fig. 5. Diagrama sobre las horas de dedicación de cada estudiante.

Uno de los principales objetivos de los proyectos es motivar y animar a los estudiantes a seguir aprendiendo. Los resultados que se han recogido nos indican que la participación en el proyecto ha sido realmente beneficiosa y que han aprendido una gran cantidad de contenidos prácticos que ha incrementado su interés tanto por la tecnología de vehículos eléctricos y fotovoltaicos, fuentes de energías renovables, mecánica y electrónica, como queda reflejado en la Tabla I.

Otro aspecto para tener en cuenta es el nivel de formación práctica en los currículos de las diferentes titulaciones universitarias. En este sentido, se les planteó la pregunta:

"¿Consideras adecuado el nivel de formación práctica de tus estudios?". En base a las respuestas de los estudiantes, se evidencian deficiencias en contenido práctico de las asignaturas, particularmente en los primeros cursos de las titulaciones. (Véase Fig. -6.)

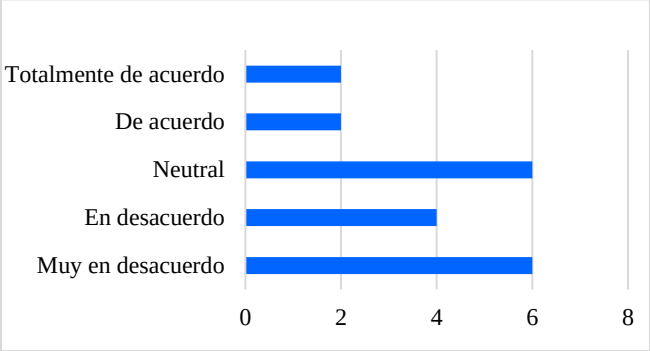


Fig. 6. Diagrama con las respuestas a la pregunta: ¿Consideras adecuado el nivel de formación práctica de tus estudios?"

Aunque es cierto que la implicación del profesorado en la identificación de las necesidades formativas de los estudiantes puede mejorar la calidad del proceso educativo y garantizar una mayor calidad y efectividad en el proceso de enseñanza-aprendizaje, consideramos que, con la participación activa del alumnado en la identificación de sus propias necesidades formativas, se promueve su autonomía, compromiso y motivación, lo que puede contribuir a un aprendizaje más significativo y satisfactorio. En la siguiente figura, Fig. 7, se puede observar un diagrama que muestra las diferentes áreas en las que consideran que necesitan mejorar su formación. Los estudiantes muestran necesidades de formación en mayor medida en el ámbito del diseño y de la electrónica con un 25% y un 20% respectivamente.

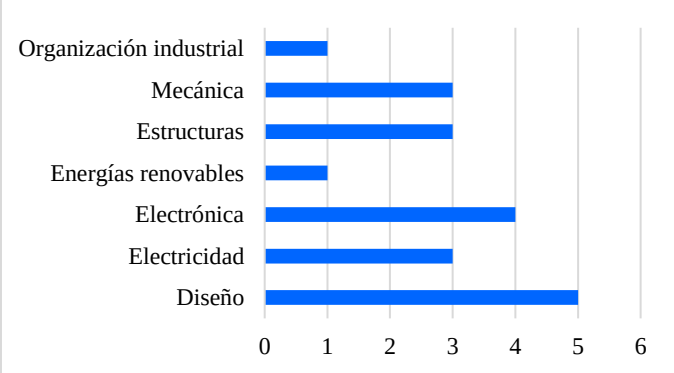


Fig. 7. Diagrama áreas con necesidades de formación.

En lo que respecta a la evaluación del impacto del proyecto en los estudiantes, aunque las calificaciones comparativas entre estudiantes que participaron en el proyecto y aquellos que no lo hicieron podrían proporcionar alguna información relevante sobre el impacto del proyecto en el desarrollo académico, no son necesariamente la única ni la mejor forma de medir dicho impacto. Consideramos que las calificaciones pueden estar influenciadas por una variedad de factores que no están directamente relacionados con las habilidades, destrezas y conocimientos adquiridos durante el proyecto. Medir el aprendizaje y los conocimientos adquiridos por los estudiantes ha implicado seguir de cerca la evolución de las habilidades, destrezas y conocimientos a lo largo de las diferentes sesiones de trabajo, y compararlas con las del inicio del proyecto. Por otro lado, mediante la encuesta disponemos de retroalimentación de los estudiantes sobre su propio desarrollo. Estas medidas cualitativas y cuantitativas ofrecen una imagen completa del impacto del proyecto en el aprendizaje de los estudiantes, que en su mayoría reflejan un incremento positivo tanto en habilidades, destrezas y conocimientos al finalizar el proyecto.

En cuanto a la organización de los grupos de trabajo, los participantes consideran mayoritariamente que un grupo de cuatro personas es el numero ideal para la distribución de las tareas. Esto también viene supeditado a la capacidad del espacio de trabajo que se disponga y el número de docentes implicados en el proyecto.

En estos proyectos siempre ha existido la directriz de que la prioridad máxima para los estudiantes es dedicar el tiempo necesario a sus estudios oficiales. Por este motivo, siempre se suspendieron los trabajos previamente y durante las épocas de exámenes. Trabajando de esta forma se pretendía afectar lo menos posible a la preparación de asignaturas oficiales por nuestros estudiantes, Para verificar esta premisa, se les planteó la pregunta: "¿Consideras que tu participación en el proyecto ha afectado de manera negativa a la preparación de tus asignaturas matriculadas oficialmente?". Como se observa claramente en la Figura 8, los estudiantes muestran estar totalmente en desacuerdo.

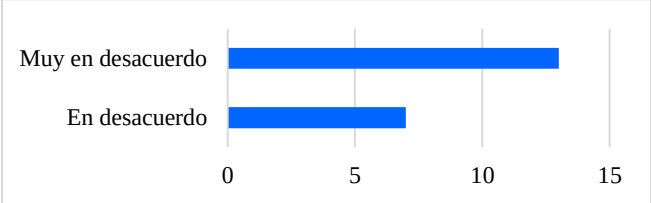


Fig. 8. Diagrama sobre el sí existe un efecto negativo en la preparación de asignaturas oficiales de los participantes.

En este tipo de experiencias, resulta a veces complicado el compromiso entre orientación y supervisión por parte de los profesores de cada una las tareas llevadas a cabo por los estudiantes. En este aspecto, siempre se ha tratado de mantener un equilibrio a la hora de tomar decisiones en la que los estudiantes se sintieran totalmente implicados. Los estudiantes consideran que los profesores encargados del proyecto estimularon el interés y les ayudaron en gran medida, con una satisfacción media de 4,86 sobre 5 puntos.

Por otra parte, atendiendo a la opinión de los estudiantes que han participado en los proyectos, el grado de satisfacción global con los proyectos es elevado (4,93). Asimismo, los estudiantes consideran que tanto la formación inicial impartida, cómo las habilidades y conocimientos que han adquirido a lo largo del proyecto han estado a la altura de las expectativas (4,8 y 4,1).

En relación con la posibilidad de integrar el proyecto como parte del currículo y convertirlo en una asignatura formal. La mayoría de los estudiantes coincide en que la componente práctica del proyecto proporciona una experiencia única al enfrentarse a problemas diarios y resolverlos sobre la marcha. Además, entienden el

funcionamiento de diversos mecanismos y componentes electrónicos, aprenden qué materiales son más adecuados para diferentes situaciones y el uso de herramientas en un entorno dónde se fomenta el aprendizaje sin miedo al error. Algunos ejemplos de las opiniones de los estudiantes resaltan los beneficios educativos y de desarrollo personal que el proyecto puede ofrecer a los estudiantes: "me encanta el mundo de la automoción y quería crear y aprender cómo hacer un coche que funcionara 100% con energía solar", "me ha resultado muy útil toda esta formación", "llevar a la práctica conocimientos", "participar en un proyecto de diseño y desarrollo real", "trabajar en equipo", "ejecución de proyectos". En resumen, la mayoría de los estudiantes considera que el proyecto tiene mucho potencial para formar parte del currículo.

Finalmente cabe señalar que entre las mejoras y observaciones aportadas por los estudiantes destaca la petición de ampliar el tiempo de sesiones y el espacio del taller. Algunos estudiantes sugieren una organización de los grupos de trabajo en base al tipo de tarea a realizar (mecánica, energía, electrónica, etc), tal como se hizo en la primera edición del proyecto. Sin embargo, los resultados en cuanto a formación transversal en diferentes materias y el avance temporal del proyecto han sido mejores en la segunda edición, en los que la organización se hizo por afinidad de horarios y en la que todos los grupos participaron en todas las tareas. Estos resultados muestran que la decisión en la nueva forma de organización parece acertada. Por lo que respecta a la formación inicial, algunos estudiantes nos han sugerido impartir una introducción a la fabricación y uso de herramientas en el taller, si bien es cierto que esta formación se fue dando a medida que se necesitaba en el desarrollo del proyecto, se tomará en consideración para futuras ediciones del proyecto.

VI. Conclusiones

La mayoría de los estudiantes se sienten satisfechos con este enfoque de aprendizaje e incluso lo recomendarían para que fuese incluido en una asignatura oficial. Los resultados muestran mejoras potenciales tanto en las habilidades como en los conocimientos de los estudiantes que participaron en el proyecto. Esta retroalimentación positiva puede considerarse un indicador de la eficacia de la metodología utilizada, respaldando la eficacia del ABP y puede contribuir a la implementación de otros programas educativos similares.

La evaluación de estas experiencias muestra que la metodología es adecuada y realmente efectiva y atractiva para los estudiantes. La percepción de los profesores también es buena y anima a continuar con la implementación de proyectos de este tipo en futuros cursos. Se proponen como mejoras disponer de un diario de sesiones online accesible para la consulta de los avances realizados por cada uno de los grupos en sus sesiones de trabajo. Además, en este diario de sesiones se recogerían los problemas y dificultades encontradas, y la metodología a la hora de dar y plantear soluciones.

Los resultados nos indican que los estudiantes en general han consolidado sus conocimientos previos, mejorado su aprendizaje, tienen una visión más global como ingenieros, y se sienten capaces de aplicar los conocimientos que tienen usando el sentido común y siendo críticos con la mejor forma de actuar a la hora de afrontar la solución de un problema real.

Acknowledgment

Este trabajo forma parte de una experiencia de educación basada en proyectos financiada por el Programa "Key-Project" del Vicerrectorado de Innovación Social y Emprendimiento de la Universidad de Málaga. (http://www.link.uma.es/k-project/)

References

[1] https://estadisticas.mecd.gob.es/ (acceso 10 abril de 2022)

[2] Meyer, M. and Marx, S. (2014), Engineering Dropouts: A Qualitative Examination of Why Undergraduates Leave Engineering. J. Eng. Educ., 103: 525-548. https://doi.org/10.1002/jee.20054

[3] Berlanga, V., Figuera, P., y N. Pérez-Escod. 2016. "Academic performance and persistence of study bursary holders". Revista de Cercetare Si Interventie Sociala, 54: 23–35.

[4] Constante-Amores, A. et al. 2021. "Factores asociados al abandono universitario". Educación XX1, 24(1): 17-44.

[5] González-Campos, J.A. et al. 2020. "Modelación de la deserción universitaria mediante cadenas de Markov". Uniciencia 34(1): 129-146.

[6] Dym C. y otros (2005). Engineering design thinking, teaching, and learning, Journal of Engineering Education, 94, pp. 103–120. (https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2005.tb00832.x)

[7] Zhou, C., Kolmos, A., & Nielsen, J. F. D. (2012). A problem and project-based learning (PBL) approach to motivate group creativity in engineering education. International Journal of Engineering Education, 28(1), 3–16.

[8] M. F. Ercan and R. Khan, "Teamwork as a fundamental skill for engineering graduates," 2017 IEEE 6th International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE), 2017, pp. 24-28, doi: 10.1109/TALE.2017.8252298.

[9] Monteiro, S. B. S., Reis, A. C. B., Silva, J. M., & Souza, J. C. F. (2017). A Project-based Learning curricular approach in a Production Engineering Program. Production, 27(spe), e20162261. http://dx.doi.org/10.1590/0103- 6513.226116)

[10] Pérez, Beatriz & Rubio, Angel. (2020). A Project-Based Learning Approach for Enhancing Learning Skills and Motivation in Software Engineering. 309-315. https://doi.org/10.1145/3328778.3366891

Técnicas Hardware-In-the-Loop en la Enseñanza de Electrónica de Potencia para Energías Renovables

Francisco Huerta
Departamento de Electrónica
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares, España
francisco.huerta@uah.es

Daniel Santamargarita
Departamento de Electrónica
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares, España
daniel.santamargarit@uah.es

Juan José Pérez Ruiz
Departamento de Electrónica
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares, España
juan.perezr@uah.es

***Abstract*— La exploración práctica de sistemas avanzados de electrónica de potencia y energías renovables en entornos educativos se enfrenta a limitaciones debidas a su naturaleza compleja y sus elevados costes. Para superarlo, se propone el uso de técnicas *hardware-in-the-loop* (HIL) y su extensión, *power-hardware-in-the-loop* (PHIL). Esta contribución explora la aplicación de estas técnicas desde tres perspectivas distintas: el concepto HIL, que presenta como prueba de concepto la simulación en tiempo real sobre un simulador en tiempo real (RTS) de un convertidor *buck* controlado por una tarjeta de control externa; el concepto PHIL, donde la prueba de concepto consiste en que el RTS implementa el modelo de una batería que interactúa con una carga real; y por último, el concepto de prototipado rápido, que presenta como prueba de concepto la implementación sobre el RTS del control de un convertidor *buck* síncrono.**

Keywords*— *Hardware-in-the-loop, Power-hardware-in-the-loop, Simulación en tiempo real, prototipado rápido, plataforma experimental educativa.

I. INTRODUCTION

La complejidad y coste de los nuevos avances en Electrónica de Potencia ha acarreado que se incorporen al currículum del alumno desde un punto de vista más teórico que práctico. Avances como los semiconductores de banda ancha [1], las nuevas topologías de convertidores de potencia (multinivel, *interleaved*, resonantes, etc.) [2] [3] o aplicaciones de la electrónica de potencia —microrredes, *Flexible AC Transmission Systems* (FACTs), cargador rápido para coche eléctrico, etc.— [4] ven limitado su estudio desde el punto de vista práctico a simples simulaciones dada la imposibilidad de abordar la inversión en cada nuevo sistema o aplicación que surge.

Con el objetivo de salvar este obstáculo, este proyecto propone el uso de técnicas *hardware-in-the-loop* (HIL) [5] para el estudio de sistemas de electrónica de potencia. Las técnicas HIL combinan sistemas reales y modelos simulados en una emulación en lazo cerrado. En esta configuración, un simulador en tiempo real (RTS – *real-time simulator*) simula modelos complejos e interactúa con los sistemas reales, de forma que se obtiene un entorno que combina la flexibilidad de la simulación con el uso de equipos reales. La aplicación de técnicas HIL a sistemas de electrónica de potencia ha dado lugar al concepto *power-hardware-in-the-loop* (PHIL) [6]. En un entorno PHIL, sistemas de potencia reales interactúan con modelos simulados de elementos de potencia y sistemas de control implementados en el RTS. La interfaz entre los componentes reales y el RTS la proporcionan sensores y actuadores de potencia.

La tecnología PHIL y la simulación en tiempo real ofrecen un entorno de pruebas de electrónica de potencia controlado y fácilmente reconfigurable, con acceso total a las variables del sistema y flexibilidad para recrear diversas condiciones de prueba utilizando la misma configuración de hardware. Esta flexibilidad la convierte en una herramienta muy útil desde el punto de vista de la docencia al permitir superar los obstáculos técnicos en el estudio de sistemas de electrónica de potencia complejos.

Si bien en este proyecto se concibe como una herramienta para el aprendizaje en asignaturas de Electrónica de Potencia, hay que remarcar que los alumnos se familiarizarán también con conceptos y herramientas con una presencia cada vez mayor en la industria y la investigación, tales como HIL, PHIL y prototipado rápido [7].

La contribución explora tres enfoques: HIL [5], PHIL [8], y prototipado rápido [9], permitiendo ejercicios prácticos en electrónica de potencia y su aplicación en energías renovables. Esto abarca escenarios como el control de sistemas de energías renovables en el caso HIL, el control de convertidores de potencia en condiciones adversas en el caso PHIL, y el desarrollo/evaluación de controladores para convertidores de potencia en el contexto de prototipado rápido.

Para los objetivos buscados, se propone el uso de un RTS Opal RT, junto con convertidores de electrónica de potencia orientados a educación y tarjetas de desarrollo LaunchPad de Texas Instruments. Opal RT [8] es uno de los RTS más utilizados tanto a nivel de investigación como a nivel industrial. Un RTS reproduce el comportamiento de un sistema físico mediante la ejecución de su modelo software al mismo ritmo que el tiempo de reloj y permite la interacción con elementos externos al modelo. La simulación en tiempo real permite estudiar el comportamiento de un controlador o de una planta en diversos contextos. El convertidor usado para las pruebas de concepto PHIL y prototipado rápido es el Semiteach IGBT [9] de Semikron,

Algunos de los desarrollos presentados en esta contribución están enmarcados en el proyecto BRONTE (SBPLY/21/180501/000147), cofinanciado por la Junta de Comunidades de Castilla La Mancha y la Unión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional.

que es un inversor trifásico de 20 kW basado en IGBTs y orientado a su uso en entornos docentes, por lo que prioriza la seguridad, de forma que no se tiene acceso directo a los componentes electrónicos de potencia e integra conectores de seguridad de tipo banana y de tipo BNC que aseguran una conexión fiable. Finalmente, las tarjetas de desarrollo LaunchPad de Texas Instruments son placas de control de bajo coste y fácilmente programables a través de entornos de simulación usados en Electrónica de Potencia como Matlab/Simulink o PSIM.

El artículo está organizado como sigue. La próxima sección desarrolla el caso HIL. La sección III explora la aplicación del caso PHIL. La sección IV evalúa su uso en el contexto del prototipado rápido. La sección V discute la aplicación de estas tecnologías en clase. La sección VI presenta las conclusiones del trabajo.

II. CASO HIL

A. *Concepto HIL*

La técnica HIL se basa en un controlador real actuando sobre una planta simulada en un RTS e interconectada a través de una interfaz de entrada/salida (E/S) como se muestra en la Fig. 1. Disponer de una planta simulada ofrece ventajas a la hora de realizar y evaluar el diseño de un controlador, ya que permite probar el dispositivo en situaciones límite, reduciendo enormemente los riesgos en comparación con la realización de las mismas pruebas en un entorno real.

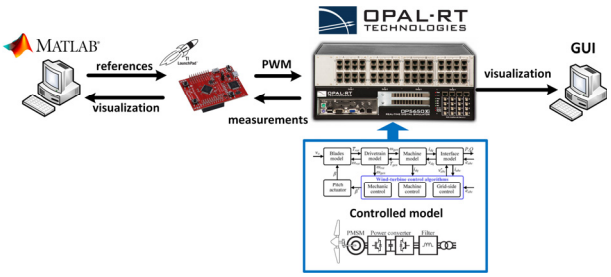


Fig. 1. Concepto hardware-in-the-loop (HIL).

Esta técnica está muy extendida en sectores industriales como el de la automoción o el aeroespacial, ya que permite probar sistemas de control en plantas simuladas durante el desarrollo de aplicaciones críticas para la seguridad tal y como lo exigen las distintas normas de validación [12, 13].

B. *Demostrador HIL*

Este concepto se implementa mediante el uso de Opal RT como simulador en tiempo real y el uso de placas de desarrollo LaunchPad de Texas Instruments. La Fig. 2 muestra la configuración.

El sistema Opal RT puede utilizarse para implementar la simulación en tiempo real de un convertidor de electrónica de potencia con interfaz de E/S. La simulación recibe las señales de conmutación de la tarjeta de control y le envía las diferentes variables eléctricas simuladas (tensiones y/o corrientes) necesarias para realizar el control.

El control externo se implementa en la placa de desarrollo LAUNCHXL-F28027F de Texas Instruments que se muestra en la Fig. 2. Este microcontrolador es una placa de bajo coste. La familia de microcontroladores LaunchPad está totalmente integrada mediante librerías específicas en softwares de diseño y simulación de uso común en electrónica de potencia (Matlab/Simulink, PLECS o PSIM), de forma que es posible generar código automáticamente y realizar una ejecución desde estos entornos, pudiendo interactuar con los parámetros de control, así como representar gráficamente las variables del sistema en tiempo real. Esto los hace especialmente atractivos desde el punto de vista docente, ya que los alumnos pueden pasar rápidamente de diseñar y simular un controlador en Simulink a ejecutarlo en la placa de control [9].

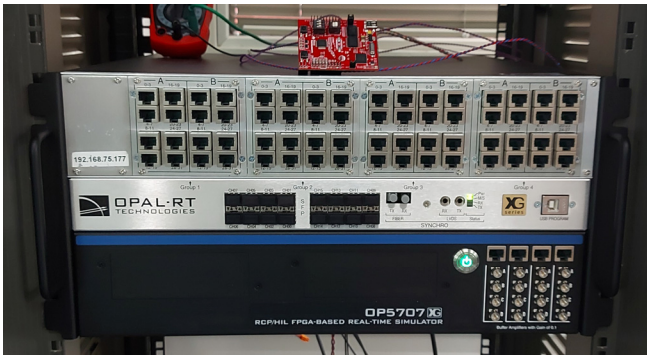


Fig. 2. Configuración para experimentos HIL: Opal RT y tarjeta de control LAUNCHXL-F28027 de Texas Instruments

Como prueba de concepto se ha simulado en tiempo real un convertidor *buck*, controlado externamente con la placa LaunchPad, en el Opal RT como se muestra en la Fig. 3. El control implementado en el LaunchPad se desarrolló en Simulink. El modelo Simulink presentado en la Fig. 4 implementa tanto el control del convertidor como la interfaz gráfica de usuario (GUI) que permite modificar las variables de control y visualizar las variables eléctricas del convertidor simulado. La Fig. 5 presenta una captura de osciloscopio de las formas de onda del modelo de convertidor. En este caso, la tensión de salida (línea roja) y la corriente de la inductancia (línea verde) son señales del modelo simulado obtenidas a través de la interfaz de salida de Opal RT, mientras que la señal PWM (línea amarilla) es la señal aplicada desde la placa de control al convertidor simulado a través de la interfaz de entrada de Opal RT.

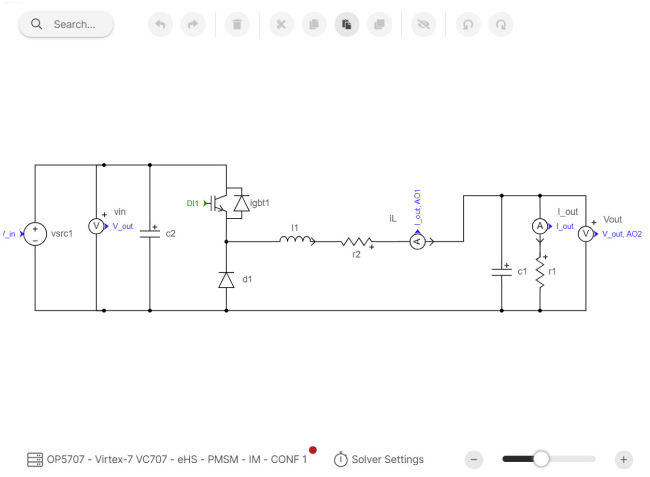


Fig. 3. Simulación en tiempo real de un convertidor *buck* implementado en Opal RT para la prueba de concepto HIL.

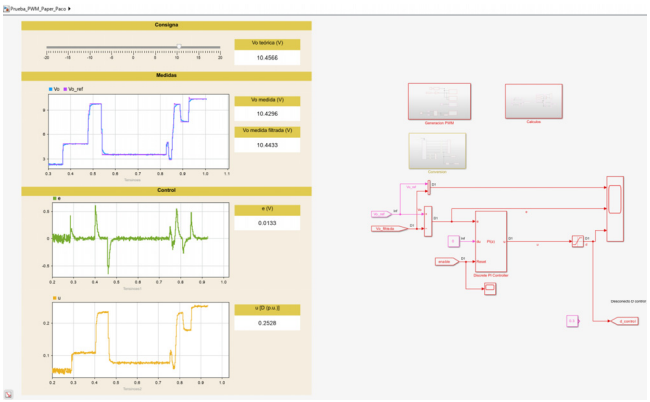


Fig. 4. Implementación del control en LaunchPad programado en Matlab.

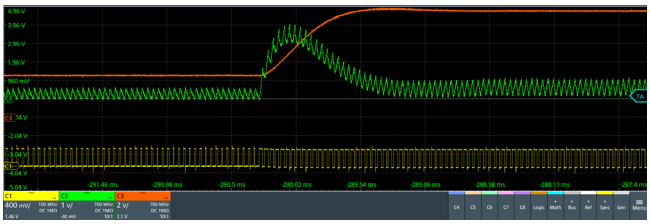


Fig. 5. Experimento HIL. Captura de osciloscopio de las formas de onda del convertidor simulado en tiempo real controlado por TI LaunchPad. Tensión de salida (rojo), corriente de la inductancia (verde) y señal PWM aplicada (amarillo).

C. *Utilidad del HIL en el aula*

El uso de este tipo de tecnología permite desarrollar controladores en un entorno visual de fácil manejo, que genera el código automáticamente y permite interactuar con los parámetros de control y visualizar las variables del sistema en el tiempo. Esto hace posible que los estudiantes pasen rápidamente de diseñar y simular un controlador en Simulink a ejecutarlo en la placa de control [9]. Además, la flexibilidad de la simulación en tiempo real permite desarrollar prácticas de control sobre convertidores avanzados de electrónica de potencia, sin necesidad de disponer de estos convertidores, ahorrando así costes y limitando también cualquier riesgo en el laboratorio. Entre las posibles actividades prácticas que se podrían llevar a cabo con esta propuesta se encuentra el desarrollo o estudio de: controladores para convertidores avanzados de potencia; algoritmos aplicados a redes eléctricas; controladores en circunstancias adversas; y sistemas de energías renovables.

De entre las asignaturas donde se podría emplear este tipo de metodología estarían las asignaturas donde se estudia el control de convertidores de potencia como son Procesamiento y Control Avanzado para Sistemas de Potencia (202577) y Electrónica de Potencia Avanzada (202574) del M. U. de Ingeniería Electrónica o Control de Convertidores de Electrónica de Potencia (600037) del Grado en Ingeniería en Electrónica y Automática Industrial, así como otras asignaturas de control no específicas de Electrónica de Potencia.

III. Caso PHIL

A. *Concepto PHIL*

El concepto PHIL, como se muestra en la Fig. 6, surge como extensión del HIL aplicado a los sistemas de potencia. En este caso, el RTS se conecta a un sistema bajo prueba (SUT – *System under test*) a través de una interfaz de potencia (un amplificador de potencia o un convertidor conmutado de electrónica de potencia) para poder transmitir la potencia requerida por este SUT. En un entorno PHIL, los dispositivos y sistemas de potencia reales interactúan con modelos simulados en tiempo real de elementos de potencia y sistemas de control en una simulación de bucle cerrado [8]. El SUT es cualquier elemento de la electrónica de potencia o de los sistemas de potencia que interactúa con el sistema simulado. Ejemplos de aplicación podrían ser la simulación de una red eléctrica a la que se conectan uno o varios convertidores de potencia para evaluar su funcionamiento en condiciones adversas [14] o la simulación de aerogeneradores para evaluar estrategias de control en una microrred [15].

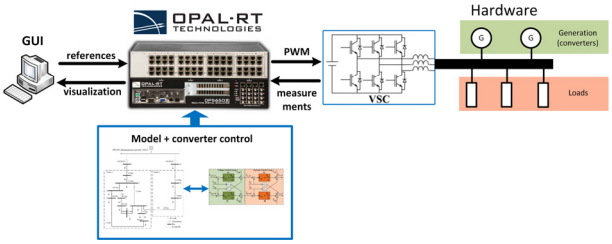


Fig. 6. Concepto power-hardware-in-the-loop (PHIL).

La tecnología PHIL y la simulación en tiempo real [16] ofrecen un entorno de pruebas controlado y fácilmente reconfigurable y, por tanto, ayudan a superar la mayoría de los obstáculos técnicos y económicos. Permiten un acceso total a las variables del sistema y ofrecen flexibilidad para recrear diversas condiciones de prueba utilizando la misma configuración de hardware.

B. *Demostrador PHIL*

Este concepto se implementa utilizando el Opal RT como RTS y el uso de un convertidor de potencia conmutado como interfaz de potencia.

En este caso, el RTS tiene dos tareas. Por un lado, implementa la simulación en tiempo real de un sistema de potencia complejo (como puede ser una red eléctrica, un sistema de generación distribuida, un sistema de transmisión HVDC). Mientras que, por otro lado, realiza el control del convertidor usado como interfaz de potencia que se interconecta con el SUT (este puede ser un convertidor, un sistema de generación distribuida, etc.) disponible en el laboratorio. El RTS adquiere todas las señales necesarias para realizar tanto el control del convertidor usado como interfaz de potencia, como para retroalimentar la simulación del modelo.

Como prueba de concepto se ha implementado en el RTS el modelo de un sistema de baterías que se conecta a una carga resistiva a través del interfaz de potencia. Como interfaz de potencia se usa una rama (2 IGBTs) del cubo Semikron de forma que este se configura como convertidor *buck* síncrono. El RTS simula el sistema de baterías y controla el interfaz de potencia para generar a la salida de este la respuesta que tendría el modelo simulado ante la conexión de la carga. El montaje se muestra en la Fig. 7.

El modelo de batería mostrado en la Fig. 8 se implementa en Matlab junto con el control del convertidor, Fig. 9, y se ejecuta en tiempo real en el RTS. La Fig. 10 muestra una captura de la tensión de salida de la batería emulada.

Fig. 7. Montaje para experimentos PHIL: Opal RT y Semiteach IGBT de Semikron..

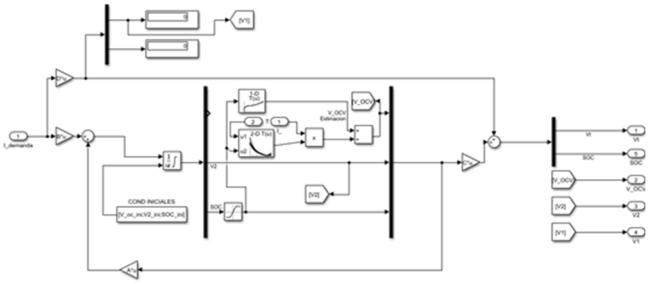


Fig. 8. Modelo de batería en tiempo real implementado en el RTS en la prueba de concepto PHIL.

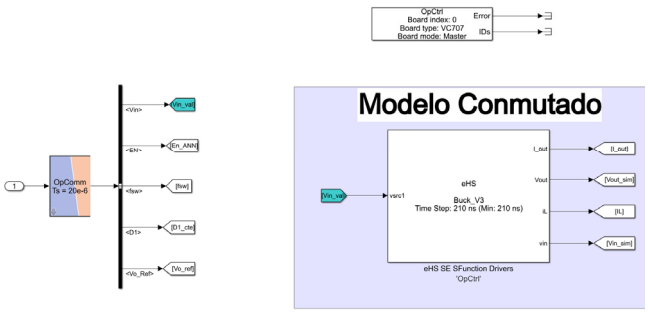


Fig. 9 Control del convertidor de potencia implementado en el RTS en la prueba de concepto PHIL.

C. *Utilidad del PHIL en el aula*

El uso de este tipo de tecnología ofrece un entorno de pruebas controlado y fácilmente reconfigurable, así como flexibilidad para recrear diferentes casos con la misma configuración hardware. Este tipo de tecnología puede ayudar a superar la mayoría de los obstáculos técnicos y económicos para abordar desde un punto de vista docente un estudio más detallado de tecnologías como los sistemas de generación distribuida en cursos avanzados, así como el acceso completo a las variables de estos sistemas. Entre las posibilidades que ofrecen en una clase de electrónica de potencia, permiten el estudio y evaluación de: eventos de red y estabilidad en redes eléctricas; sistemas distribuidos de energías renovables y almacenamiento de energía; funcionamiento de microrredes; control de convertidores ante redes perturbadas o baja calidad de potencia.

De entre las asignaturas donde se podría emplear este tipo de metodología estarían las asignaturas donde se estudia el control de convertidores de potencia como son Sistemas Electrónicos para Gestión de Energía Distribuida y Microrredes Eléctricas (202578) del M. U. de Ingeniería Electrónica; Generación Distribuida y Calidad de Red (202013) y Monitorización y Control de Redes de Energía (202015) del M. U. en Ingeniería Industrial; o Generación Eléctrica mediante Energías Renovables (600042) del Grado en Ingeniería en Electrónica y Automática Industrial.

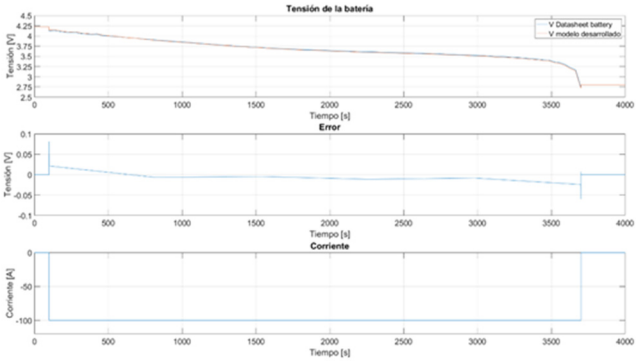


Fig. 10. Experimento PHIL. Emulando la descarga de la batería.

IV. Caso Prototipado Rápido

A. *Concepto de prototipado rápido*

El dispositivo Opal RT es un sistema de computación en tiempo real que permite tanto la simulación de sistemas como la ejecución de algoritmos de control. Esta última opción, junto con la posibilidad de utilizar una herramienta ampliamente extendida como Matlab, lo hace idóneo para su aplicación en el concepto de prototipado rápido.

El prototipado rápido [17], mostrado en la Fig. 11, se caracteriza por disponer de una planta real y un controlador ejecutado, en este caso, en el RTS, a diferencia del caso HIL visto anteriormente. Esto permite probar algoritmos de control de forma rápida y eficiente, disponiendo al mismo tiempo de las variables eléctricas del convertidor, así como de todas las variables y parámetros que intervienen en la implementación del control. El uso de un RTS desacopla el algoritmo de control del hardware y permite depurar errores fácilmente, así como modificar los parámetros de control durante la ejecución.

El prototipado rápido es una de las principales tecnologías utilizadas a nivel industrial para reducir los tiempos de desarrollo, ya que sirve para desarrollar, iterar y probar rápidamente distintas estrategias de control.

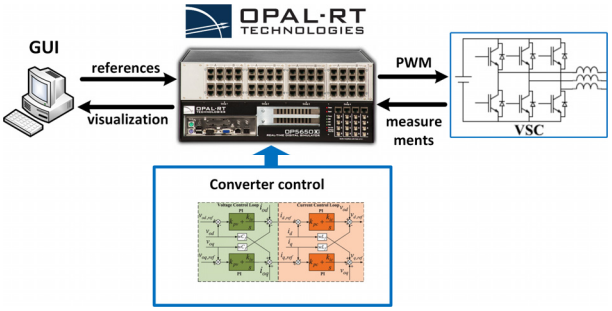


Fig. 11. Concepto de prototipado rápido.

B. *Demostrador de prototipado rápido*

Como prueba de concepto, se ha implementado un banco de pruebas similar al caso PHIL mostrado en la Fig. 7. En este caso, el RTS Opal RT actúa sólo como sistema de control y una rama (2 IGBTs) del cubo Semikron opera como convertidor *buck* síncrono. El control se ha desarrollado en Simulink y se ejecuta en el RTS, que interactúa con el convertidor. El RTS genera la señal PWM que actúa sobre los IGBT y mide la tensión de salida del convertidor para cerrar el lazo de control.

La Fig. 12 muestra el control del convertidor implementado en Simulink y ejecutado en el RTS. El propio modelo Simulink sirve de GUI y permite tanto la configuración de los parámetros de control como la visualización de las variables de control y convertidor en tiempo real.

La Fig. 13 muestra una captura de osciloscopio de los resultados experimentales en la prueba de concepto de prototipado rápido. La figura muestra la tensión de salida del convertidor controlado por tensión durante un escalón de carga.

C. *Utilidad del prototipado rápido en el aula*

Desde el punto de vista docente, una de las principales ventajas del prototipado rápido de control es que no requiere conocimientos de programación, ya que el código a ejecutar en el RTS se genera automáticamente a partir de Simulink, que como entorno de simulación basado en bloques permite un desarrollo más visual de los algoritmos de control. Esto permite a los alumnos implementar directamente cualquier control en el convertidor sin tener que manejar lenguajes de programación, por lo que pueden centrarse por completo en los conceptos de control y evitar así posibles inconvenientes debidos al generalmente bajo nivel de programación de los alumnos [18]. El entorno Simulink también permite una rápida reconfiguración tanto de los parámetros como de la estructura de control, de forma que el alumno puede interactuar rápidamente con la planta a controlar y realizar un mayor número de pruebas.

Esta metodología es bastante adecuada para las asignaturas de control de convertidores de potencia impartidas por el departamento como son Procesamiento y Control Avanzado para Sistemas de Potencia (202577) y Electrónica de Potencia Avanzada (202574) del M. U. de Ingeniería Electrónica o Control de Convertidores de Electrónica de Potencia (600037) del Grado en Ingeniería en Electrónica y Automática Industrial.

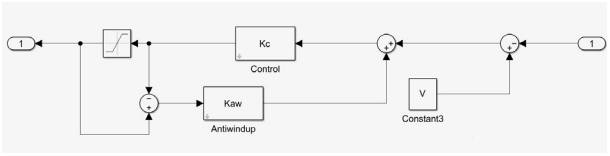


Fig. 12. Control del convertidor de potencia implementado en el RTS en la prueba de concepto de prototipado rápido.

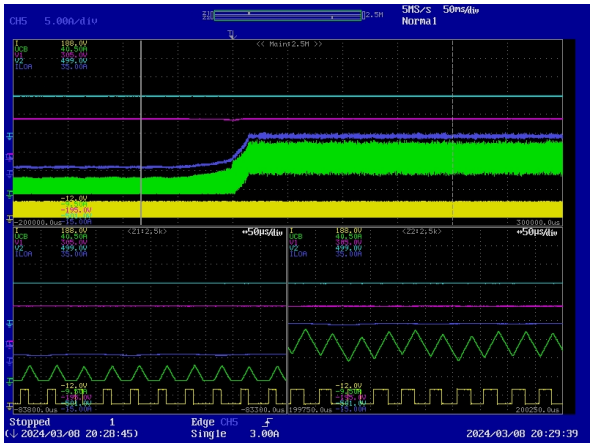


Fig. 13. Experimento de prototipado rápido. Captura de osciloscopio de las formas de onda del convertidor controlado. Tensión de salida (magenta), tensión de entrada (cian), corriente de carga (azul), corriente por la bobina (verde) y voltaje del inductor (amarillo).

V. Discusión

La plataforma propuesta permite abordar desde un punto de vista práctico, más allá de la simulación tradicional, diversos escenarios complejos de sistemas eléctricos y sistemas de energías renovables en actividades educativas. Entre las posibles actividades prácticas que podrían llevarse a cabo con esta propuesta se encuentran el estudio de la estabilidad en redes eléctricas, así como de posibles eventos; el estudio de las interacciones entre una red perturbada y los sistemas conectados a ellas, como un convertidor de potencia operando como interfaz de un sistema de energías renovables; el análisis detallado del funcionamiento de sistemas de energías renovables o distribuidos a nivel de modelo; el estudio de los algoritmos de operación y control en microrredes eléctricas; o el desarrollo de controladores para convertidores avanzados de electrónica de potencia.

Este tipo de tecnología es ideal para su uso en cursos avanzados de electrónica de potencia, asignaturas que traten sobre el control de convertidores de potencia, temas en los que se estudien sistemas de energías renovables, así como en cursos que traten sobre el estudio de redes eléctricas. Por supuesto, el coste de los sistemas Opal RT limita las unidades disponibles en el laboratorio, lo que limita el tamaño de la clase o el tiempo del que disponen los alumnos para utilizar el equipo. Esto hace que su uso esté más orientado a clases reducidas, especialmente en másteres o asignaturas optativas de Grado, que a asignaturas más generalistas como un primer curso de electrónica de potencia.

El coste de Opal RT, como se ha mencionado anteriormente, es uno de los principales obstáculos para la implantación de este tipo de soluciones en entornos docentes. Una posible solución sería el uso de plataformas HIL y PHIL

de bajo coste, que pueden implementarse con microcontroladores [19] [20] o microprocesadores [21] de bajo coste o con diseños ad-hoc basados en FPGAs [22, 23].

VI. Conclusiones

El uso de sistemas de tiempo real como Opal RT y su combinación con sistemas electrónicos dentro de las distintas opciones (HIL, PHIL, prototipado rápido, etc.) proporciona un entorno de trabajo altamente configurable y flexible que puede adaptarse a los requerimientos de las asignaturas del área de electrónica de potencia.

El sistema desarrollado permite a los alumnos profundizar y adquirir conceptos de electrónica de potencia (así como su control) que son difíciles de alcanzar sólo a nivel teórico o con simulaciones clásicas.

Esta plataforma permitirá el desarrollo de prácticas que contemplen la implementación y control de convertidores avanzados de electrónica de potencia (caso HIL), el control de convertidores bajo perturbaciones de red (caso PHIL) o el desarrollo y evaluación rápida de controladores para convertidores de potencia (caso de prototipado rápido). Además, sería posible proporcionar una plataforma reconfigurable para el control de convertidores desde el punto de vista de un laboratorio remoto.

Referencias

[1] J. Millán, P. Godignon, X. Perpiñà, A. Pérez-Tomás and J. Rebollo, "A Survey of Wide Bandgap Power Semiconductor Devices," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 5, pp. 2155-2163, May 2014.

[2] S. Habib *et al*., "Contemporary trends in power electronics converters for charging solutions of electric vehicles," in *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 911-929, Dec. 2020.

[3] M.-K. Nguyen, "Power Converters in Power Electronics: Current Research Trends," *Electronics*, vol. 9, no. 4, pp. 654, 2020.

[4] Mircea Eremia; Chen-Ching Liu; Abdel-Aty Edris, "FACTS Technologies," in *Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence* , IEEE, 2016, pp.269-270.

[5] R. McNeal and M. Belkhayat, "Standard Tools for Hardware-in-the-Loop (HIL) Modeling and Simulation," in *Proc. IEEE. Electric Ship Tech. Symp.*, Arlington, VA, USA, 2007, pp. 130-137.

[6] A. von Jouanne, E. Agamloh, and A. Yokochi "Power Hardware-in-the-Loop (PHIL): A Review to Advance Smart Inverter-Based Grid-Edge Solutions," *Energies*, vol. 16, no. 2, pp. 916, 2023.

[7] X. Yan and P. E. N. G. Gu, "A review of rapid prototyping technologies and systems," *Computer-aided design*, vol. 28, no. 4, pp. 307-318, 1996.

[8] M. Steurer, F. Bogdan, W. Ren, M. Sloderbeck and S. Woodruff, "Controller and Power Hardware-In-Loop Methods for Accelerating Renewable Energy Integration," in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meeting, Tampa*, FL, USA, 2007, pp. 1-4.

[9] J. Van den Keybus, B. Bolsens, K. De Brabandere, J. Driesen, and R. Belmans, "DSP and FPGA based platform for rapid prototyping of power electronic converters and its application to a sampled-data three-phase dual-band hysteresis current controller," in *Proc. IEEE 33rd Annu. PESC*, Jun. 23–27, 2002, vol. 4, pp. 1722–1727.

[10] Opal RT. OPAL-RT Real-Time Digital Simulations. Tutorial of Opal RT, 2013.

[11] Semikron, Frédéric Sargos. IGBT Power Electronics. Teaching System. Principle for sizing power converters. Application Note AN-8005, 2008.

[12] C. Gan, R. Todd and J. Apsley, "HIL emulation for future aerospace propulsion systems," *7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014)*, Manchester, UK, 2014, pp. 1-6.

[13] F. Mihalič, M. Truntič, and A. Hren, "Hardware-in-the-Loop Simulations: A Historical Overview of Engineering Challenges," *Electronics*, vol. 11, pp. 2462, 2022.

[14] N. Ainsworth, A. Hariri, K. Prabakar, A. Pratt and M. Baggu, "Modeling and compensation design for a power hardware-in-the-loop simulation of an AC distribution system," *2016 North American Power Symposium (NAPS)*, Denver, CO, USA, 2016, pp. 1-6.

[15] F. Huerta, R. L. Tello and M. Prodanovic, "Real-Time Power-Hardware-in-the-Loop Implementation of Variable-Speed Wind Turbines," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 3, pp. 1893-1904, March 2017.

[16] G. G. Parma and V. Dinavahi, "Real-Time Digital Hardware Simulation of Power Electronics and Drives," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 2, pp. 1235-1246, April 2007

[17] A. Monti, E. Santi, R. A. Dougal and M. Riva, "Rapid prototyping of digital controls for power electronics," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 3, pp. 915-923, May 2003.

[18] F. J. Gallego-Durán, R. Satorre-Cuerda, P. Compañ-Rosique, and C. Villagrá-Arnedo, "Explicando el bajo nivel de programación de los estudiantes," *ReVisión*, vol. 11, no. 1, pp. 33-42, Jan. 2018.

[19] R. F. Bastos, G. H. Fuzato, C. R. Aguiar, R. V. A. Neves, and R. Q. Machado, "Model, design and implementation of a low-cost HIL for power converter and microgrid emulation using DSP," *IET Power Electronics*, vol. 12, no. 14, pp. 3833-3841, 2019.

[20] D. S. Castro, R. F. Q. Magossi, R. F. Bastos, V. A. Oliveira and R. Q. Machado, "Low-Cost Hardware in the Loop Implementation of a Boost Converter," *2019 18th European Control Conference (ECC)*, Naples, Italy, 2019, pp. 423-428

[21] A. B. C. De Farias, R. S. Rodrigues, A. Murilo, R. V. Lopes and S. Avila, "Low-Cost Hardware-in-the-Loop Platform for Embedded Control Strategies Simulation," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 111499-111512, 2019

[22] M. E. Iranian, M. Mohseni, S. Aghili, A. Parizad, H. R. Baghaee and J. M. Guerrero, "Real-Time FPGA-Based HIL Emulator of Power Electronics Controllers Using NI PXI for DFIG Studies," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 10, no. 2, pp. 2005-2019, April 2022.

[23] K. K. Nzimbakani, A. K. Lusala, J. M. M. Ndeko and J. Gyselinck, "Design and Implementation of a Low-Cost FPGA Based Real-Time Simulator for a Three-Phase Grid Emulator Including Neutral," *2023 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, Cape Town, South Africa, 2023, pp. 1-6

Aprendizaje Basado en Proyectos: desarrollar Tech y Soft Skills en asignaturas de Energías Renovables

Francisco Huerta
Departamento de Electrónica
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares, España
francisco.huerta@uah.es

Daniel Santamargarita
Departamento de Electrónica
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares, España
daniel.santamargarit@uah.es

Juan José Pérez
Departamento de Electrónica
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares, España
juan.perezr@uah.es

***Abstract*— El aprendizaje basado en proyectos (ABP) es una de las denominadas metodologías activas centradas en el aprendizaje del alumno. Este artículo presenta la experiencia de aplicar esta metodología dentro de la asignatura Electrónica para Energías Renovables (370014) del Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones (GIEC) de la Universidad de Alcalá. El proyecto abordó la parte práctica del bloque fotovoltaico mediante ABP, con el objetivo de que los alumnos adquieran tanto competencias técnicas como blandas.**

Keywords*— *Aprendizaje basado en proyectos, innovación docente, competencias técnicas, competencias sociales, ingeniería electrónica.

I. INTRODUCIÓN

La experiencia presentada se enmarca en la asignatura Electrónica para Energías Renovables (370014) del Grado de Ingeniería en Electrónica de Comunicaciones y forma parte de un proyecto de innovación docente desarrollado durante el curso 2023/24. Es una asignatura de 6 ECTS que se imparte en 4º curso por el Departamento de Electrónica. La asignatura se organiza en 15 sesiones semanales de 4 horas, distribuidas generalmente en un bloque teórico y otro práctico. El número de alumnos por curso rondaba los 10 en los últimos años, pero en el curso 2023/24 se matricularon 31 alumnos.

La asignatura tiene como objetivo que los alumnos adquieran los conceptos básicos de la aplicación de la electrónica al desarrollo de la generación de energía mediante fuentes renovables. Para ello, la asignatura se centra en el uso de las dos fuentes de energías renovables más extendidas en la actualidad: energía solar fotovoltaica y energía eólica.

La experiencia presentada en el artículo abordó la parte práctica del bloque de fotovoltaica mediante la aplicación de la metodología de Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP). El ABP es una de las denominadas metodologías activas que se centran en el aprendizaje del alumno [1] y se ha utilizado en diversas asignaturas universitarias, abarcando ramas como medicina, humanidades, economía o ingeniería [2]. El ABP es muy adecuado para la ingeniería [3, 4], ya que ofrece un enfoque integral que abarca diferentes materias y competencias, incluyendo tanto habilidades tecnológicas, específicas de la materia objeto de estudio, como las llamadas *sotf skills* o habilidades sociales.

Las *soft skills* se identifican como la combinación de habilidades, actitudes, hábitos y rasgos de personalidad que permiten a las personas rendir mejor en su vida laboral, complementando las habilidades técnicas necesarias para desempeñar su trabajo e influyendo en su forma de comportarse e interactuar con los demás [5]. La actividad propuesta pretende fomentar competencias sociales como la toma de decisiones; el compromiso; la comunicación interpersonal; la gestión del tiempo; la creatividad, la innovación y la resolución de problemas; el trabajo en equipo; la responsabilidad; el autoaprendizaje; el pensamiento estratégico; la capacidad de investigación y análisis; y la capacidad de organización.

Para ello, los estudiantes se organizan en grupos y deben realizar un proyecto de instalación fotovoltaica en una vivienda, un edificio público, un comercio o una instalación industrial. Se trabajan diferentes aspectos de las instalaciones fotovoltaicas. La evaluación del proyecto se realiza mediante la entrega de un informe final con los aspectos tratados en el proyecto y una presentación en grupo al resto de la clase en la última sesión del curso. La actividad representa el 50% de la nota final como se describe en la Fig. 1, donde PE1 y PE2 son exámenes de teoría. Del 50% correspondiente al proyecto, el 25% se debe a la memoria, el 15% a la presentación y el 10% al rendimiento individual.

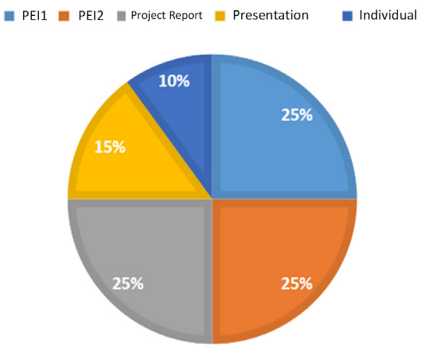


Fig. 1. Distribución de la nota final del curso. PEI1 y PEI2: exámenes teóricos. La nota del proyecto se divide en la nota de la memoria, la nota de la presentación y la nota del rendimiento individual.

Este artículo está organizado de la siguiente manera. En la sección II se describe en primer lugar el proyecto de innovación docente en el que se integra la actividad de ABP propuesta para el curso. En la sección III se presenta el

Este trabajo se engloba en el proyecto de innovación docente "Aprendizaje Basado en Proyectos aplicado a la asignatura Electrónica para Energías Renovables para el desarrollo de Tech y Soft Skills (UAH/EV1495)", perteneciente a la Convocatoria de Proyectos para el Fomento de la Innovación en el Proceso de Enseñanza-Aprendizaje para el curso 2023-24 de la Universidad de Alcalá.

proyecto que desarrollarán los alumnos. En la Sección IV se presentan las habilidades tecnológicas y sociales que se espera que los alumnos adquieran con la actividad propuesta. En la sección V se detallan las distintas fases del proyecto que deben cubrir los estudiantes. La Sección VI cubre los entregables y cómo se evalúa a los estudiantes. La Sección VII expone los resultados obtenidos en la actividad en comparación con los resultados de otros años. La sección VIII presenta las conclusiones.

II. Proyecto de Innovación Docente

La actividad forma parte del proyecto de innovación docente "Aprendizaje Basado en Proyectos aplicado a la asignatura Electrónica para Energías Renovables para el desarrollo de *Tech* y *Soft Skills* (UAH/EV1495)", perteneciente a la Convocatoria de Proyectos para el Fomento de la Innovación en el Proceso de Enseñanza-Aprendizaje para el curso 2023-24 de la Universidad de Alcalá y enmarcado en la asignatura Electrónica para Energías Renovables. Este proyecto de innovación vino motivado por la sensación, más o menos corroborada por los resultados de la asignatura, de que los alumnos aprobaban la asignatura sin asimilar realmente los conocimientos de la materia. Algunos de los factores que hemos identificado y que corroboraban esta sensación:

- Asistencia muy pasiva a clase por parte de los alumnos, en parte motivada por los horarios de la asignatura (4 horas seguidas de clase en el último turno de la tarde).
- Resultados bastante pobres en los exámenes, reflejo de una vaga asimilación de conceptos por parte de la mayoría de los alumnos.
- Parte experimental basada en prácticas que los alumnos suelen replicar de año en año, por lo que los resultados no reflejan absolutamente nada del aprendizaje.

Este malestar fue la principal motivación para llevar a cabo este proyecto de innovación docente.

A. Objetivos del proyecto de innovación

El proyecto de innovación docente tiene los siguientes objetivos:

- Aplicar la metodología de Aprendizaje Basado en Proyectos en una asignatura de electrónica, de forma que los alumnos desarrollen un proyecto de maneara colaborativa, asimilando los conocimientos impartidos en teoría y adquiriendo competencias tecnológicas relacionadas con la asignatura y con la administración de proyectos reales.
- Desarrollar habilidades y actitudes profesionales, sociales y emocionales que contribuyan al correcto desempeño de su futura carrera laboral.
- Desarrollar una metodología que contribuya a que los alumnos participen de forma más proactiva en la asignatura.
- Desarrollar herramientas de evaluación que permitan determinar los resultados de aprendizaje de la asignatura.

B. Acciones del proyecto de innovación

El proyecto de innovación consta de 8 tareas:

- Tarea 1: Preparación de materiales iniciales. En esta acción se recopila toda la información que se considera oportuna aportar a los alumnos al inicio del proyecto y se elabora un cuaderno para el alumno que presenta esta información y la referente a la implementación práctica del ABP.
- Tarea 2: Desarrollo de herramientas de evaluación de los alumnos. Aborda los criterios empleados para evaluar a los alumnos, de forma que se tenga en cuenta tanto el diseño desarrollado, la calidad y contenido de los diferentes informes técnicos entregados y de la presentación, la observación del trabajo y dinámicas de grupo durante las sesiones, etc. Se elabora una matriz de evaluación.
- Tarea 3: Preparación de las sesiones del proyecto. Dada la posible novedad de esta metodología para la mayoría de los alumnos, se realiza una sesión informativa donde se describe tanto la metodología como la actividad propiamente dicha. Para ello tienen ya a disposición el cuaderno del estudiante y la matriz de evaluación.
- Tarea 4: Implementación del proyecto por parte de los alumnos. Entre las semanas 4 y 7 del curso se llevan a cabo sesiones preparatorias para el proyecto, con el objetivo de darles unas pautas a la hora de abordar el proyecto, complementar conocimientos impartidos en clase, así como guiarles en el uso de las herramientas de simulación, herramientas de gestión, tratamiento de la información disponible, búsqueda de recursos, etc. A partir de la semana 4, los alumnos ya pueden trabajar de forma autónoma en el proyecto, realizándose un seguimiento durante las sesiones de clase, en tutorías grupales o personalizadas. Finalmente, los alumnos entregan una memoria técnica y realizan una presentación en grupo del proyecto de la instalación fotovoltaica desarrollada, tal y como se describe en la sección VI.
- Tarea 5: Desarrollo de metodología para la evaluación del impacto y resultados de aprendizaje de la actividad. La evaluación del impacto y los resultados de aprendizaje de la actividad se realiza mediante tres métodos: la realización de encuestas a los estudiantes; la inclusión en el examen de la asignatura de cuestiones relacionadas directa o indirectamente con el proyecto a desarrollar; y el análisis comparativo con calificaciones resultantes de años anteriores.
- Tarea 6: Evaluación de los alumnos. Mediante la matriz de evaluación desarrollada en la Tarea 2 y en base a los informes técnicos presentados y la presentación realizada.
- Tarea 7: Evaluación de la actividad, su impacto y resultados de aprendizaje. Tras el examen de la asignatura, se recopilarán las diferentes encuestas, así como los resultados del examen y, empleando la metodología desarrollada en la Tarea 5, se evaluará el impacto y los resultados de aprendizaje obtenidos.

- Tarea 8: Difusión de los resultados. Mediante la publicación de los materiales, así como el envío de contribuciones a congresos y posibles publicaciones en el ámbito de las revistas de innovación docente.

III. Proyecto de los Estudiantes

El proyecto a realizar durante el curso por los alumnos consistía en trabajar en grupos para desarrollar un proyecto de instalación fotovoltaica en un entorno residencial o industrial.

Este proyecto debía cubrir aspectos como la estimación del consumo y del recurso solar; el diseño teórico y el diseño tecno-económico basado en simulación de la instalación; la selección de componentes, estructura y almacenamiento; las condiciones de inyección a red; y la simulación dinámica del funcionamiento. De esta forma, los alumnos abordan prácticamente todos los aspectos relevantes de una instalación fotovoltaica real.

A lo largo de las sesiones, los grupos de alumnos debían presentar al menos una memoria técnica de las distintas fases y realizar una presentación al resto de la clase sobre la solución diseñada, que se debatiría posteriormente. Con este planteamiento se pretendía fomentar *soft skills* como la toma de decisiones; el compromiso; la comunicación interpersonal; la gestión del tiempo; la creatividad; la innovación y la resolución de problemas; el trabajo en equipo; la responsabilidad; el autoaprendizaje; el pensamiento estratégico; la capacidad de investigación y análisis; y la capacidad de organización.

El objetivo de la actividad es ayudar a los estudiantes a asimilar los conocimientos impartidos en la teoría y adquirir habilidades técnicas específicas en el campo de estudio de la asignatura (energías renovables), y en la administración de proyectos reales, así como desarrollar habilidades sociales que contribuyan al correcto desempeño de su futura carrera laboral.

IV. Competencias a Adquirir

Las competencias técnicas a adquirir están relacionadas con las competencias básicas, generales y transversales definidas en el apartado 3 del Anexo de la Orden CIN/352/2009, que establece los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habilitan para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico de Telecomunicación.

En cuanto a las *soft skills*, la actividad se ha organizado para intentar abordar el mayor número posible de las identificadas como útiles en estudios de ingeniería [5 – 7].

A. Competencias técnicas (tech skills)

Se estima que la actividad contribuirá a la adquisición de las competencias básicas, generales y transversales definidas en el apartado 3 del Anexo de la Orden CIN/352/2009:

- TR1. Conocimiento, comprensión y capacidad para aplicar la legislación necesaria durante el desarrollo de la profesión de Ingeniero Técnico de Telecomunicación y facilidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.
- TR3. Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas, comprendiendo la responsabilidad ética y profesional de la actividad del Ingeniero Técnico de Telecomunicación.
- TR5. Facilidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.
- TR8. Capacidad de trabajar en un grupo multidisciplinar y en un entorno multilingüe y de comunicar, tanto por escrito como de forma oral, conocimientos, procedimientos, resultados e ideas relacionadas con las telecomunicaciones y la electrónica.

Así como las competencias de carácter profesional definidas en el apartado 4 del Anexo de la Orden CIN/355/2009, que establece los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero de Telecomunicación:

- CSE3. Capacidad de realizar la especificación, implementación, documentación y puesta a punto de equipos y sistemas, electrónicos, de instrumentación y de control, considerando tanto los aspectos técnicos como las normativas reguladoras correspondientes.

Se espera también que los estudiantes adquieran los siguientes resultados de aprendizaje:

- RA1. Conocer y comprender los principios científicos y matemáticos que subyacen en la generación de energía a partir de fuentes renovables.
- RA2. Comprender la normativa de conexión a red de los sistemas de generación distribuida.
- RA3. Analizar y comprender el funcionamiento de los sistemas electrónicos empleados en los sistemas de energías renovables.

B. Competencias sociales (soft skills)

- Toma de decisiones: a los alumnos se les indica claramente que el proyecto no es una práctica guiada, de forma que no hay una solución única, sino que tienen que ser ellos los que tomen las decisiones en cuanto al diseño. Igualmente, se les comenta que la calidad de la solución no influye en la calificación, sino que se valoran los procedimientos y los juicios críticos sobre estos y la solución obtenida.
- Trabajo en equipo: los alumnos desarrollan el proyecto en grupos. Dado el número de alumnos matriculados este año, se permitieron grupos de 4 a 5 integrantes.
- Habilidades organizativas: a los alumnos se les da total libertad para que decidan cómo se organizan internamente y cómo se reparten el trabajo. Se les indica que tendrán que establecer formas de comunicación entre ellos, que pueden ser informales o formales, para lo que se les facilita las herramientas disponibles en la plataforma del campus virtual —blog, espacio de videoconferencias, diario, intercambio de archivos, tablero de discusión y wiki—. Se les recomendó, eso

sí, que documentasen todo lo que hicieran y en el momento en que lo hicieran.

- Gestión del tiempo: más allá de las sesiones orientativas en el uso de herramientas específicas, no se establecen sesiones pautadas para la realización del proyecto en el laboratorio, son los propios grupos los que deciden la temporización.
- Responsabilidad y compromiso: se les indica claramente que ellos mismos son responsables de los compromisos que adquieran con su grupo de trabajo.
- Comunicación interpersonal: se pretende desarrollar tanto oral como escrita, para ello se les indica que han de escribir informes con una estructura formal —la memoria del proyecto— y hacer una presentación del trabajo desarrollado ante el resto de la clase.
- Pensamiento estratégico: se les conmina a que cuando realicen una tarea, tengan en cuenta cómo se integra en el proyecto; que den prioridad a lo importante; y que tengan en cuenta que una solución no tiene por qué ser la óptima, pero sin embargo puede ser una solución que resuelva en mayor o menor medida el problema, en este caso el abastecimiento energético de la ubicación de estudio.
- Habilidades de investigación y análisis: en las sesiones de preparación se les da unas pautas para el uso de software y búsqueda de información y, en algunos casos, se les aporta referencias, pero se les indica que tienen que buscar más información por su cuenta.
- Autoaprendizaje: se les indica que tienen que consultar documentación adicional sobre procedimientos que no se han visto totalmente en clase.
- Resolución de problemas: los alumnos tienen que enfrentarse a un problema real, en el que no hay una única solución y en el que son ellos los que deciden qué opción seguir.
- Creatividad e innovación: se les anima a explorar más de una solución.

V. Fases del Proyecto

Organizados en grupos, los alumnos realizan un proyecto consistente en el diseño de una instalación fotovoltaica para una vivienda, un edificio comercial o del sector terciario o una instalación industrial. El objetivo del proyecto es que los alumnos cubran la mayoría de los aspectos a tener en cuenta en una instalación fotovoltaica real.

Como punto de partida, cada grupo recibe una ubicación y el perfil de los usuarios en el caso de una vivienda o los horarios en el caso de un edificio público, comercial o industrial. Las ubicaciones y perfiles que se les dieron como punto de partida son:

- Localización 1: CEIP Luis Vives, C/ Luis Vives, 18, Alcalá de Henares. Perfil: el colegio tiene actividad de lunes a viernes, de 7:30 am a 7 pm.
- Localización 2: Casa adosada. C/ Adolfo Bioy Casares, 26, Alcalá de Henares. Perfil: 2 adultos. Uno de ellos teletrabaja, el otro está fuera de 7 am a 5 pm.
- Localización 3: Restaurante. Vía Complutense, 32, Alcalá de Henares. Consultar horario.
- Localización 4: Un 6º piso en un edificio de 11 plantas. C/ Río Tajuña, 1, Alcalá de Henares, Madrid. Perfil: 2 adultos. Uno de ellos trabaja fuera de casa (de 8 am a 4 pm, de lunes a sábado), el otro no trabaja.
- Localización 5: Biblioteca Pública Municipal María Moliner. C/ San Vidal, 33, Alcalá de Henares. Consultar horarios.
- Localización 6: Centro de Mayores Municipal - Campo del Ángel, C/ de Fray Juan Gil, 2, 28806 Alcalá de Henares, Madrid. Consultar horarios.

En las subsecciones siguientes se detallan las etapas del proyecto que había que cubrir.

A. Estudio de la ubicación

A partir de la ubicación que se les indica como punto de partida, el grupo tiene que estudiar las superficies disponibles, la altura, la orientación, etc. A partir de estos datos pueden estimar la inclinación y orientación óptimas de los paneles, calcular la distancia entre paneles para minimizar las sombras, estudiar el entorno para determinar posibles pérdidas por sombras de edificios o árboles, así como determinar las posibles sombras debidas a la inclinación y orientación.

Se les indica asimismo algunas herramientas gratuitas que están disponibles para el estudio de la ubicación como son la Sede Electrónica del Catastro (SEC), Google Maps o Google Earths, ver Fig. 2, que permite calcular alturas. La Fig. 3 muestra el estudio mediante modelado 3D que llevó a cabo el grupo al que se le asignó la ubicación 1.

Fig. 2. Captura de Google Earth. La altura donde marca el puntero se puede determinar por la información que aparece en la esquina

Para el estudio de las sombras por el entorno, los alumnos podían utilizar el diagrama de trayectoria solar [8] presentado en la Fig. 4 u otras herramientas web disponibles [9 – 11]. Opcionalmente, también podían realizar el estudio de sombras por inclinación y orientación [8]. La Fig. 5 presenta el estudio de sombras realizado por uno de los grupos.

B. Estimación del consumo

A partir de los perfiles de usuario, los alumnos tienen que

realizar la estimación del consumo. Para ello, pueden orientarlo desde un punto de vista más teórico o más práctico —accediendo por ejemplo a los datos de consumo de su contador inteligente (ver Fig. 6) y adaptándolos al perfil proporcionado [12]—, teniendo a su disposición bases de datos de perfiles de consumo y consumos de equipos [13], calculadoras de consumo [14] y documentación.

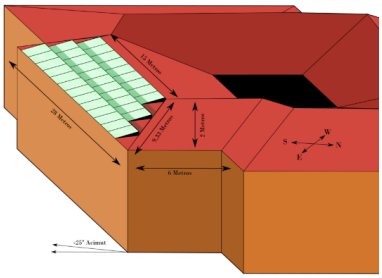


Fig. 3. Estudio de localización realizado por uno de los grupos.

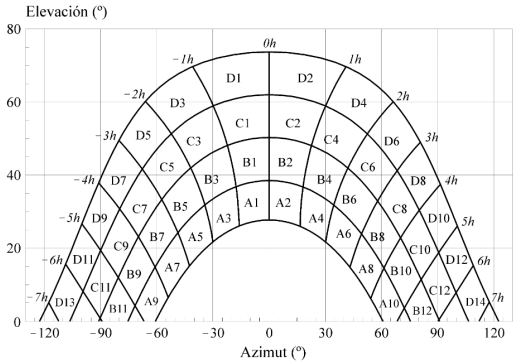


Fig. 4. Diagrama de trayectoria solar [8].

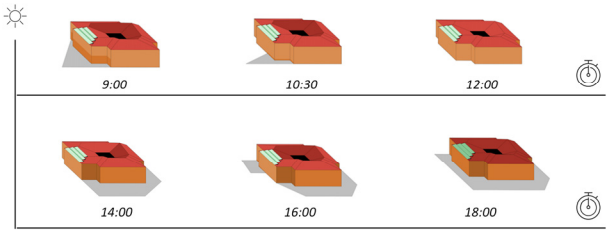


Fig. 5. Estudio de sombras realizado por uno de los grupos.

Fig. 6. Medición del consumo real obtenido del área de clientes de la empresa distribuidora de electricidad.

C. *Dimesionado del recurso solar según ubicación*

Para el dimensionamiento del recurso solar tienen a su disposición diferentes posibilidades que incluyen el uso de software de diseño (e.g. Homer Pro [15], disponible en el laboratorio), bases de datos abiertas (PVGIS [16] —ver Fig. 7—, NASA [17], etc.) o tablas en manuales [18].

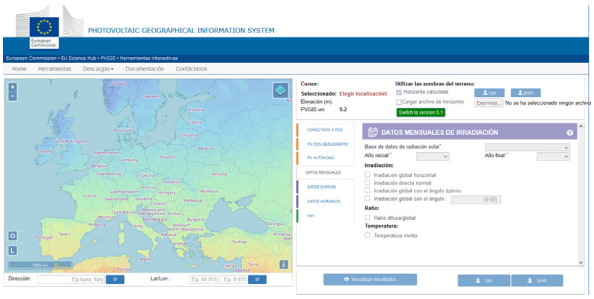


Fig. 7. Herramienta PVGIS de la Unión Europea para obtener información sobre la irradiancia en un lugar determinado.

D. *Diseño teórico aproximado de la instalación*

Para el diseño de la instalación, los alumnos pueden elegir cualquier opción entre aislada y conectada a red; y en caso de conexión a red, pueden diseñar pensando en autoconsumo con compensación, acumulación en baterías o autoconsumo sin excedentes. También se les anima a plantear y evaluar más de un diseño.

En una primera fase, se les instruye para que realicen un dimensionado teórico siguiendo las pautas indicadas en los manuales de instalación fotovoltaica [18] y consultando información en distribuidores como Autosolar [19].

E. *Diseño software basado en factores tecnoeconómicos*

Los estudiantes tienen que evaluar desde un punto de vista tecno-económico los diseños que han realizado teóricamente. Para ello, pueden hacer una primera aproximación basada en cálculos teóricos o utilizando herramientas online sencillas (como PV*SOL [20] o PVGIS [16]), pero se les exige que presenten al menos un análisis del diseño utilizando algún software destinado a este fin. Homer Pro [15] está disponible en el laboratorio, pero se les da la opción de probar otro software (e.g. PVcase [21] o PVsyst [22]).

F. *Selección de componentes, estructura, almacenamiento y condiciones de inyección a red*

Durante las sesiones de preparación, los alumnos reciben información sobre proveedores de paneles fotovoltaicos, baterías, inversores, etc. También se les hace una breve introducción a los conceptos de sistemas aislados y conectados a la red, autoconsumo, etc. En estas sesiones preparatorias, también se les muestran diferentes tipos de configuraciones en instalaciones fotovoltaicas, explicándoles sus posibles ventajas e inconvenientes.

Con toda esta información, los alumnos deben ser capaces de, a partir del diseño o diseños realizados en las fases anteriores, proponer un diseño práctico en el que tengan en cuenta diferentes factores prácticos. Esos factores incluyen: la potencia de la instalación; las características eléctricas de los paneles y sus posibles disposiciones; las características y necesidad o no de incorporar reguladores MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), inversores, cargadores de baterías, etc.; la necesidad o no de baterías y la elección de éstas en función de sus características; o la elección de mercado regulado o mercado libre en la conexión a la red.

G. Simulación del funcionamiento dinámico

En la última sesión de preparación del proyecto se aborda el diseño de simulaciones en Matlab/Simulink para el estudio del funcionamiento dinámico de instalaciones fotovoltaicas. Se proporciona a los alumnos algunos ejemplos de simulaciones de instalaciones solares que les pueden ayudar a la hora de diseñar la simulación de la instalación o instalaciones que han diseñado durante el proyecto. El objetivo de esta parte es que los alumnos profundicen en la interconexión de los diferentes elementos de la instalación fotovoltaica, el modelado de elementos como paneles fotovoltaicos y baterías, los convertidores electrónicos de potencia utilizados en reguladores MPPT o inversores, así como la implementación de su control, que son algunos de los temas que forman parte del temario de la asignatura.

El software de simulación utilizado para esta etapa es Matlab/Simulink, software con el que ya están familiarizados por su uso en otras asignaturas impartidas por el departamento en la titulación. La Fig. 8 presenta la simulación diseñada por uno de los grupos.

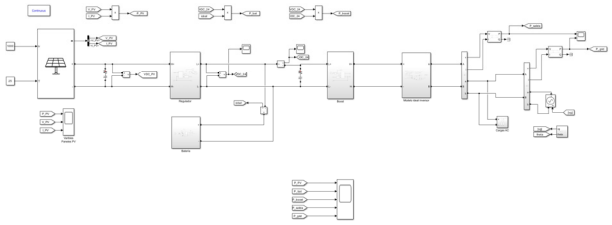


Fig. 8. Simulación en Matlab/Simulink de la instalación diseñada por uno de los grupos.

H. Documentación del proyecto

Se les aconseja que vayan documentando a medida que realizan las tareas, para facilitarles la redacción de la memoria final. Se les indica que tienen que utilizar un formato de memoria similar al formato de Trabajo Fin de Grado establecido por la dirección de la Escuela Politécnica, cuya plantilla está disponible en Latex. También se les introduce en el concepto de referenciación y se les indica que deben utilizar el formato de citas IEEE. También se les informa de la posibilidad de utilizar un gestor de referencias (RefWorks, Mendeley, etc.). De esta forma, se pretende familiarizar a los alumnos con estos conceptos de cara al momento en que tengan que realizar el Trabajo Fin de Grado.

VI. Entregables y Evaluación

Como ya se ha indicado, el curso se organiza en 15 semanas durante el primer cuatrimestre. Las sesiones preparatorias del proyecto se imparten entre la semana 4 y la 7, de modo que los alumnos pueden empezar a trabajar en el proyecto a partir de la semana 4.

Los grupos de estudiantes pueden presentar un informe intermedio, sin formato predeterminado, que debe entregarse no más tarde de la semana 11. Este informe puede ser una recopilación de informes internos o de cualquier documentación que hayan generado, aunque se les anima a que intenten trabajar con el formato de la memoria final desde el principio del proyecto. El informe no es evaluable, sino que sirve para valorar cómo los alumnos están desarrollando la actividad, corregir posibles errores conceptuales, indicar si se considera necesario prestar más atención a alguna de las fases ya desarrolladas, detectar posibles conflictos dentro de los grupos, etc. Este informe es voluntario para evitar cualquier tipo de carga adicional en fechas en las que suelen estar ocupados con los exámenes de evaluación intermedia. Aun siendo voluntario, cabe destacar que más de la mitad de los grupos presentaron este informe (en algunos casos prácticamente con la forma y contenido de una memoria final).

El único entregable obligatorio es la memoria final del proyecto, que debe presentarse la última semana del curso. Como se ha indicado anteriormente, los estudiantes deben utilizar el formato para la memoria del Trabajo Fin de Grado. Esta memoria representa el 25% de la nota del curso. En este primer año, hemos corregido el informe con la rúbrica utilizada para la corrección del Trabajo Fin de Grado con ligeras adaptaciones al proyecto.

La presentación del proyecto desarrollado tiene lugar en la semana 15, durante la última sesión de clase. La presentación es obligatoria y todos los integrantes del grupo presentan. Tras la presentación hay una sesión de preguntas y respuestas, tanto por parte de los profesores como de los otros grupos. También se formulan preguntas individuales para evaluar a cada miembro del grupo. La presentación representa el 15% de la nota evaluada en grupo. El 10% restante asignado al proyecto (50% de la nota total de la asignatura) se califica individualmente, utilizando como criterios de calificación la forma en que el alumno ha presentado, cómo ha respondido a las preguntas realizadas individualmente durante la presentación, las posibles observaciones de la dinámica de grupo en el laboratorio, si responde o no a los diferentes cuestionarios asociados al proyecto, etc.

VII. Resultados y Discusión

El impacto de la actividad y los resultados del aprendizaje se evaluaron mediante encuestas a los alumnos, preguntas del examen relacionadas con el proyecto y análisis comparativos con las calificaciones de años previos.

La participación de los alumnos ha sido positiva, ya que 29 de los 31 matriculados completaron el proyecto y aprobaron la asignatura en la convocatoria ordinaria. Se ha observado un mayor nivel de compromiso (entregas en plazo, informes más elaborados y soluciones originales) en el desarrollo del proyecto en comparación con la participación en las actividades prácticas de años anteriores.

El cuestionario se realizó con la aplicación Microsoft Form. La fecha de cierre del cuestionario se estableció antes de la fecha de publicación de las calificaciones del curso. El cuestionario constaba de 22 preguntas de texto (21 de las cuales eran obligatorias) que abarcaban los siguientes aspectos:

- Experiencia previa en ABP
- Percepción de la actividad de APB realizada
- Presentación pública
- Dinámica del grupo de trabajo
- Organización del trabajo
- Utilización de herramientas
- Evaluación de la actividad

La Fig. 8 muestra un resumen de los resultados recopilados en los cuestionarios.

De los 29 alumnos, 27 respondieron a la encuesta. El 89% de ellos valoraron positivamente la actividad y consideraban que habían aprendido más en comparación con una metodología tradicional basada en prácticas de laboratorio. Sólo 8 alumnos afirmaron no haber participado nunca en una actividad de ABP.

De los 27 alumnos, 21 consideraban que la actividad no les había consumido más tiempo que el que hipotéticamente les hubiera llevado realizar una práctica tradicional. Sin embargo, 24 consideraban que el proyecto les había ayudado a consolidar sus conocimientos sobre la materia de forma más eficiente que las prácticas convencionales.

En cuanto a la presentación, todos los alumnos tenían experiencia previa en presentaciones en público, pero alrededor del 50% de ellos no se sentían cómodos con esta situación. 26 lo consideraban útil para futuras presentaciones (especialmente el Trabajo Fin de Grado).

18 alumnos ya habían trabajado con uno o varios de sus compañeros de grupo. 25 opinaban que abordar el proyecto de forma colaborativa había tenido un impacto positivo en su aprendizaje. Dos de los grupos consideraban que podrían haber organizado y distribuido mejor el trabajo. De los 6 grupos que participaron en la actividad, sólo uno de ellos informó de problemas. Los problemas consistieron en que uno de los miembros abandonó la actividad sin avisar al resto del grupo y que otro miembro entregó la parte que se había comprometido a hacer el día anterior a la presentación, sin haberlo comunicado previamente.

En cuanto a la planificación, sólo 2 de los 6 grupos establecieron un calendario. Y en cuanto a las reuniones, salvo 1 grupo, todos han mantenido reuniones más o menos periódicas. En cuanto al uso de las herramientas disponibles en el espacio virtual del curso, su uso ha sido anecdótico.

Respecto a los resultados de examen, el 85% de los respondió correctamente a las preguntas relacionadas con aspectos fotovoltaicos, frente al 54% del año anterior.

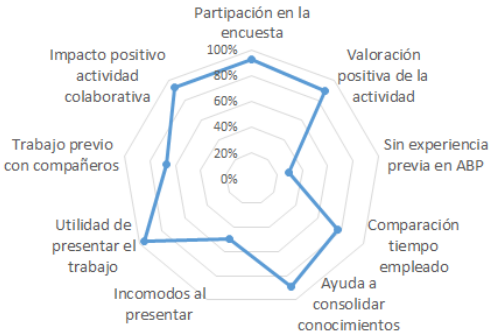


Fig. 9. Resumen de resultados de las encuestas.

VIII. Conclusiones

La valoración de la actividad es positiva a tenor de los resultados obtenidos y de los cuestionarios de los alumnos. La calidad de los trabajos presentados ha sido superior a la calidad de las prácticas presentadas en años anteriores. Sólo basándonos en el número de tutorías individuales y grupales realizadas este año en comparación con años anteriores, podemos deducir que ha habido un mayor interés por parte de los alumnos en la actividad y en la asignatura.

Desde el punto de vista del trabajo de los alumnos, la actividad no parece incrementar su carga de trabajo respecto a las prácticas convencionales; sin embargo, la valoración de la consolidación de los contenidos explicados en teoría es mayor. En base a esto, podemos valorar positivamente este tipo de actividad.

Agradecimientos

A los alumnos que participaron en el curso 2023/24.

Referencías

[1] D. G. Moursund, Project-based learning using information technology, Eugene, OR: International Society for Technology in Education, 1999.

[2] D. González Lamar, M. Arias Pérez de Azpeitia, K. Martín Díaz, J. Rodríguez Méndez, M. Rodríguez Rogina, and F. J. Sebastián Zúñiga, "Aplicación de Aprendizaje Basado en Diseños en la asignatura de Diseño de Sistemas Electrónicos de Potencia", Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación 2018 (SAAEI'18), Barcelona, España, 2018, pp. 29 – 34.

[3] F. Blaabjerg, "A power electronics and drives curriculum with project oriented and problem-based learning: a dynamic teaching approach for the future," *J. Power Electron.*, 2, 4, pp. 240-249, 2002.

[4] P. Bauer J. W. Kolar, "Teaching power electronics in the 21st century," *EPE Journal*, 13, 4, pp. 43-50, 2003.

[5] G. Matturro, F. Raschetti, and C. Fontán, "A Systematic Mapping Study on Soft Skills in Software Engineering," *J. Univers. Comput. Sci*, 25, 1, pp. 16-41, 2019.

[6] T. T. Wilson and A. L. Marnewick, "A Comparative Study of Soft Skills Amongst the Washington Accord Engineering Degree Graduates with Industry Expectations," *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, Stuttgart, Germany, 2018, pp. 1-6.

[7] M. Caeiro-Rodríguez *et al*., "Teaching Soft Skills in Engineering Education: An European Perspective," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 29222-29242, 2021

[8] Fotovoltaica, Energía Solar, Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2011.

[9] SunEarthTools: https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php (accessed Mar. 20, 2024)

[10] Andrew Marsh. Sun path chart: https://andrewmarsh.com/apps/releases/sunpath2d.html (accessed Mar. 20, 2024)

[11] Cercalia: http://cercaliaint.nexusgeografics.com/pisos3d/demo/example2.html (accessed Mar. 20, 2024)

[12] P. Escobar, E. Martínez, J.C. Saenz-Díez, E. Jiménez, and J. Blanco, "Modeling and analysis of the electricity consumption profile of the residential sector in Spain," *Energy and Buildings*, vol. 207, 2020.

[13] The power consumption database: https://www.tpcdb.com/ (accessed Mar. 20, 2024)

[14] Calcula tu consumo de electricidad y gas natural con Selectra: https://estimacion.selectra.es/ (accessed Mar. 20, 2024)

[15] Homer Pro: https://homerenergy.com/products/ (accessed Mar. 20, 2024)

[16] Photovoltaic Geographical Information System. European Comission: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/ (accessed Mar. 20, 2024)

[17] The POWER Project: https://power.larc.nasa.gov/ (accessed Mar. 20, 2024)

[18] J. Cantos Serrano, Configuración de instalaciones solares fotovoltaicas, 2nd edition, Madrid, España: Ediciones Paraninfo, 2022.

[19] Autosolar: https://autosolar.es/ (accessed Mar. 20, 2024)

[20] PV*SOL online: https://pvsol-online.valentin-software.com/ (accessed Mar. 20, 2024)

[21] PVcase: https://pvcase.com/ (accessed Mar. 20, 2024)

[22] PVsyst: https://www.pvsyst.com/ (accessed Mar. 20, 2024)

IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA EN UN PROCESO DE ACUICULTURA COMO ESTRATEGIA SOSTENIBLE

MSc. PhD (c) Luis Fernando Rico Riveros
Director Ingeniería Electrónica - Universidad ECCI
Bogotá, Colombia
direccion.electronica@ecci.edu.co

MSc. Víctor Hugo Bernal Tristancho
Profesor Tiempo Completo - Universidad ECCI
Bogotá, Colombia
vbernalt@ecci.edu.co

MSc. (c) Juan Emilio Sanabria Sanabria
Profesor Medio Completo - Universidad ECCI
Bogotá, Colombia
jsanabrias@ecci.edu.co

MSc. (c) Ronald Steven Rodríguez Rodríguez
Profesor Tiempo Completo - Universidad ECCI
Bogotá, Colombia
rsrodriguezr@ecci.edu.co

***Abstract*— The in-depth seminar in Industrial Electronics Technology offers students as a degree option the opportunity to specialize in renewable energy systems, in this case with a particular focus on wind energy. This programme requires participants to have a solid foundation in power systems, industrial instrumentation, automation and data acquisition. Through this seminar, students apply the competencies acquired in the theoretical background in a case study covering the planning, design and installation of a wind renewable energy generation system to be applied in aquaculture in the process of oxygen injection in culture ponds.**

Keywords—Seminar, Wind Turbine, Inverter, Converter, Protection System.

I. INTRODUCCIÓN

En este documento se expone un proyecto integral desarrollado en el marco del seminario de profundización en Tecnología de Electrónica Industrial, ofrecido como opción de grado a estudiantes interesados en especializarse en sistemas de energía renovable, con un enfoque particular en la energía eólica.

El Enfoque pedagógico de la Universidad ECCI se establece mediante un modelo constructivista el cual se desarrolla a partir de una pedagogía problémica [1] que permite en los programas académicos el desarrollo de los contenidos temáticos propuestos en cada una de las asignaturas de los programas de la Universidad. El programa de Ingeniería Electrónica ha adoptado el Enfoque Pedagógico [2] a través de la generación de preguntas problemas, así mismo desde la alineación curricular se establecen competencias y resultados de aprendizaje para cada una de las áreas que componen el plan de estudios [3], en la Tabla 1 se presenta en forma sintética la trazabilidad de cursos con resultados de aprendizaje que aportan en competencias y habilidades a la consecución de la propuesta y aplicación del seminario desarrollado.

Tabla 1. Cursos del plan de estudios que aportan directamente al seminario

ÁREA	CURSOS	SEMESTRE	RESULTADO APRENDIZAJE
CIRCUITOS - ELECTRÓNICA	CIRCUITOS ELÉCTRICOS I Y II	SEGUNDO, TERCERO	Conocer los teoremas de análisis para hallar las variables electricas que permitan resolver y analizar los circuitos eléctricos y de potencia en corriente directa y alterna aplicados a sistemas de potencia industriales
	ELECTRÓNICA I Y II	TERCERO, CUARTO	Implementarr circuitos electrónicos analogicos para aplicaciones en electrónica industrial y soporte de telecomunicaciones
	ELECTRÓNICA DE POTENCIA	QUINTO	
AUTOMÁTICA	ELECTROTECNIA Y MÁQUINAS ELÉCTRICAS	TERCERO	Identificar los elementos constitutivos en sistemas automatizados a pequeña y mediana escala, relacionando su funcionamiento en condiciones de normalidad, permitiendo generar acciones de mejora en el desarrollo de mantenimientos preventivos o solución de fallas de manera rápida y eficaz en mantenimientos
	MEDICIONES E INSTRUMENTACIÓN	CUARTO	
	AUTOMATIZACIÓN	CUARTO	
	ADQUISICIÓN DE DATOS	QUINTO	

Este programa educativo, que exige de los participantes una sólida base en sistemas de potencia, instrumentación industrial, automatización y adquisición de datos, permite a los estudiantes aplicar sus conocimientos teóricos en un caso práctico: la planificación, diseño e instalación de un sistema eólico de generación de energía renovable destinado a mejorar el proceso de acuicultura mediante la inyección de oxígeno en piscinas de cultivo.

El programa académico les presenta a los estudiantes la opción de seminario de profundización para poderse graduar como tecnólogos, desde el periodo intersemestral 2016-2 el seminario con orientación a la aplicación de energías renovables se ha implementado, en la Tabla 2 se presenta un compendio de las versiones que se han desarrollado con una breve descripción de los entregables y resultados de cada versión.

Tabla 2. Versiones del seminario realizadas

CICLO LECTIVO	NOMBRE SEMINARIO	NÚMERO DE ESTUDIANTES	DESCRIPCIÓN ENTREGABLES
2016-2-VAC-1664	ERN: ENERGÍAS RENOVABLES	23	MAQUETA DIDÁCTICA DE TRANSFORMACIÓN ENERGÉTICA
2017-1-VAC-1762	ERG: ENERGIAS RENOVABLES	27	CONSTRUCCIÓN DE INVERSOR DC - AC APLICADO CON PANEL SOLAR FOTOVOLTÁICO
2017-2-REG-1763	ENR: ENERGIAS RENOVABLES	23	PROTOTIPO DE GENERADOR DE HIDROGENO POR PLACAS PARALELAS CON ELECTROLISIS
2017-2-VAC-1764	ERP: ENERGIAS RENOVABLES	15	CONSTRUCCIÓN DE MANUAL DEL USUARIO SOFTWARE SOLAR ARRAY SIMULADOR EN ESPAÑOL
2018-1-VAC-1862	ERP: ENERGIAS RENOVABLES	26	CONVERTIDOR CON CORRECCIÓN DE FACTOR DE POTENCIA PARA LA RECUPERACIÓN DE BATERÍAS
2018-2-VAC-1864	ERP: ENERGIAS RENOVABLES	19	APLICACIÓN DEL CONVERTIDOR FLYBACK EN MÓDULO FOTOVOLTAICO
2019-1-VAC-1962	ENERGÍAS RENOVABLES	13	ESTUDIO DE SISTEMAS DE BOMBEO FOTOVOLTAICO APLICANDO EFICIENCIA ENERGÉTICA
2019-2-VAC-1964	ERP: ENERGIAS RENOVABLES	8	SOLUCIONES ENERGÉTICAS, UNA MIRADA HACIA EL FUNCIONAMIENTO DEL ALGORITMO MPPT (P&O)
2020-1-VAC-2062	ENA: ENERGIAS ALTERNATIVAS	13	SISTEMA DE PRUEBA DE BATERÍA REGENERATIVA 17020, BATERÍAS REGENERATIVAS EN SISTEMAS FERROVIARIOS ELÉCTRICOS
2021-1-VAC-2162	SPE: SISTEMAS DE POTENCIA EN ENERGÍAS RENOVABLES	16	ESTUDIO DEL ALGORITMO DE SEGUIMIENTO DE PUNTO DEMÁXIMA POTENCIA PERTURBAR Y OBSERVAR
2022-1-VAC-2262	SPE: SISTEMAS DE POTENCIA EN ENERGÍAS RENOVABLES	8	ALGORITMO DE SEGUIMIENTO DE PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA TENSIÓN A CIRCUITO ABIERTO FRACCIONAL
2023-1VAC-2362	SPE: SISTEMAS DE POTENCIA EN ENERGÍAS RENOVABLES	12	INSTALACIÓN DE SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE EÓLICO APLICADO EN EL PROCESO DE ACUICULTURA SUTAMARCHÁN – BOYACÁ.
2023-2-VAC-2364	SPE: SISTEMAS DE POTENCIA EN ENERGÍAS RENOVABLES	19	INSTALACIÓN DE SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE HIBRIDO SOLAR FOTOVOLTAICO ACOPLADO A SISTEMA EÓLICO PARA EL PROCESO DE ACUICULTURA SUTAMARCHÁN – BOYACÁ.

De la Tabla 2 se concluye que los seminarios sobre energías renovables entre los años 2016 y 2023 muestra una evolución en los temas abordados, reflejando un enfoque cada vez más práctico y aplicado en la educación y desarrollo de tecnologías de energía renovable. Se tiene una diversidad en

los proyectos realizados, desde maquetas didácticas hasta instalaciones complejas de sistemas de energía híbridos para acuicultura, destacando un creciente interés en soluciones integradas y aplicaciones reales. Los temas de los seminarios se han especializado y adaptado a las necesidades del mercado y del sector industrial, lo que indica un enfoque en la formación de profesionales capaces de abordar desafíos energéticos contemporáneos. Este progreso no solo mejora la formación de los estudiantes, sino que también impulsa el desarrollo de soluciones energéticas sostenibles y efectivas en el campo de las energías renovables.

Con el fin de afianzar los conocimientos adquiridos en el seminario de energías renovables, a partir de la versión 2023-2 y para dar aplicabilidad a una metodología basada en aprendizaje y servicio (APS), se decidió llevar estos conocimientos a la práctica en un entorno real, específicamente en la finca San Miguel del Castillo, entre los municipios de Sutamarchán y Villa de Leyva, Boyacá [4]. Se realizó un estudio detallado de la ubicación para evaluar la viabilidad de instalar un aerogenerador. Durante este estudio, se identificaron condiciones adecuadas para la instalación, teniendo en cuenta el impacto ambiental potencial. Se observó una escasa presencia de árboles cercanos a la estructura y los pocos existentes son de tamaño reducido, lo que implica un impacto mínimo en el tráfico de aves. Además, se determinó que en esta área se generan vientos cruzados constantes, asegurando un funcionamiento estable del aerogenerador. Se utilizaron datos capturados mediante un software para monitorear las condiciones del viento en la zona, además de datos extraídos del atlas de viento y energía eólica de Colombia, del Ministerio de Minas y Energía Nacional [5], la Figura 1 presenta los datos de la consulta.

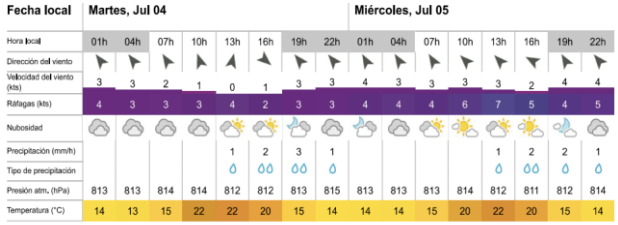


Figura 1. Previsión de vientos en Sutamarchán

A partir de esta información fue posible determinar que los vientos durante el día se mantienen en un promedio de 2.6 nudos como mínimo a lo largo del año, lo que proporciona una estabilidad para el uso del aerogenerador. Por lo tanto, se concluye que la instalación es viable.

Para el periodo intersemestral 2024-1 que cubre los meses de junio y julio, se tiene abierta la oferta para que los estudiantes que terminan quinto semestre puedan continuar con los desarrollos de la temática del seminario que para el caso se propone una ampliación e integración del sistema con otro recurso de generación de energía basado en panel fotovoltáico. Con alcance en proyectos de ingeniería en la opción de grado de seminario internacional y de investigación a nivel de décimo semestre de ingeniería.

A lo largo del desarrollo del caso de estudio, se detalla el cálculo y modelado en CAD de los sistemas estructurales y eléctricos, la selección de componentes para las etapas de control y potencia, sistemas de protección y las especificaciones del aerogenerador. Un especial énfasis se pone en el proceso de instalación, documentando cada fase del proyecto y las adaptaciones necesarias durante su evolución, todo bajo la supervisión de profesores del programa. Este enfoque pedagógico asegura que los estudiantes no solo afiancen su comprensión teórica, sino que también desarrollen competencias en el diseño y ejecución de proyectos prácticos, obteniendo una comprensión integral de la implementación y gestión de proyectos de energía renovable eólica.

El proyecto se enfoca en la utilización de la energía eólica para automatizar el bombeo en los procesos de acuicultura de tilapia, con el objetivo de mejorar los procesos de producción, reducir costos, tiempo, desperdicios, contaminación y fallas, además de controlar en tiempo real el progreso del cultivo para asegurar condiciones óptimas. Esto responde a un incremento en las necesidades de producción de la acuicultura tradicional y a la ausencia de un monitoreo en tiempo real en los sistemas de acuicultura en el país, lo cual afecta la calidad de los procesos productivos.

Los objetivos del proyecto incluyen la instalación de un sistema de generación eólica para el bombeo de agua y aireación en la acuicultura de tilapias, determinar los componentes adecuados para implementar el sistema, construir el sistema de protección de puesta a tierra y pararrayos, y realizar pruebas de mediciones de funcionamiento del sistema implementado. Se realizó un estudio de la ubicación para evaluar la viabilidad de instalar un aerogenerador en el sitio escogido, identificando condiciones óptimas para su instalación y un impacto ambiental mínimo.

En el núcleo de este proyecto yace la comprensión de que la acuicultura aporta en una medida significativa a la seguridad alimentaria global, enfrentando desafíos significativos en términos de eficiencia energética y sostenibilidad ambiental. La integración de un sistema de energía eólica para el bombeo de agua y la aireación presenta una solución tecnológica que aborda estos desafíos, ofreciendo un método de producción más limpio y sostenible acorde a las necesidades de estos tiempos. Al enfocar esfuerzos en la aireación eficiente de los tanques de cultivo, este proyecto apunta a mejorar las condiciones de vida de las tilapias, incrementando su tasa de supervivencia y calidad, lo cual es esencial para la viabilidad económica y ambiental de las prácticas de acuicultura.

La metodología empleada abarcó desde el estudio de la ubicación, pasando por el diseño y selección de componentes, hasta la instalación del sistema de aerogenerador de 500W y la verificación del correcto funcionamiento de los dispositivos eléctricos asociados. Se documentaron todas las etapas del proceso, incluyendo las modificaciones necesarias y la socialización del proyecto con el interesado.

Los resultados demostraron la viabilidad y efectividad del sistema instalado, destacando la importancia de la energía eólica en la optimización de procesos de acuicultura. En conclusión, este proyecto no solo evidencia la aplicabilidad de las energías renovables en sectores productivos como la acuicultura, sino que también resalta el valor de una educación práctica y teórica en la formación de futuros

profesionales capaces de innovar y contribuir significativamente en el campo de la electrónica industrial y las energías renovables.

II. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

Se presenta un breve panorama sobre las energías renovables, enfocándose particularmente en la energía eólica dentro del contexto de la sostenibilidad ambiental y la eficiencia energética. Se inicia con una evaluación de la viabilidad de instalar aerogeneradores en ubicaciones específicas, considerando factores cruciales como las condiciones atmosféricas, la altura y la velocidad del viento, con el objetivo de optimizar el rendimiento operativo y minimizar el impacto ambiental [6]. La selección cuidadosa del sitio se subraya a través del análisis de la presencia arbórea y la fauna aviar, donde se destaca una menor incidencia en la avifauna debido a la escasez y baja estatura de los árboles en el área evaluada y la constancia de vientos cruzados con una velocidad promedio de 2.6 nudos [7], asegurando así la estabilidad de las condiciones eólicas a lo largo del tiempo.

Así mismo se abarca dentro de un contexto una diversidad de fuentes de energía renovable, argumentando sus ventajas inherentes por ser inagotables o de rápida renovación, y por proceder de manera que no genera residuos tóxicos, contribuyendo así a un modelo energético más sostenible [8]. Entre las fuentes de energías se encuentra:

Energía Solar: Describiendo el proceso fotovoltaico como un medio eficiente para convertir la radiación solar en energía eléctrica, resaltando la importancia de la innovación tecnológica en el desarrollo de celdas solares más eficientes [9].

Energía Hidroeléctrica: Reconociendo su rol tradicional y continuo en la generación de electricidad a través del movimiento del agua, y su potencial para integrarse en sistemas de energía sostenibles [10].

Energía de Biomasa: Enfocándose en la conversión de materia orgánica en energía, lo cual representa una alternativa viable para la producción de calor, electricidad y biocombustibles, contribuyendo a la diversificación energética y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero [11].

Energía Geotérmica: Explorando el uso del calor terrestre como una fuente de energía limpia y estable para la generación de electricidad y la climatización, subrayando los avances tecnológicos que permiten una mayor explotación de esta energía [12].

Energía Nuclear: Discutiendo los aspectos relacionados con la fisión nuclear como fuente de calor para la generación de electricidad, y los desafíos y debates en torno a su seguridad y gestión de residuos [13].

Energía Eólica: Destacando su eficiencia en la conversión de la energía cinética del viento en electricidad, y el papel crucial de la investigación y las simulaciones para identificar los emplazamientos más idóneos para los aerogeneradores, así como su configuración técnica para maximizar la producción energética [7].

En el documento se subraya la importancia de una transición hacia fuentes de energía renovable, enfatizando la energía eólica como un componente clave en la matriz energética del futuro. A través de un análisis detallado de diferentes tecnologías y su implementación práctica, se pretende contribuir al cuerpo de conocimiento en el campo de las energías renovables, destacando los avances tecnológicos, los desafíos y las oportunidades para alcanzar un desarrollo energético sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

Se presenta una visión sobre los avances en tecnología aplicada a las energías renovables, abarcando desde componentes de almacenamiento de energía, como baterías, hasta sistemas de conversión de energía y medidas de protección específicas para instalaciones eólicas.

La Serie CNFJ de baterías está específicamente diseñada para cumplir con los requisitos de aplicaciones que involucran cargas y descargas cíclicas frecuentes en condiciones extremas, en la Figura 2 se presenta imagen de la batería utilizada [14]. Este diseño se beneficia de la incorporación de un electrolito de Nano Gel de última generación y una pasta de alta densidad, optimizando así la eficiencia de recarga incluso bajo corrientes de carga muy bajas. La adición del Nano Gel juega un papel crucial en la reducción de la estratificación del ácido, característica que hace a esta serie de baterías particularmente idónea para su uso en sistemas de energía renovable, donde la fiabilidad y la capacidad de recuperación rápida de la energía son fundamentales.

Figura 2. Batería de gel de 80Ah a 12V.

En lo que respecta al Inversor de Potencia, se detalla un diseño innovador que utiliza técnicas de modulación por ancho de pulso (PWM), circuitos Push-Pull y la manipulación de señales a través de un microcontrolador. Este diseño multifacético permite una eficiente conversión de la energía almacenada en las baterías a una forma utilizable en aplicaciones domésticas y comerciales. La incorporación de transistores MOSFET en configuración Push-Pull, capaces de manejar altas corrientes, y la utilización de un transformador para elevar la tensión de las baterías, son aspectos técnicos clave. Adicionalmente, una etapa de Puente H con transistores IGBT en configuración de puente completo es responsable de generar una señal de alta tensión continua, la cual se convierte en una salida de 220 voltios (RMS), ideal para alimentar dispositivos electrónicos sensibles. En la Figura 3 se presenta el diagrama a bloques del inversor [15].

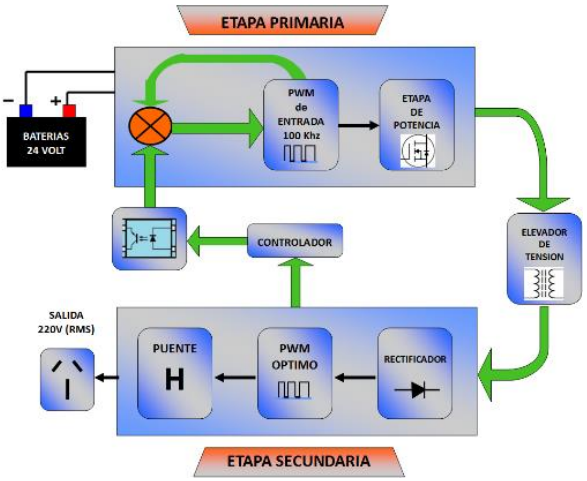


Figura 3. Esquema de funcionamiento del Diagrama en bloques Inversor.

El PowerDrive 1000 W, un inversor de onda sinusoidal pura, representa un hito en la tecnología de inversores al proporcionar una salida energética comparable a la suministrada por la red eléctrica doméstica, la Figura 4 presenta imagen del inversor utilizado. Este dispositivo es capaz de ofrecer una corriente estable y continua, libre de interrupciones o interferencias, lo que lo hace perfecto para el funcionamiento de equipos electrónicos delicados, tales como televisores LCD, computadoras y dispositivos médicos. La integración de tecnología inalámbrica Bluetooth y una interfaz de aplicación permite a los usuarios un control remoto y personalización de la configuración del inversor, mejorando así la experiencia de usuario y adaptabilidad del dispositivo.

Figura 4. Inversor de onda sinusoidal pura

En cuanto a la aplicación en sistemas eólicos, se destaca la importancia del Inversor CC / CA como un componente esencial en la conversión de la energía mecánica generada por los aerogeneradores en energía eléctrica alterna, apta para su uso o conexión a la red eléctrica. Este proceso subraya el papel crucial de los inversores en la integración de energías renovables en el mix energético. La Figura 5 presenta un esquema de aplicación utilizando como fuente de generación un aerogenerador [16].

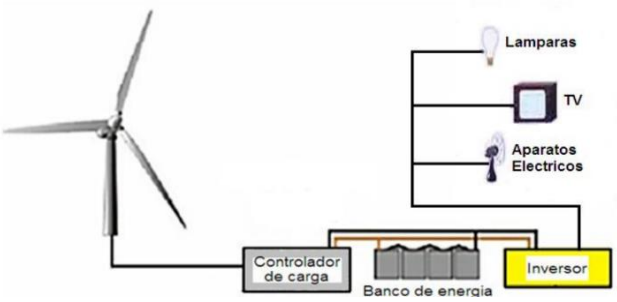


Figura 5. Esquema aplicación energía eólica

La caracterización del Aerogenerador de 500 W pone de manifiesto las especificaciones técnicas que maximizan la generación de energía eólica. Se hace énfasis en la baja velocidad de arranque y la velocidad nominal del viento para la operación del aerogenerador, así como en las dimensiones y materiales de las cuchillas, diseñadas para una alta eficiencia y durabilidad en diversos climas.

En la Figura 6 se presenta la estructura interna de un aerogenerador comercial [17].

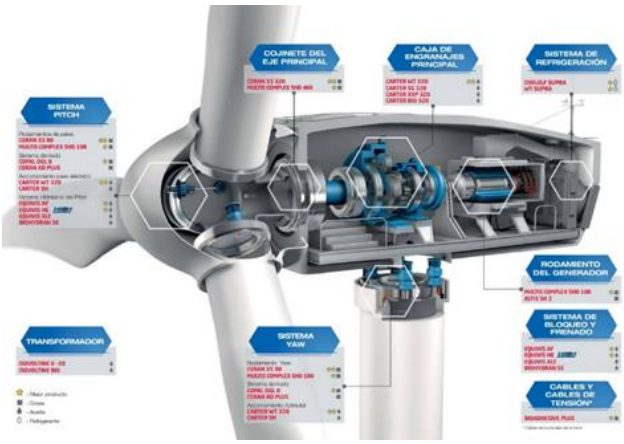


Figura 6. Estructura Aerogenerador

Por último, el sistema de protección del aerogenerador se centra en el pararrayos de 5 puntas Franklin, especificando su diseño, materiales de construcción y especificaciones técnicas, la imagen del pararrayos se puede observar en la Figura 7 [18]. Este sistema es fundamental para proteger las instalaciones eólicas de los efectos directos de las descargas atmosféricas, asegurando así su operatividad y longevidad.

Figura 7. Pararrayos de 5 puntas Franklin

Este análisis detallado pone de relieve la complejidad y la interconexión de los componentes tecnológicos en el ámbito de las energías renovables, demostrando los avances en eficiencia, seguridad y control que caracterizan a las soluciones energéticas modernas.

La implementación del sistema de generación de energía eólica que se detalla en este documento se lleva a cabo mediante un enfoque que abarca desde el diseño preliminar hasta la ejecución final del proyecto. El aerogenerador seleccionado, un modelo Dyna-Living de 12 V y 500 W con 5 aspas, es diseñado para optimizar la captura de energía eólica, complementado por un controlador de carga eficiente. Para su protección contra las descargas eléctricas atmosféricas, se integra un pararrayos de 5 puntas Franklin, una medida esencial dada la vulnerabilidad del equipo a los rayos durante tormentas, considerando los cambios climáticos y ambientales del área.

El plano estructural que se observa en la Figura 8, indica con precisión la ubicación del aerogenerador, asegurando la conexión adecuada para la puesta a tierra y el manejo eléctrico necesario en la caseta de control, junto con la gestión de la carga de baterías. Se especifican las dimensiones de la estructura base y la caseta, incluyendo la altura de las vigas y el largo de los arbotantes, fundamentales para garantizar la estabilidad y la eficiencia operativa del sistema. La base o mástil del aerogenerador, un tubo cuadrado de 10x10 con una altura de 6 metros, es diseñado para soportar el equipo de generación eólica, asegurando una elevación adecuada para la captación óptima del viento.

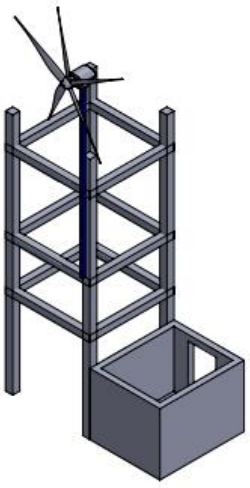


Figura 8. Plano Estructural del Aerogenerador

El diseño y la creación de las piezas necesarias, realizadas en Solid Works 2015, tal como se presenta en la Figura 8, permiten una visualización detallada de la estructura base y del aerogenerador con sus 5 aspas, facilitando la precisión en la fabricación y montaje. Además, se elabora un plano específico para las conexiones del aerogenerador, la Figura 9 ilustra las conexiones del sistema, dividiendo el proceso de montaje en tres partes críticas: la instalación del aerogenerador junto con el pararrayos en la torre asignada, la instalación y cableado de la caseta de control, y la implementación de un sistema de luz con sensor de movimiento, además de la puesta a tierra necesaria para la protección integral del sistema.

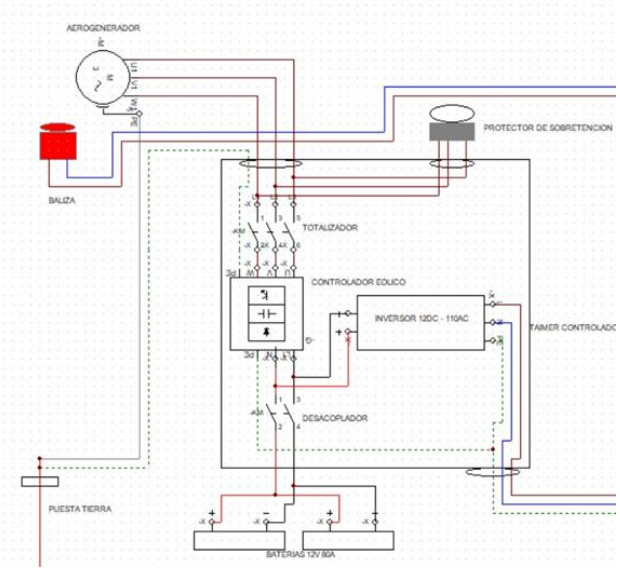


Figura 9. Plano Eléctrico y puesta a tierra del Sistema del Aerogenerador

Para optimizar el proceso de instalación, se organiza al equipo en tres cuadrillas, cada una con tareas específicas que van desde el montaje del aerogenerador y el pararrayos hasta la configuración final de la caseta de control y el sistema de puesta a tierra. Esta división del trabajo no solo mejora la eficiencia del proceso, sino que también permite una asignación clara de responsabilidades, facilitando una ejecución fluida y coordinada del proyecto. Cada cuadrilla, con su enfoque particular, contribuye a un objetivo común: la implementación exitosa de un sistema de energía eólica eficiente, seguro y capaz de operar de manera óptima en el contexto específico para el cual fue diseñado.

III. RESULTADOS

En este apartado del documento se profundiza en el proceso integral de instalación y configuración del aerogenerador, destacando cada etapa, desde la estructura y conexión eléctrica hasta la seguridad operativa y los resultados de pruebas.

Instalación del Aerogenerador:

El proceso comienza con la preparación de una base robusta, empleando un tubo cuadrado estructural de 10x10 cm y 6 metros de altura, asegurando la estabilidad y resistencia necesarias para el aerogenerador Dyna-Living de 500 W y 12 V, en la Figura 10 se presenta foto de la estructura de la torre instalada en la ubicación determinada. Para el montaje se realiza un trabajo que incluye perforaciones precisas basadas en el diseño del aerogenerador, la fijación con tornillos para una sujeción segura, y ajustes finales a través de soldadura eléctrica. Se aplican tratamientos anticorrosivos y estéticos para prolongar la vida útil y mejorar la presentación del conjunto. La conexión eléctrica es cuidadosamente ejecutada con borneras de tornillo, y protegida con cinta auto fundente y aislante, asegurando la integridad y funcionamiento seguro del sistema.

Figura 10. Estructura de la torre en la cual se ubica el aerogenerador

La estructura adicionalmente se prepara para enfrentar condiciones climáticas adversas mediante la instalación de un pararrayos de 5 puntas Franklin, y se aplica sellante a base de silicona en componentes críticos para evitar el ingreso de agua, protegiendo la parte eléctrica del sistema. La Figura 11 presenta foto del ensamble en mástil del generador y pararrayos.

Figura 11. Ensamble en mástil del generador y pararrayos

Componente Eléctrico:

El equipo se divide para optimizar la instalación eléctrica; un grupo se enfoca en la base para baterías, incluyendo la instalación de sensores, iluminación y tomas de corriente. El otro grupo se dedica al montaje del tablero de control, siguiendo detalladamente el plano eléctrico. Este proceso implica la instalación del conversor, que adapta la corriente generada por el aerogenerador a voltajes utilizables, y del inversor, esencial para cargar las baterías y suministrar energía a dispositivos estándar. Se realizan modificaciones estructurales para la entrada de cables y ventilación del inversor, garantizando el rendimiento óptimo del sistema. En la Figura 12 se presenta foto del conjunto baterías y tablero eléctrico instalado en el cuarto de control.

Figura 12. Instalación y maquillado de tableros eléctricos.

Se verifica cuidadosamente el plano para la correcta ubicación de componentes clave como interruptores de encendido/apagado y sistemas de protección, que aseguran el manejo eficaz y seguro del voltaje generado, así como la protección contra sobretensiones. La implementación detallada incluye ajustes para la visualización del voltaje y la conexión segura de las baterías.

Puesta a Tierra:

La instalación de la puesta a tierra comienza con un análisis detallado del terreno y la preparación de las herramientas necesarias. Se marca y prepara el espacio para el pozo de tierra, alcanzando una profundidad de 60 cm para insertar una barra de cobre de 1.50 m, la Figura 13 ilustra la ubicación de la varilla de puesta a tierra en lugar de instalación. La preparación incluye el ablandamiento del suelo con agua y el uso de técnicas específicas para garantizar una instalación adecuada de la barra, culminando en la conexión del sistema de puesta a tierra al aerogenerador y el tablero de control.

Figura 13. Ubicación de varilla de puesta a tierra y material conductivo hidrosolta

Resultados:

Las pruebas de funcionamiento confirmaron la operatividad del sistema de energía eólica, validando su capacidad para cumplir con los requerimientos energéticos específicos del proyecto. La utilización de una fuente de alimentación DC programable simuló efectivamente las condiciones de carga, permitiendo una evaluación precisa del rendimiento del PowerDrive y la eficacia en la carga de las baterías. Este

enfoque pragmático garantiza que el sistema no solo es capaz de proveer energía de manera eficiente a dispositivos electrónicos, sino que también cumple con los requisitos energéticos para la aireación y el bombeo de agua en las piscinas de cultivo de tilapias, aspectos críticos para el mantenimiento de una acuicultura sostenible. Gracias a esto, se confirma que la fase de inicio del cultivo es viable, lo que representa un avance significativo para asegurar la sostenibilidad y eficiencia de estas operaciones desde sus etapas más tempranas. La Figura 14 presenta los avances e integración del sistema.

Figura 14. Integración del sistema

La documentación detallada de cada fase del proyecto, incluidas las adaptaciones realizadas y las soluciones técnicas implementadas, proporciona una base confiable para futuras aplicaciones del sistema en contextos similares. La implementación efectiva del aerogenerador, junto con el sistema de protección de puesta a tierra y pararrayos, demuestra la viabilidad técnica de integrar fuentes de energía renovable en operaciones de acuicultura, contribuyendo así a la eficiencia energética y reduciendo el impacto ambiental asociado a estas actividades.

IV. CONCLUSIONES

Las conclusiones del proyecto de instalación del sistema de aerogenerador de 500W, que incluye desde el diseño estructural y eléctrico hasta la implementación y pruebas finales, resaltan la importancia de una planificación detallada y una ejecución cuidadosa para asegurar la eficacia y seguridad de sistemas de energía renovable:

Integración y Diseño Tecnológico: La instalación exitosa del aerogenerador de 500W demuestra la viabilidad de integrar soluciones tecnológicas avanzadas, como el conversor trifásico y el inversor DC-AC, para optimizar la generación de energía eólica y su conversión en electricidad utilizable. La capacidad de cargar baterías de 12v y alimentar cargas lumínicas y otros dispositivos electrónicos resalta la adaptabilidad del sistema a diferentes necesidades energéticas.

Consideración de Elementos y Presupuesto: La selección adecuada de componentes, basada en las necesidades específicas del proyecto y dentro de las restricciones presupuestarias, es crucial para el éxito de la instalación. La adaptación de la lista de elementos necesarios para la acometida eléctrica y la atención al costo de los elementos subraya la importancia de una planificación financiera efectiva en proyectos de energía renovable.

Planificación Estructural y Eléctrica: El diseño detallado de la estructura y la acometida eléctrica, incluyendo la puesta a tierra y la protección contra sobretensiones, enfatiza la necesidad de un enfoque meticuloso en la planificación. La independización del sistema de protección del pararrayos y la integración con la puesta a tierra ilustran cómo se puede maximizar la seguridad y eficiencia operativa del sistema.

Verificación y Socialización del Proyecto: La verificación del correcto funcionamiento de los dispositivos eléctricos asociados al generador y la carga asociada es fundamental para asegurar la fiabilidad del sistema. La socialización del proyecto y su operación con los interesados demuestra el valor de la comunicación y la transparencia en la gestión de proyectos de energías renovables.

Importancia de la Seguridad y Eficiencia: El proyecto resalta la importancia crítica de implementar medidas de seguridad, como la puesta a tierra y la protección contra sobretensiones, para proteger tanto el sistema como a sus usuarios. La eficiencia en la generación y conversión de energía, asegurada por la correcta instalación y configuración de componentes técnicos, subraya el potencial de las energías renovables para satisfacer necesidades energéticas de manera sostenible.

En resumen, el proyecto del aerogenerador de 500W ilustra la complejidad y el potencial de los sistemas de energía renovable cuando se abordan con una planificación cuidadosa, consideraciones técnicas precisas, y un compromiso con la seguridad y la eficiencia. Este enfoque integral no solo garantiza la operatividad y sostenibilidad del sistema, sino que también establece un modelo para futuras implementaciones de tecnologías de energías renovables.

V. REFERENCIAS

[1] Pedagogía problémica. https://www.magisterio.com.co/libro/pedagogia-problemica
[2] Enfoque pedagógico, 2019. https://www.ecci.edu.co/sites/default/files/inline-files/Enfoque%20pedago%CC%81gico%20institucional.pdf
[3] L.F. R. Riveros, V.H. B. Tristancho and E.J.R. Suárez. “Implementation of problemizing pedagogies in the automation area of the electronic engineering program”. TAEE 2020 Porto - Portugal.
[4] M. Martínez and A. Cruz. “Metodología de Aprendizaje y Servicio: Una guía para docentes y educadores”. Editorial Educación y Compromiso. 2020
[5] Ministerio de Energía. (n.d.). “Repositorio de Información de Energías Renovables. Repositorio Institucional del Ministerio de Energía”. https://repositoriobi.minenergia.gov.co/handle/123456789/22

[6] Energías Renovables, [En línea]. Available: https://www.energias-renovables.com/geotermica/como-aprovechar-el-potencial-de-la-energia-20200212.
[7] Global Wind Report 2021. Global Wind Energy Council
[8] J.W Lund and A.N. Toth, "Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review". Geothermics, 88, 101915. 2020.
[9] Renewables. International Energy Agency (IEA). 2020
[10] Hydropower Status Report". International Hydropower Association (IHA). 2020
[11] D. Thrän, D. Peetz and K. Schaubach, "Global bioenergy supply and demand projections: A review of modeling approaches". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 137, 110494. 2020.
[12] J.W. Lund and A.N. Toth, "Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review". Geothermics, 89, 101916. 2020.
[13] Ecologia Verde, [En línea]. Available: https://www.ecologiaverde.com/ventajas-y-desventajas-de-la-energia-nuclear-1114.html.
[14] Baterias y Amperios,» [En línea]. Available: https://bateriasyamperios.com/guia-e-instalacion/baterias-en-serie-y-paralelo-como-debo-conectar/.
[15] DISSER, [En línea]. Available: https://disser.webnode.com.ar/products/producto-1-
[16] Cimar, [En línea]. Available: https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/801/1/Jesus%20Gerardo%20Montes%20Aguilar%20MER.pdf.
[17] TotalEnergies, [En línea]. Available: https://www.totalenergies.es/es/pymes/blog/aerogeneradores-partes-y-funcionamiento.
[18] Pararrayos punta Franklin: todos los detalles sobre este modelo de pararrayos, PSR Pararrayos, 2023.,» [En línea]. Available: https://psr.es/pararrayos-punta-franklin/#:~:text=Los%20pararrayos%20de%20punta%20de,una%20altura%20de%20430%20mm

S3B – UNIVERSITY - COMPANY COLLABORATION, COMPANY INTERNSHIPS

Fidelización del alumno en Diseño y Síntesis de Sistemas Digitales

Oscar Alonso
Electronics & Biomedical Engineering Department
Universitat de Barcelona
Barcelona, Spain
oalonso@ub.edu

Joan Canals
Electronics & Biomedical Engineering Department
Universitat de Barcelona
Barcelona, Spain
canals@ub.edu

Sergio Moreno
Electronics & Biomedical Engineering Department
Universitat de Barcelona
Barcelona, Spain
sergiomoreno@ub.edu

Ángel Diéguez
Electronics & Biomedical Engineering Department
Universitat de Barcelona
Barcelona, Spain
angel.dieguez@ub.edu

***Abstract*— En las carreras técnicas con asignaturas de alto contenido práctico es habitual el sobreesfuerzo, resultando en el abandono de la asignatura. En consecuencia, los profesores plantean estrategias docentes para intentar motivar al alumno y atraerlo a la asignatura En esta comunicación se detalla la experiencia de realizar un par de Acciones de Innovación Docente aplicadas a la asignatura de Diseño y Síntesis de Sistemas Digitales, que se cursa durante el 6º semestre en el grado de Ingeniería Electrónica de Telecomunicaciones de la Universitat de Barcelona.**

Keywords*— *e-learning colaborativo, Aprendizaje basado en proyectos, Particionado, Practicas guiadas.

I. INTRODUCCIÓN

El abandono de estudios universitarios, en particular en las carreras técnicas como ingeniería y arquitectura, continúa siendo un desafío en el ámbito de la educación superior. A pesar de los esfuerzos continuos por mejorar la retención estudiantil, las tasas de abandono en estas disciplinas siguen siendo motivo de preocupación como se demuestra en la literatura [1-3].

A pesar de la amplia literatura a nivel de estudios universitarios, es difícil encontrar referencias que aborden el abandono en asignaturas concretas, lo que sigue siendo un tema relevante ya que puede señalar áreas de dificultad particular para los estudiantes y, por tanto, requerir intervenciones específicas por parte del equipo docente. Es común que las asignaturas con altas tasas de abandono (TA) sean aquellas que presentan un mayor nivel de dificultad percibida por los estudiantes, como pueden ser ciertas materias de matemáticas, física o programación en el contexto de las ingenierías y otras carreras técnicas. El abandono de estas asignaturas puede deberse a varios factores, entre los que destacan:

- *La dificultad del contenido y confianza del alumno*. Estudios como [4], indican que la dificultad percibida y la falta de preparación previa, pueden contribuir significativamente a las TA. Aunque el estudio se centra en cursos de matemáticas, es fácilmente extrapolable a otros estudios como física o ingenierías.
- *La metodología de enseñanza*. Tal como se reporta en [5], la enseñanza activa ayuda en mejorar el rendimiento académico, la retención de información, y la satisfacción del alumnado. Ejemplos de técnicas de enseñanza activas son el aprendizaje basado en problemas (ABP), aprendizaje basado en proyectos, gamificación, o el uso de casos prácticos, entre otras.
- *La carga de trabajo y estrés*. Referencias como [6,7] presentan como una gestión del tiempo ineficaz y una alta carga de trabajo pueden aumentar significativamente el estrés, afectando negativamente el rendimiento académico y las decisiones sobre la continuación de cursos.
- *Las expectativas y motivación del alumnado*. La literatura sugiere que una mayor motivación está asociada con mejores resultados académicos y una mayor persistencia, mientras que la falta de motivación está relacionada con el abandono [8].

Este artículo se centra en la asignatura de Diseño y Síntesis de Sistemas Digitales (DSSD), que ha experimentado una tasa de abandono (TA) alarmante, superior al 55%. A través de encuestas, hemos identificado una percepción de carga de trabajo excesiva como una preocupación principal entre los estudiantes. Desde la situación inicial de DSSD en 2015, presentada en Antecedentes, se han implementado diversas Acciones de Innovación Docente (AID) para abordar este problema, cuyos procesos y resultados detallamos en las secciones de Descripción de las Innovaciones Docentes, Resultados y Conclusiones. Este enfoque no solo pretende mejorar la retención estudiantil en DSSD sino también ofrecer nuestra experiencia para la aplicación de estrategias similares en otras asignaturas con desafíos comparables.

A través de este estudio, buscamos no solo presentar un caso específico de intervención exitosa sino también contribuir al diálogo más amplio sobre cómo la innovación docente puede jugar un rol crucial en la mejora de la experiencia educativa y la disminución del abandono académico en asignaturas técnicas.

II. ANTECEDENTES

DSSD es una asignatura obligatoria impartida durante el 6º semestre del grado de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universitat de Barcelona. La asignatura permite cerrar el bloque de enseñanza sobre sistemas digitales dentro la Ingeniería ya que, previamente, el alumno debe haber cursado "Diseño Digital Básico" (DDB), "Sistemas Digitales y Estructura de Procesadores" (SDEP) y

"Diseño microelectrónico" (DM), en los semestres 1º, 3º y 5º respectivamente. Aunque no es la continuación de ninguna asignatura troncal, DSSD sí que se basa en conceptos previamente enseñados en dichas asignaturas.

La metodología formativa que se sigue en la asignatura está dividida en un bloque teórico que ocupa el 40% de las clases y un bloque práctico que ocupa el 60% restante. En el bloque teórico, se combinan clases magistrales con debates y presentaciones para fomentar la comprensión y discusión de conceptos avanzados. La parte práctica de la asignatura consiste en 9 sesiones de laboratorio, con una duración de 3 horas por sesión, y estaba dividida de la siguiente manera:

- Un proyecto (implementación de un sistema de comunicación UART) dividido en 4 subproyectos guiados (8 sesiones de laboratorio):
  - Introducción (estudio de un sistema de comunicación)
  - Diseño de un sistema de comunicación propio (transmisor y receptor)
  - Verificación a nivel funcional (test del sistema mediante simulaciones)
  - Implementación física en un sistema real (FPGA)
- Una sesión magistral de síntesis lógica y física
- Un proyecto final individual que el alumno realiza fuera del entorno de prácticas, donde debe demostrar el correcto funcionamiento del sistema de comunicación. El alumnado tenía un mes desde la propuesta del proyecto hasta el día de entrega para realizar el trabajo.

Esta organización muestra limitaciones significativas en cuanto a retención estudiantil. La creciente TA, que en el curso 2014-15 alcanzó los 15 abandonos de 27 alumnos matriculados, evidenció la necesidad de una revisión y adaptación de las estrategias pedagógicas. Este problema, motivado en parte por la percepción de una carga de trabajo excesiva y la complejidad de los proyectos requeridos, ha llevado al equipo docente a intervenir con el fin de mejorar la experiencia educativa y los resultados de aprendizaje de los estudiantes en DSSD.

III. Descripción de las innovaciones docentes

El objetivo principal de las AIDs es el de fidelizar el alumno en la asignatura. Desde la aplicación de la primera AID, hace casi 10 años, se han identificado nuevas problemáticas e incluso se ha tenido que adaptar la asignatura a los retos que trajo la pandemia. Por estos motivos, esta sección presenta dos AIDs de forma separada:

A. Primera acción de innovación docente

El objetivo de esta AID es pasar a un sistema de prácticas integradas donde inicialmente se evaluará el nivel inicial de cada alumno y se le acompañará, a través de las prácticas, durante el resto del curso para alcanzar el nivel final requerido. Con este acompañamiento se pretende evitar que el alumno abandone durante el curso. Para llevarlo a cabo, la parte práctica de la asignatura se estructura de igual forma y se añaden las siguientes acciones:

- Creación de cuestionarios creados para identificar el nivel de cada alumno.
- Creación de material docente extra para dar un soporte mayor al alumnado con un menor nivel inicial.
- Las prácticas continúan centrándose en la implementación de una UART. En esta AID se fomenta la preparación inicial de cada subproyecto en casa mediante cuestionarios obligatorios, y puntuables, que se realizan al empezar la sesión de prácticas.
- Uso de herramientas en línea que permiten el aprendizaje colaborativo, como Wikispaces.
- Proyecto final libre, donde el alumno propone cómo va a demostrar que ha adquirido los conocimientos suficientes.

Aunque, tal y como se presenta en la Fig. 1 en “Resultados”, el objetivo de reducir la TA se consigue, esta acción docente tiene distintas desventajas:

1. Acciones, como el uso de herramientas de aprendizaje colaborativo o realizar cuestionarios antes de cada subproyecto, no tienen ningún éxito, lo que conlleva su desaparición en cursos posteriores.
2. El mayor acompañamiento a alumnos con menor nivel implica una mayor dedicación docente para poder auditar el correcto progreso. Esta acción no siempre puede realizarse en condiciones dado que el número de profesores depende del número de alumnos matriculados en la asignatura, lo que puede significar que no haya suficientes docentes.
3. La organización de las tareas en cada subproyecto es libre, el alumno propone su solución y se organiza según su criterio para lograr el objetivo. Esto suele provocar que el alumnado perciba una mayor carga a la real debido a una organización incorrecta.
4. Cada nuevo subproyecto depende del anterior. Así pues, el error o entrega no correcta de un subproyecto era problemático. Aunque se permitía recuperar las malas entregas, el alumno debía realizar la recuperación a la vez que el nuevo subproyecto, lo que conlleva una carga mayor, estrés y ansiedad para el alumno.
5. Otorgar total libertad al alumnado para escoger el proyecto trajo como resultado proyectos muchos más vistosos y de mayor nivel y, en consecuencia, implicó que el alumno percibiera una mayor carga docente ya que debía invertir un mayor número de horas para alcanzar los objetivos autoimpuestos.

Finalmente, todos estos problemas se acentúan durante la pandemia, con la obligación de realizar las prácticas de forma remota, donde se hace evidente la necesidad de aplicar un cambio al modelo que se presenta a continuación.

B. Segunda acción de innovación docente

Manteniendo el sistema de prácticas integradas, en esta segunda AID se reestructuran las sesiones prácticas para mejorar la experiencia de aprendizaje. Esta reorganización se enfocó en guiar paso a paso a los estudiantes en el diseño de un Maestro de comunicaciones I2C o SPI, estructurando las sesiones de manera independiente y autocontenida. Esta metodología tenía como fin último mejorar la flexibilidad del

curso, evitar que los alumnos se quedaran rezagados y, sobre todo, reducir la percepción de carga de trabajo.

Las sesiones prácticas se organizaron de la siguiente manera:

- *Introducción al flujo de diseño digital*. Se empieza con una breve introducción teórica sobre el proceso de diseño digital, desde la concepción del maestro, con un enfoque inicial en comprender el protocolo I2C o SPI a implementar. Esta etapa se centra en analizar los bloques básicos necesarios para su implementación y su interacción. Se anima a los alumnos a trabajar en pequeños grupos en la concepción inicial de su diseño, incentivando que piensen de manera independiente en la solución del problema propuesto, para posteriormente, poner en común las diferentes opciones que han considerado para el diseño. Llegando a un diseño final consensuado y guiado por el docente.
- *Visión general del flujo de diseño a través de un módulo sencillo*. La segunda práctica está diseñada con el objetivo de repasar todas las herramientas (previamente conocidas por los estudiantes) desde el diseño hasta la verificación, síntesis e implementación en FPGA. Esta sesión sirve para asegurar que todos los alumnos comprendan y puedan utilizar las herramientas adecuadamente, ofreciendo una visión completa del flujo de diseño y síntesis, y homogenizar los conocimientos previos de los alumnos.
- *Enfoque en aspectos específicos del flujo de diseño*. A partir de aquí, cada práctica se centra en un aspecto concreto del flujo, ya sea diseño, verificación lógica, síntesis, verificación post-síntesis, restricciones temporales e implementación. Cada sesión culmina con la elaboración de un pequeño informe a cumplimentar por parte del alumno, donde este refleja los resultados y aprendizajes clave de cada sesión.

Siguiendo esta metodología detallada y estructurada de las sesiones prácticas, el proyecto final pasa a ser un proyecto común para todos, enfocándose en la implementación de un maestro de comunicaciones I2C o SPI dentro de un sistema más complejo: una estación meteorológica.

Para facilitar este proceso, se proporcionan a los estudiantes los módulos necesarios para la construcción del sistema, permitiendo al alumno centrarse en aplicar los conocimientos técnicos y las habilidades de diseño adquiridas a lo largo de las sesiones prácticas. Este enfoque es deliberado, aparte de cumplir con el objetivo de minimizar la percepción de carga de trabajo y homogenizar la dificultad de los proyectos, también consolida la metodología de diseño, y habilidades desarrolladas durante el curso, asegurando que los alumnos posean las competencias necesarias para el diseño y la implementación efectiva de sistemas digitales en contextos reales.

Esta segunda AID está representando un avance significativo, ofreciendo un enfoque más estructurado y detallado en las sesiones prácticas. La guía paso a paso y la estructuración autocontenida de las sesiones permitieron una mejor adaptación al ritmo de aprendizaje de cada estudiante, introduciendo la posibilidad de errar y no quedar-se atrás, reduciendo así la sensación de sobrecarga y frustración. Este enfoque no solo ha conseguido mantener una baja TA, sino que también ha homogeneizado las habilidades y conocimientos de los estudiantes al finalizar la asignatura.

IV. Resultados

Después de casi una década de aplicación de las AID en la asignatura, los profesores tenemos datos suficientes para asegurar que los resultados de la experiencia docente son excepcionales. En la Fig. 1 se presentan las tasas de aprobados (TAPR), en azul, y de abandonos (TA), en naranja. Los datos se representan desde el año 2011 hasta la actualidad, marcando en rojo el momento en que se han aplicado las dos AID. Tal como muestra la Fig. 1, la TA se ha reducido un factor 5 desde el momento de aplicación de las AID, pasando de un 55% de abandono a un 10%. Adicionalmente, el número de aprobados también ha aumentado, pasando de un 45% a casi un 90%.

La aplicación de la primera AID en 2016 trajo mejoras iniciales. Sin embargo, una mirada más detallada sugiere que el análisis basado únicamente en TAPR y TA podría ofrecer una visión sesgada e incompleta de los efectos de las AID. A pesar de las mejoras, los estudiantes continuaron percibiendo una alta carga de trabajo, y algunos optaron por postergar su matriculación en la asignatura para semestres con menor carga académica. Este comportamiento sugiere que las mejoras iniciales, aunque positivas, no abordaron completamente los problemas percibidos por los estudiantes.

Para obtener una comprensión más profunda de los impactos de las AID, se analizaron también datos de encuestas realizadas al finalizar cada curso. Estas encuestas evalúan la satisfacción estudiantil, la valoración de las actividades formativas, la conformidad con el sistema de evaluación y el nivel de exigencia percibido, en una escala de 0 a 10.

En la Fig. 2 y Fig. 3 se presentan los resultados de las encuestas de la asignatura desde el curso 2017 hasta la actualidad. En la Fig. 2 se presentan el grado de satisfacción del alumnado con la asignatura y la valoración de las actividades formativas de la misma. En la Fig. 3 se presentan el grado de satisfacción con el sistema de evaluación de la asignatura y el nivel de exigencia percibido por el alumno. Las figuras se presentan de forma separada para mejorar su visibilidad, dado que hay un claro dato atípico debido a los cambios y adaptaciones de la docencia para lidiar con la pandemia de COVID.

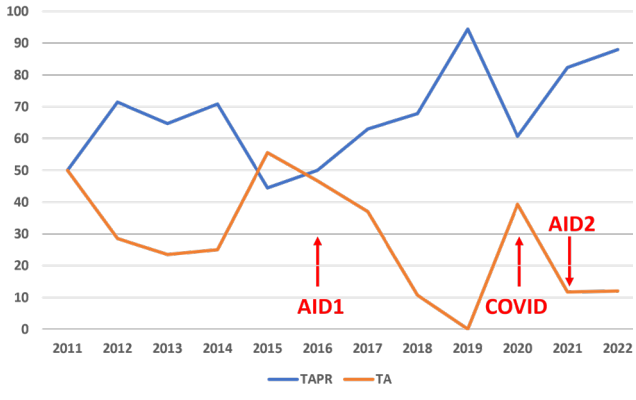


Fig. 1 Tasa de abandono (naranja) y tasa de aprobados (azul) de 2011 a 2022. En rojo se indica cuando se introdujeron las Acciones de Innovación Docente.

En ambas figuras, los resultados muestran una tendencia alcista en todas las métricas, con una notable mejora en la percepción del nivel de exigencia, que aumentó de un valor cercano a 2 a 6.75. Este aumento es una clara indicación del éxito de la segunda AID implementada, que logró equilibrar mejor las expectativas y la realidad de la carga de trabajo.

Por último, un resultado colateral ha sido el aumento de participación en las encuestas durante estos años. Este aumento, de aproximadamente un 10% a más del 40%, subraya la creciente implicación del alumnado y la relevancia de estos resultados. Esta mayor implicación ofrece una base de datos más robusta y representativa, reforzando la validez de las conclusiones extraídas.

V. Conclusiones

Este estudio ilustra el compromiso y la innovación del equipo docente en abordar el desafío del abandono estudiantil en la asignatura DSSD. A lo largo de los últimos años, se han implementado diversas estrategias pedagógicas, cuyos efectos han sido meticulosamente evaluados mediante una serie de métricas. Los resultados demuestran no solo una reducción significativa en la tasa de abandono sino también un incremento en la satisfacción estudiantil, subrayando el éxito de estas intervenciones.

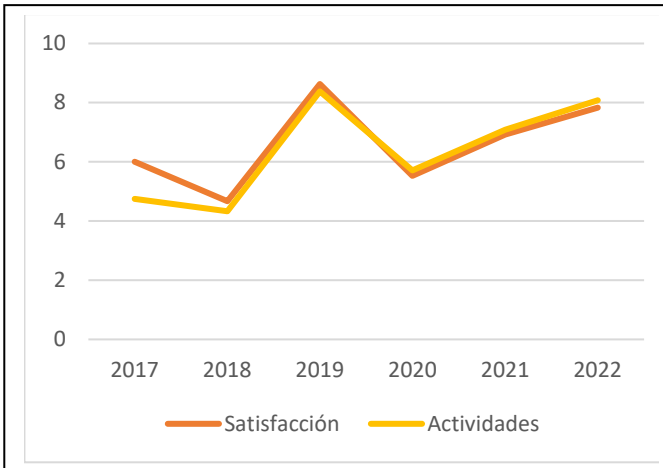


Fig. 2 Valoración por parte del alumnado del grado de satisfacción (naranja) y de la valoración de las actividades formativas (amarillo). Estos resultados provienen de las encuestas realizadas al finalizar el curso.

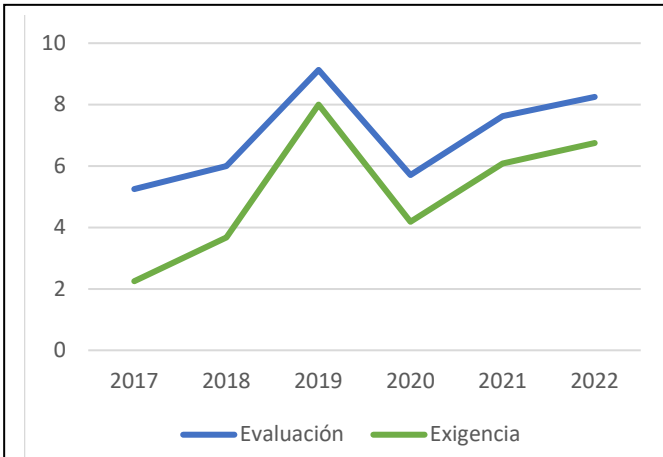


Fig. 3 Valoración por parte del alumnado de la evaluación de la asignatura (azul) y del nivel de exigencia percibido (verde). Estos resultados provienen de las encuestas realizadas al finalizar el curso.

La capacidad del equipo docente para adaptarse, introduciendo nuevas técnicas de enseñanza y descartando aquellas que no generan los resultados esperados, es el elemento más importante del estudio. Esta disposición para la experimentación y el ajuste basado en evidencia ha sido clave para mejorar continuamente la experiencia educativa en DSSD. Destacar que la voluntad de retomar y ajustar el modelo original de enseñanza con las lecciones aprendidas del primer AID, demuestra un enfoque pragmático y centrado en el alumno para la innovación educativa.

Más allá de los logros específicos, este trabajo ofrece experiencias valiosas y prácticas transferibles a otras asignaturas de carácter práctico dentro de las ciencias e ingenierías. La metodología aplicada y las lecciones aprendidas en este proceso proporcionan un modelo replicable para otros equipos docentes enfrentando retos similares de retención estudiantil.

En conclusión, este estudio destaca la importancia de una actitud proactiva y reflexiva hacia la enseñanza, demostrando cómo la adaptación curricular informada y la atención a las métricas relevantes pueden conducir a mejoras sustanciales tanto en el rendimiento académico como en la satisfacción de los estudiantes.

References

[1] A. Najimi, G. Sharifirad, M.M. Amini, S.D. Meftagh,, “Academic failure and students' viewpoint: The influence of individual, internal and external organizational factors,” J Educ Health Promot, vol. 2, PubMed, 2013.

[2] A. Cherif, F. Movahedzadeh, G. Adams, J. Dunning, Why Do Students Fail? Students’ Perspective, The Higher Learning Commission, 2013.

[3] Mª F. Céspedes-López, R. Mora-García, R. Pérez-Sánchez, J. Pérez-Sánchez, “El abandono de los estudios universitarios en enseñanzas técnicas: un caso de estudio” in book: Nuevos retos educativos en la enseñanza superior frente al desafío COVID-19, Ed. Octaedro, 2021.

[4] J. Ellis, B. K. Fosdick, C. Rasmussen, “Women 1.5 Times More Likely to Leave STEM Pipeline after Calculus Compared to Men: Lack of Mathematical Confidence a Potential Culprit” in PLoS One, vol. 11, 2016.

[5] M. Prince, “Does Active Learning Work? A Review of the Research,” in Journal of Engineering Education, vol. 93, Wiley, 2013, pp. 223–231.

[6] D. Lovin & D. Bernardeau-Moreau, “Stress among Students and Difficulty with Time Management: A Study at the University of Galați in Romania,” in Social Sciences, vol. 11. MDPI, 2022.

[7] R. V. Adams & E. Blair, “Impact of Time Management Behaviors on Undergraduate Engineering Students’ Performance,” in SAGE Open, vol. 9, SAGE Journals, 2019.

[8] Y. Yorozu, M. Hirano, K. Oka, and Y. Tagawa, “The Academic Motivation Scale: A measure of intrinsic, extrinsic, and amotivation in education,” in Educational and Psychological Measurement, vol. 52, American Psychological Association, 1992, pp. 1003–1017.

Aplicación de metodologías activas basadas en casos reales - Colaboración Universidad-Empresa

Angel María Andueza Unanua
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Comunicación
Universidad Pública de Navarra
Pamplona, España
angel.andueza@unavarra.es
https://orcid.org/0000-0002-5692-4937

Aitor Urrutia Azcona
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Comunicación
Universidad Pública de Navarra
Pamplona, España
aitor.urrutia@unavarra.es

Maria José Erro Betrán
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Comunicación
Universidad Pública de Navarra
Pamplona, España
mjose.erro@unavarra.es

Carlos Rúiz Zamarreño
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Comunicación
Universidad Pública de Navarra
Pamplona, España
carlos.ruiz@unavarra.es

Daniel Leandro González
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Comunicación
Universidad Pública de Navarra
Pamplona, España
daniel.leandro@unavarra.es

Cesar Elosua Aguado
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Comunicación
Universidad Pública de Navarra
Pamplona, España
cesar.elosua@unavarra.es

Abian Bentor Socorro Leranoz
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Comunicación
Universidad Pública de Navarra
Pamplona, España
ab.socorro@unavarra.es

Javier Goicoechea Fernández
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Comunicación
Universidad Pública de Navarra
Pamplona, España
javier.goico@unavarra.es

***Abstract*— Durante los últimos cursos, las especialidades de electrónica industrial de las titulaciones de Ingeniería Industrial de la Universidad Pública de Navarra (UPNA) han sufrido una pérdida paulatina de estudiantes. Con el objetivo de invertir esta tendencia se ha diseñado un proyecto de innovación docente, basado en la utilización planificada de metodologías activas de aprendizaje en colaboración con empresas navarras referentes en la electrónica industrial. El proyecto persigue, por un lado, afianzar el aprendizaje del alumnado haciendo más atractiva y aplicada la docencia, y por el otro aumentar la visibilidad social de la electrónica mejorando la percepción entre el alumnado de un sector industrial estratégico en la Comunidad Foral de Navarra.**

Keywords—innovación educativa, metodologías activas, colaboración universidad-empresa, electrónica.

I. INTRODUCCIÓN

La Ingeniería Industrial es una disciplina clave en el mundo moderno tecnificado ya que es esencial en la optimización de procesos de producción y logística, en la gestión de la cadena de suministro industrial, y especialmente, en la implementación nuevas tecnologías como la inteligencia artificial, el Internet de las Cosas (IoT) o la fabricación aditiva. La Comunidad Foral de Navarra, es una las regiones de España más industrializadas en sectores estratégicos como la automoción, energías renovables, alimentación o gestión ambiental. En el año 2022 el sector industrial de Navarra aportó al PIB de la comunidad el 31% de su valor, un 10% por encima de la media nacional, empleando a 72.000 personas y con un número de empresas en torno a las 3.300 [1]. El papel de los profesionales de la Ingeniería Industrial es muy relevante en el desarrollo económico y social de la sociedad moderna. Actualmente en Navarra existe una elevada demanda de Ingenieros Industriales de la especialidad Electrónica en empresas de sectores como la automoción, energías renovables, diseño electrónico, vending, etc. En ese contexto, la especialidad de Electrónica Industrial es crítica, al formar a los nuevos ingenieros que deberán afrontar ese proceso de gestión tecnológica en la nueva industria 4.0. El tejido industrial navarro relacionado con la electrónica está en la actualidad muy asentado y cada año demanda un número de ingenieros/as que no es cubierto por los egresados universitarios. Además, la percepción de la Ingeniería Industrial todavía permanece ligada a una visión tradicional y alejada de los nuevos paradigmas demandados por la sociedad tecnificada.

La Universidad Pública de Navarra oferta un Grado en Ingeniería en Tecnologías industriales (GITI) y un Máster Universitario de Ingeniería Industrial (MUII) habilitante, titulaciones donde la formación transversal pasa a ser de especialista a partir del 6º semestre del Grado y el 3º del Máster. La especialidad de electrónica industrial es una de las ofertadas, debido al alto de nivel industrialización de la región. Sin embargo, el nivel aceptación de esta especialidad es bajo en comparación con otras especialidades como ingeniería mecánica o eléctrica. Además, cada curso, la empleabilidad a 2 años entre los alumnos egresados de Máster se acerca al pleno empleo en menos de 6 meses. A esta problemática se suma a la dificultad del tejido empresarial navarro dedicado a la electrónica para contratar ingenieros cualificados, entre otras cosas, debido al bajo número de estudiantes que desarrollan su formación en la especialidad de electrónica en la UPNA.

En los últimos 3 años el número de estudiantes que cursan la especialidad de electrónica en el Grado y que repiten en el Máster es de solo el 26% (7-10 alumnos por curso), lo que supone una fuga de profesionales de alta cualificación para dar respuesta a la demanda social en un sector percibido como estratégico en la actualidad. Si a esto añadimos el riesgo a medio plazo que supone la baja tasa de matriculación en la especialidad del GITI, ha hecho necesario plantear desde la ETSIIIT (Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicación) y la dirección docente de

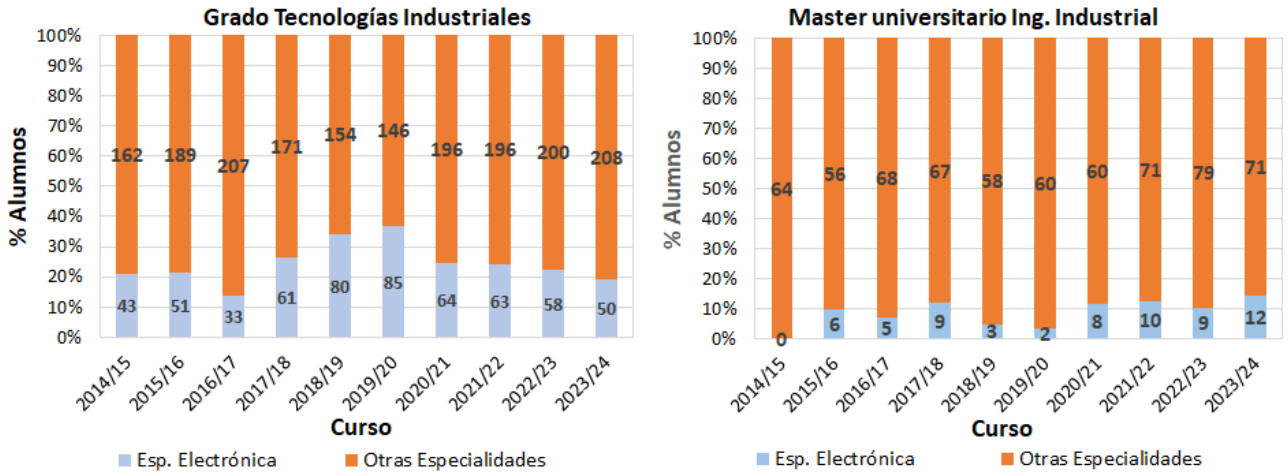


Fig. 1. Evolución del porcentaje total de alumnos de la especialidad de electrónica en el GITI (izquierda) y el MUII (derecha) respecto al número total de estudiantes. Los número en las barras indican los valores absolutos de alumnos/as que cursan la titulación.

las titulaciones, nuevas estrategias que permitan invertir esta tendencia. Además, las empresas del sector industrial-electrónico perciben claramente esta dificultad para encontrar perfiles de alta cualificación y se sumaron a la iniciativa de la ETSIIIT para tratar aumentar el número de egresados. La realidad previamente expuesta está alineada con la evolución de los estudios de ingeniería en España en la última década. Según el informe de Cifras y Datos del Ministerio de Universidades de 2023 [2] la matriculación en titulaciones de Ingeniería y Arquitectura respecto al total ha caído 5.1% en el decenio 2012/2022, siendo este dato aún más significativo en el número de alumnos egresados que cae un 8.71%.

II. El reto de la especialidad de electrónica

Para entender la necesidad de estas estrategias, debemos primero analizar la evolución de la matriculación de las especialidades a lo largo de los últimos cursos. Para ello, en la Fig. 1 se muestra la comparativa entre el alumnado matriculado total y el de la especialidad en el GITI (izquierda) y el MUII (derecha). Como se puede observar, el porcentaje de estudiantes que opta por tomar la vía de la especialidad de electrónica, aunque variable, es minoritaria quedando en la mayoría de los casos en torno al 20%, para el grado y al 10% en el máster. A ello se suma la tendencia descendente que están experimentando las matrículas en los últimos cursos de la especialidad en el Grado, siendo su valor más bajo este curso 2023/2024 con 14.8% y que justifica más aún las iniciativas que en este trabajo se van a detallar. La tendencia en alumnado del Máster parece algo mejor, al haber aumentado desde el curso 2019/20 hasta, un 10% del total de alumnos (de 2 a 12 alumnos/as). Sin embargo, esta evolución es aparente, ya que entre ambas curvas presentadas hay un retardo de al menos 2 cursos académicos, por lo que es de esperar que a partir el del curso 2024/25 el número de alumnos de la especialidad del MUII comience nuevamente a caer.

III. Objetivo del proyecto

A tenor de la situación previamente expuesta, se planteó en 2022 desde la ETSIIIT acciones para revertir la reducción de la matriculación en los últimos 4 cursos (2018/19 a 2021/2022) así como mejorar la docencia impartida, más que probable causa de la pérdida de confianza por parte del alumnado. Desde la coordinación docente de la materia de electrónica industrial se diseñó un proyecto de innovación docente (dentro de la convocatoria interna de la UPNA PINNE-2022) cuyo objetivo es potenciar una formación más aplicada mediante metodologías activas a la formación universitaria, y en el que puedan participar empresas del sector creando actividades basadas en casos prácticos, propuestos y/o participados por las empresas, y que ayuden a acercar la formación técnica a la actividad desarrollada en el mercado laboral del sector electrónico. Además, se persigue que a través de esta estrategia cambie la percepción y la motivación que los alumnos del Grado y Máster tienen de, y por la electrónica, ayudando a mejorar la tasa de matriculación de la especialidad de electrónica y las perspectivas de desarrollo profesional de los estudiantes de Ingeniería Industrial en el sector. Este proyecto puede considerarse una experiencia piloto que, de resultar exitosa, puede aplicarse a otras titulaciones de la UPNA u otras escuelas universitarias de ingeniería.

Así, el proyecto de innovación aquí presentado propone una experiencia docente coordinando doce asignaturas (8 de grado y 4 de máster) de la especialidad de electrónica industrial de ambas titulaciones, que mediante la introducción y desarrollo de metodologías de aprendizaje activo obtenga una formación más aplicada, motivadora, avanzada e interconectada y que incluya el desarrollo de competencias transversales a la vez que ponga al estudiante en el centro del proceso de aprendizaje. Además, combinando esta iniciativa con la colaboración de empresas del sector, se pretende diseñar y aplicar actividades docentes reales y centradas en los aspectos avanzados de la electrónica industrial.

Este es un proyecto de largo recorrido, por lo que se recogerán resultados durante los primeros tres cursos de impartición (23/24, 24/25 y 25/26) y los resultados finales se obtendrán al finalizar el curso 26/27. Entonces, finalizará el Máster el grupo de alumnos que comenzaron 3º del Grado en el curso 23/24, teniendo los resultados totales de evaluación de los estudiantes de la especialidad de electrónica a lo largo de los 4 años de duración del ciclo Grado-Máster. Se pretende elevar el porcentaje de alumnos de las titulaciones de ingeniería industrial de grado (máster) desde el 20% (10%) hasta el 30% (20%), así como favorecer una formación más aplicada y cercana a las necesidades del sector de la electrónica en Navarra. Igualmente, se pretende elevar la tasa de éxito de las asignaturas de la titulación hasta el 90%, y mejorar la valoración media de la docencia impartida hasta valores por encima de 3 sobre 4. Se espera que, tras el

proyecto, cambie la percepción y la motivación qué los alumnos tienen con respecto a la electrónica, favoreciendo un incremento de la tasa de egreso del alumnado de la especialidad acorde a las demandas del mercado laboral en el sector industrial.

IV. DESARROLLO Y PLANIFICACIÓN

El desarrollo del proyecto tiene tres pilares fundamentales sobre los que se sustenta: la coordinación docente de las asignaturas de la especialidad en ambos títulos, el desarrollo e implementación de las actividades docentes activas, y la colaboración con la empresa para el desarrollo de algunas de esas actividades. En los siguientes apartados detallaremos cada una de estos puntos antes de afrontar los resultados que han sido alcanzados hasta ahora. A continuación, se presentarán algunos datos para comprender adecuadamente la situación de partida de la especialidad, las asignaturas y el alumnado participante.

A. Detalles del proyecto

El desarrollo de la formación en electrónica industrial dentro de las titulaciones ofertadas por la UPNA tiene dos vertientes: asignaturas obligatorias a todo el alumnado y asignaturas obligatorias para la especialidad de electrónica industrial. En el caso del GITI, se cursan dos asignaturas (12 ETCS) en el 4º y 5º semestre, sobre fundamentos de electrónica analógica y digital. En el MUII, se cursan dos asignaturas (7.5 ETCS) en el 1er semestre del primer curso sobre instrumentación electrónica y automática. Tal y como se indicó previamente, las titulaciones de ingeniería industrial de la UPNA ofertan una especialización en electrónica industrial en sus últimos semestres, que se corresponde en ambos casos con el 25% del número total de créditos cursados en la titulación (60 ECTS en el grado y 30 en el Máster). La especialidad en el grado está formada por 8 asignaturas obligatorias, 4 en el 6º semestre (3er curso) y otras 4 en el 7º semestre (4º curso). En el 8º semestre (4º curso), el alumnado puede optar por realizar prácticas curriculares en empresa temáticas directamente relacionadas con la especialidad o cursar 18 ETCS de asignaturas optativas. En el caso del Máster, la especialidad se desarrolla íntegramente en el tercer semestre del segundo curso, incluyendo 6 asignaturas y un total de 30 ETCS.

TABLE I. ASIGNATURAS PARTICIPANTES EN EL PROYECTO

Asignatura	Acrónimo	Titulación	Curso	ECTS
Fundamentos de electrónica	FE	GITI	2º	6
Electrónica Industrial	EI	GITI	3º	6
Instrumentación aplicada	IA	GITI	3º	3
Instrumentación	INTR	GITI	3º	6
Sistemas digitales	SD	GITI	3º	6
Sistemas electrónicos analógicos	SEA	GITI	4º	3
Comunicaciones Industriales	CI	GITI	4º	6
Fabricación y ensayo de equipos electrónicos	FEEE	GITI	4º	6
Sistemas electrónicos e instrumentación	SEI	MUII	1º	3
Desarrollo de equipos electrónicos	DEE	MUII	2º	6
Instrumentación avanzada	IAV	MUII	2º	4.5
Dispositivos electrónicos de procesado digital	DEPD	MUII	2º	6

En el proyecto participan un total de 12 asignaturas, 8 corresponden al grado y 4 al máster. Así, En el grado se incluyen 2 asignaturas obligatorias, y 6 asignaturas de la mención. Por otro lado, en el máster participa una asignatura obligatoria, y tres de las seis asignaturas de la mención de electrónica. Estos datos arrojan una participación total del 56% de todas las asignaturas que forman las especialidad de electrónica en ambas titulaciones. El proyecto involucra a 12 profesores del área Tecnología Electrónica del Departamento de IEEC (Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Comunicación). Cuatro de los docentes que imparten clases en las especialidades no consideraron su participación en el proyecto al no estar alineados con los objetivos y/o herramientas empleadas en el mismo. Esto supone un problema de partida al no permitir un desarrollo integral de las acciones planteadas. Sin embargo, se contempla la incorporación paulatina del resto de asignaturas en los próximos años a medida que las acciones implementadas comiencen a generar resultados. Un resumen de las asignaturas participantes en el proyecto puede verse en la Tabla 1.

B. Desarrollo del proyecto. Coordinación

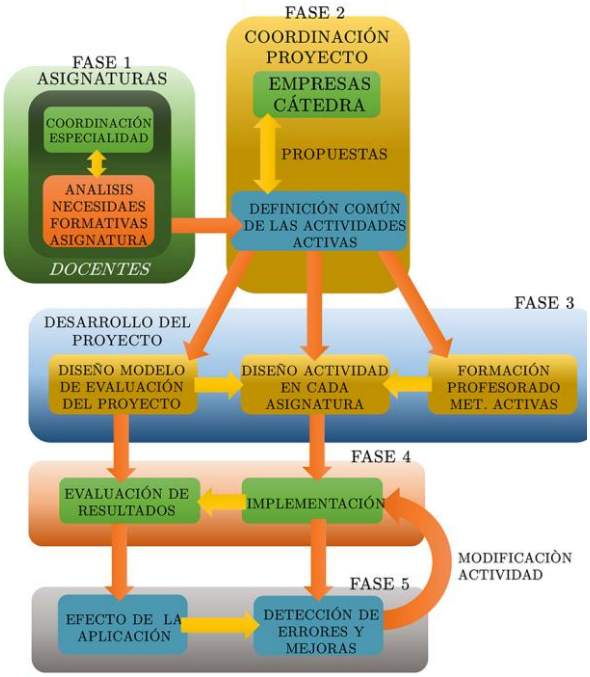


Fig. 2. Diagrama de flujo de las fases en las que está definido el proyecto de innovación desarrollado.

Para llevar a cabo los objetivos del proyecto, se definieron cinco fases a desarrollar, tal y como se muestra en la Fig.2. Las tres primeras fases abarcaron el curso 2022/23, iniciandose la fase 4 en el curso 2023/2024. Las fases 4 y 5 se desarrollarán conjuntamente hasta el curso 2026/2027. A continuación, se describen cada una de estas fases en las que se estructurado el proyecto:

- La ***primera fase*** del proyecto perseguía el análisis individual de las necesidades docentes de las asignaturas del proyecto, así como la coordinación operativa de las mismas dentro de la especialidad para mejorar la eficiencia, evitar duplicidades y propiciar la coherencia interna de los contenidos de cara a los alumnos del grado y máster.
- La ***segunda fase*** buscaba la definición, planificación y coordinación horizontal de las actividades docentes activas que se iban a aplicar en las asignaturas adscritas al proyecto. Inicialmente, se contactó con las empresas de la Cátedra de Tecnología Electrónica de la UPNA para aportar ideas y temáticas que puedan desarrollarse en las actividades formativas innovadoras que iban a ser diseñadas. En este punto los responsables de asignatura, junto con la dirección del proyecto, comenzaron a definir las actividades docentes activas a implementar.
- La ***tercera fase***, es la parte fundamental del proyecto. Esta fase estuvo dividida en tres partes: la primera se correspondió con la formación de los docentes en las metodologías activas de aprendizaje a aplicar; la segunda, se correspondió con el diseño ad-hoc de cada una de las actividades docentes activas a implantar. Por último, y en paralelo con las otras dos partes, desde la dirección del proyecto se coordinó una estrategia para poder evaluar el alcance del proyecto, tanto a nivel de resultados académicos como del impacto del proyecto sobre el alumnado. Para ello se diseñó un esquema de cuestionarios/encuestas modulable y adaptable a cada tipo de asignatura.
- La ***fase cuatro*** corresponde con el estado actual del proyecto en el curso 2023/2024, momento donde se están implantando las actividades docentes diseñadas, y comienzan a tenerse resultados del alcance de los mismos.
- La ***fase cinco*** es la fase de análisis del impacto del proyecto de acuerdo a dos dimensiones: los resultados docentes alcanzados tras su aplicación, y a los errores detectados en su desarrollo inicial. A consecuencia de que el proyecto es una apuesta a medio plazo, esta fase retroalimenta la fase cuatro, permitiendo aplicar las conclusiones alcanzadas en la mejora del desarrollo de los próximos cursos. Con este planteamiento se pretende que el proyecto cree unas bases adecuadas para alcanzar los objetivos perseguidos en el curso 2026/2027.

C. Actividades formativas innovadoras

Las asignaturas y titulaciones que van a participar en el proyecto, tienen características diferenciadas. Debido a ello, se han seleccionado y aplicado aquella/s metodología/s y/o actividades docentes innovadoras que se adapten mejor a cada una según el criterio del docente/s responsable/s. Dado que describir cada una de las actividades desarrolladas es muy extenso, a continuación, se indicarán algunos aspectos generales en términos estadísticos. En la sección V de resultados, se mostrarán algunos ejemplos de las actividades diseñadas.

Como puede verse en la Fig. 3, la distribución de actividades docentes seleccionadas en el proyecto no es muy homogénea, siendo la formación por proyectos (PBL, Project based Learning) [3] la más empleada (66.7%), con hasta 10 de las 12 asignaturas. Este resultado no es extraño, ya que uno de los objetivos este proyecto docente es conseguir una formación en electrónica industrial mucho más aplicada y motivadora que permita a los estudiantes tener una percepción de la electrónica más cercana y real, donde la metodología PBL tiene una aplicación directa. Por otro lado, las metodologías basadas en retos (CBL, Challenge Based Learning) [4] y problemas [5] (PrBL, Problem Based Learning) han sido elegidas por 2 asignaturas, y suponen un 13.3% del total. Finalmente, la metodología de clase invertida (FC, Flipped Classroom) [6] solo se aplica en una de las asignaturas (6.7%) debido a su mayor complejidad de implantación..

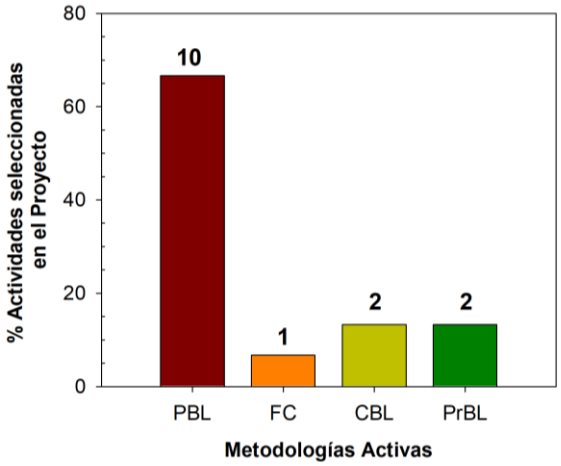


Fig. 3. Distribución porcentual de las metodologías activas implantadas en el proyecto en el curso 2023/2024. El número de cada columna indica las asignaturas que han seleccionado esa metodología. PBL (Proyect Based Learning). FC (Flipped-Classroom).

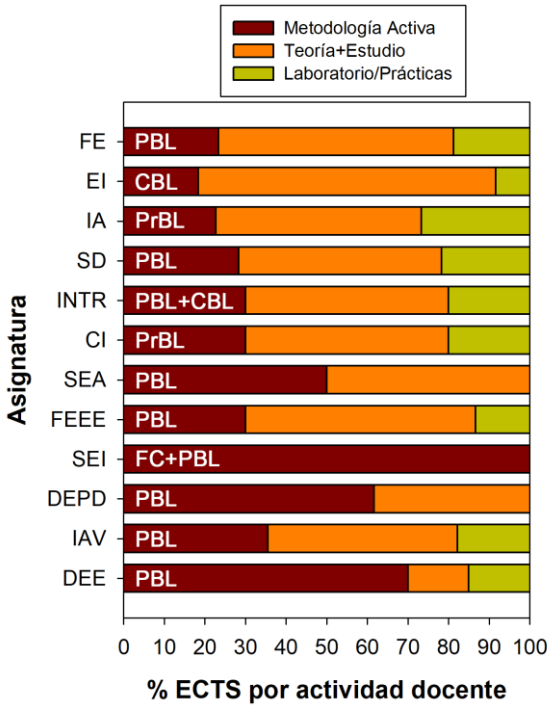


Fig. 4. Distribución porcentual de las actividades desarrolladas en cada asignatura del proyecto normalizada a los ETCS de la asignatura curso 2023/2024. En las barras se muestra el tipo de metodología aplicada en cada asignatura.

Para conocer mejor el impacto de las metodologías usadas sobre el desarrollo de la docencia de cada asignatura, se muestra en la Fig. 4 la distribución del tiempo normalizada por los ETCS, para las actividades basadas en: metodologías activas, clases magistrales/estudio individual y actividades de laboratorio/prácticas. Las asignaturas están ordenadas secuencialmente tal y como se imparten en el GITI y MUII, de forma que cuanto más abajo aparecen, corresponden a cursos más avanzados. Lo primero que puede observarse es que todas las asignaturas dedican al menos un 20% de los ECTS a implementar las actividades y metodologías activas. Esto se refuerza especialmente en el MUII, al que corresponden las últimas cuatro asignaturas, donde el porcentaje medio supera el 60% del tiempo total destinado en las asignaturas. En el GITI las actividades activas introducidas suponen en media un 29% de los ECTS de las asignaturas. Esta distribución se justifica ya que el MUII es un título donde los estudiantes presentan conocimiento de partida mayor que en el GITI, haciendo posible crear actividades centradas en casos reales más complejos y por lo tanto que requieren de una dedicación temporal mayor. Esta distribución está sujeta a los resultados obtenidos en el proyecto, y que serán evaluados al finalizar el curso 2023/2024, posibilitando su modificación y adaptación para la consecución de los objetivos del proyecto y de cada asignatura.

D. Colaboración empresa: aplicación en casos reales

Un aspecto fundamental del proyecto es potenciar la colaboración con empresas del sector de la electrónica para posibilitar que los alumnos se acerquen al entorno profesional en el que en breve espacio de tiempo estarán trabajando. Para favorecer e incentivar la interacción con el tejido empresarial del sector de la electrónica, la ETSIIIT trabajó en la creación de una Cátedra de Electrónica Industrial, formada por la UPNA y 7 empresas de referencia en el sector [7]. Con la Cátedra, firmada en mayo de 2023, se dispone de una plataforma para promover e incentivar la participación entre la empresa y la universidad. Varias empresas de electrónica ubicadas en Navarra como Azkoyen, Falcón, Embeblue, IED Electronics, Jofemar, Electrónica Guinaz y RS, colaborarán con el proyecto para aplicar un aprendizaje basado en actividades y proyectos reales e innovadores, de manera que lo aprendido sea inmediatamente aplicado al proyecto/problema o reto que les ocupe. Durante el curso 2023/2024 las empresas antes indicadas participarán en actividades tales como: proyectos técnicos en asignaturas, visitas a sus instalaciones, seminarios temáticos impartidos por ellas o prácticas curriculares especializadas. En la sección V se podrán ver detalles más concretos de su participación en alguna de las asignaturas.

V. RESULTADOS

A fecha de elaboración de este trabajo, el proyecto está en pleno desarrollo, por lo que aquí mostramos unos primeros resultados de las actividades ya implantadas en el primer semestre del curso 2023/2024. En este apartado se mostrarán dos dimensiones de resultados: cualitativas, relativas a los detalles particulares de las actividades docentes implementadas, y cuantitativas, analizando los resultados obtenidos tanto en los cuestionarios de cada asignatura como de los resultados académicos obtenidos tras su aplicación. Los resultados que se van a presentar se corresponden a las siguientes actividades:

1) *PBL intra-asignatura con participanción de empresa:* proyecto avanzado para acercar la realidad de la electrónica industrial a los estudiantes de MUII.

2) *Escape Digital Room:* proyecto de aprendizaje basado en retos para el aprendizaje de electrónica digital a todos los estudiantes del GITI.

3) *Proyecto de diseño electrónico:* actividad de diseño de sistemas analógicos basada en aprendizaje por proyecto para los alumnos de la especialidad de electrónica del GITI.

A. Proyecto PBL intra-asignaturas en el MUII

Uno de los mayores retos del proyecto de innovación fue el diseño, coordinación y desarrollo de la actividad docente planteada en la especialidad de electrónica del MUII (2º curso). Se diseñó un proyecto multidisciplinar colaborativo entre las 3 asignaturas participantes del máster. Esta actividad buscaba desarrollar un proyecto con un alcance mayor que el que una sola asignatura puede lograr, de forma que el alumnado percibiera la interrelación entre las materias de la especialidad y su conexión con la realidad del mercado laboral. La actividad propuesta estuvo basada en una metodología PBL, profundizando en aspectos de electrónica avanzada, instrumentación, sistemas programables (DSP's), y gestión de proyectos electrónicos. La actividad tenía como objetivo que el alumnado desarrollara un producto electrónico funcional que reprodujera el funcionamiento de un robot autónomo como los usados en aplicaciones industriales de logística y automatización. Esta actividad se diseñó junto con la empresa IED Electrónics, que fue la que propuso la temática del proyecto y financió parte del material empleado en el proyecto (vehículos).

Tal y como se ha comentado previamente, bajo una metodología de aprendizaje por proyectos, el alumnado, divido en grupos de 3 personas (con un total de 12 alumnos), debía diseñar e implementar un vehículo eléctrico capaz de desplazarse de forma autónoma o semiautónoma sobre un circuito balizado en base a las condiciones de la planta (ver Fig. 5). Para poder dar respuesta al reto, los estudiantes primero debían escoger un vehículo entre los propuestos por IED Electrónics. Posteriormente, debían seleccionar e integrar los sensores para poder tener conocimiento del entorno en el que se iban mover (sensores de RF, IR, color, ópticos, cámaras, etc.), programar el controlador del motor del vehículo, el DSP que gestionara la visión artificial, y finalmente, integrar el conjunto siguiendo las normativas relativas a los sistemas y diseños electrónicos. El resultado sería un vehículo eléctrico, funcional y capaz de operar de manera autónoma.

Un aspecto clave para que el proyecto propuesto llegara a buen puerto estaba en la coordinación inter-asignatura, en especial en la gestión ordenada del desarrollo de la docencia. Para lograr un avance del proyecto de acuerdo a los conocimientos que los alumnos van adquiriendo en cada asignatura se acordó que una de las asignaturas (Desarrollo de Equipos Electrónicos, DEE) asumiera el peso principal del proyecto, con el apoyo del resto de las asignaturas en los apartados específicos de sensórica (Instrumentación avanzada, IAV) y programación de DSP's (Dispositivos electrónicos de procesado digital, DEPD). Las fases iniciales del proyecto se dedicarían a la selección del vehículo y de los componentes empleados por cada grupo. Esto permitiría avanzar en los aspectos necesarios del resto de asignaturas para poder abordar las fases posteriores del proyecto

dedicadas a integrar la sensórica, el control de la movilidad del vehículo, y la visión artificial usando el microcontrolador electrónico (DSP).

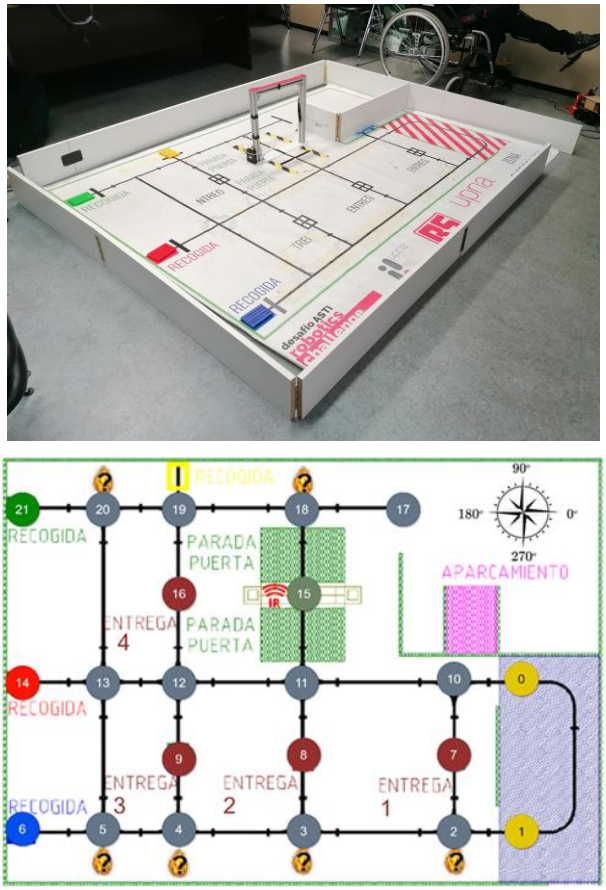


Fig. 5. Imagen y esquema de la planta de pruebas empleada en el desarrollo de la actividad.

El proyecto se desarrolló entre los meses de septiembre y enero del curso 2023/2024. En la Figura 6 puede observarse los resultados de los vehículos desarrollados por los participantes en el proyecto. Durante la última sesión del semestre, y con la presencia y participación de un responsable de la empresa IED Electrónics, se procedió a presentar y evaluar los resultados del proyecto desarrollado: aquellos aspectos relativos a objetivos parciales fijados en cada asignatura como la visión artificial (DEPD), la instrumentación (IAV) y la gestión del proyecto (DEE), y los globales relativos al funcionamiento del vehículo en la planta de prueba (ver Fig. 5). Cada vehículo debía orientarse por la planta usando las líneas, recoger los pales de diferente color (rojo, verde y azul) y depositarlos en su correspondiente posición de entrega. Después el vehículo debía ser capaz de activar la puerta, atravesarla y finalmente llegar y estacionar en la zona de aparcamiento. Algunos vídeos del funcionamiento de los vehículos en la planta están disponibles para ser consultados en Youtube en la referencia [8]. Además, un ejemplo del desarrollo completo de uno de los grupos ha sido publicado en la Comunidad DesignSpark y puede ser también consultado [9].

Una vez finalizada e implantada la actividad se ha procedido a analizar el impacto de la misma, así como todos los aspectos mejorables que han surgido tras su aplicación. Para ello, se ha recibido *feedback* de la experiencia de los estudiantes con respecto a la actividad, a través de las plataformas de evaluación docente, así como de sus comentarios críticos en sus informes finales de proyecto. El estudiantado ha valorado muy positivamente la actividad, hacienda especial hincapié en aspectos como: favorecer el aprendizaje más avanzado e interesante, posibilitar la creatividad a la hora de trabajar, mejorar su conocimiento en electrónica y comunicaciones y el acercamiento del alumnado al entorno laboral. Este último aspecto es significativo ya que los alumnos han valorado el proyecto como un ejercicio avanzado de aprendizaje, próximo a su futuro desempeño profesional. Igualmente han valorado el proyecto como una oportunidad de crecimiento personal resultando el trabajo muy enriquecedor y motivador. Sin embargo, también han existido aspectos mejorables que han sido transmitidos desde el alumnado: la coordinación entre las asignaturas del proyecto, la definición inicial del proyecto, y el tiempo empleado en su realización, que ha superado la planificación inicial.

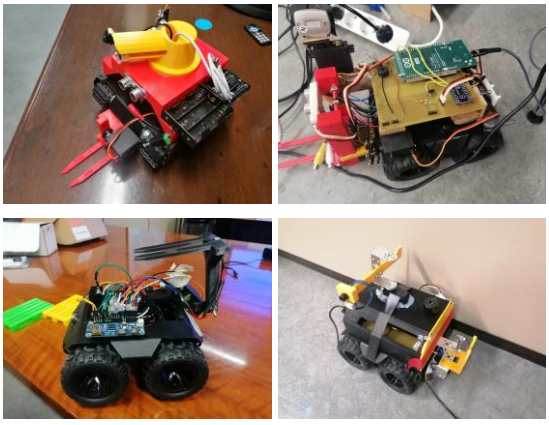


Fig. 6. Imágenes de los vehículos desarrollados en el proyecto.

En términos de la evaluación académica, los resultados académicos del estudiantado han sido simulares a cursos anteriores en las tres asignaturas, si bien, la evaluación docente de los profesores responsables ha sido algo peor. Los resultados expuestos muestran que la actividad es acertada para favorecer el aprendizaje profundo y avanzado de los estudiantes en electrónica, pero hay que trabajar en mejorar los aspectos negativos surgidos del primer año de implantación del proyecto, especialmente los contratiempos que no fueron previstos inicialmente y que han dificultado su desarrollo. Tal y como se definieron en la Fase 4 y 5 del proyecto, se estudiarán estos resultados para mejorar la coordinación inter-asignatura y el seguimiento del proyecto para el curso 2024/2025, poniendo el foco en una mejor planificación que sea capaz de solventar los problemas experimentados durante este curso.

B. Escape Digital Room

Otra de las actividades docentes desarrolladas en el marco del proyecto presentado, es el desarrollo de las prácticas de la asignatura obligatoria Electrónica Industrial (EI) de 3º del GITI, mediante la implantación de una metodología de aprendizaje basada en retos [10]. Mediante el proyecto denominado Escape Digital Room se elaboran tres retos y ejercicios de manera modular que el alumnado debe ir resolviendo para la creación de un diseño final en software Quartus y su demostración aplicada en un dispositivo FPGA. Cada módulo (ver Fig. 7) contiene ejercicios y problemas de

un capítulo de la asignatura de manera que se abarcan los conceptos y contenidos más significativos.

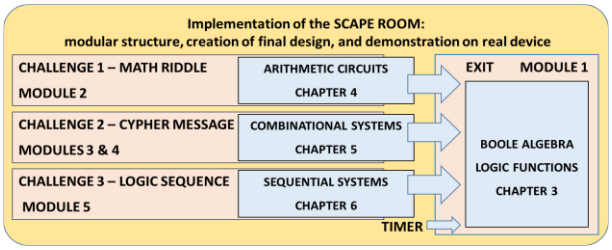


Fig. 7. Estructura de la actividadd *Escape Digital Room*

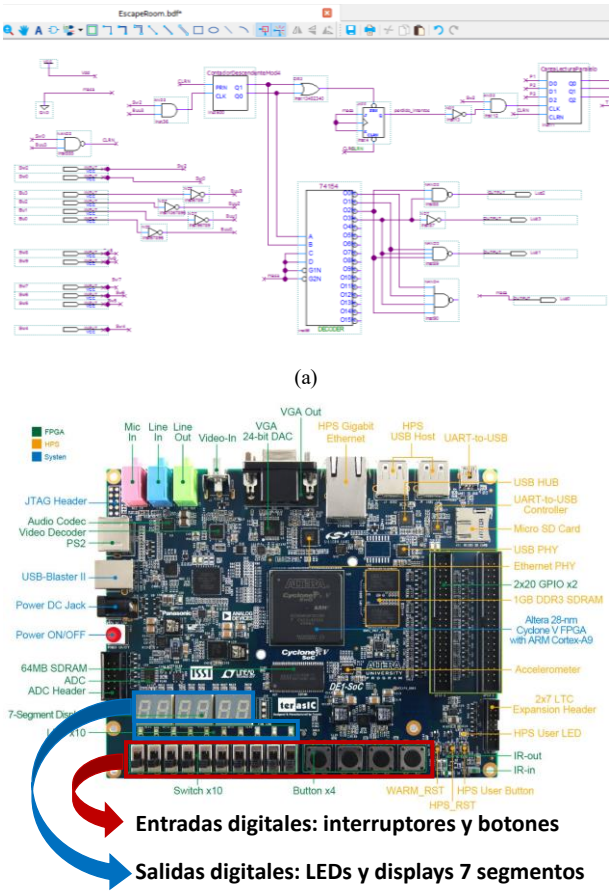


Fig. 8. (a) Imagen de la herramienta de simulación de circuitos lógicos Quartus usada en la asignatura. (a) Kit de desarrollo Terasic DE1-SoC Cuclone usado en la actividad.

Los retos tienen una doble funcionalidad: que el alumnado los resuelva, y que a su vez sea el diseñador de los mismos dando las directrices y normas para que los futuros participantes del escape room puedan introducir sus respuestas y superarlos. La resolución de los retos y por tanto la realización de los módulos y su interconexión permiten la creación de un diseño o sistema final que deberá ser dibujado y simulado mediante la herramienta de software Quartus (ver Fig.8 (a)). Posteriormente el diseño es volcado a una tarjeta FPGA SoC DE1 de Terasic (ver Fig.8(b)) para comprobar y demostrar su correcto funcionamiento.

La evaluación del proyecto se realizó mediante ítems incluidos en cada módulo y en una exposición y demostración final del escape room interactuando con las entradas y salidas de la tarjeta FPGA. Por último, se permite la participación e intercambio de los juegos entre el alumnado para favorecer el trabajo en equipo y la profundización de los conocimientos.

Para conocer el impacto que esta actividad tuvo en el alumnado se analizaron los resultados académicos y se hicieron dos encuestas, una a principio y otra a final de curso. La implantación del proyecto Escape Digital Room ha sido muy positiva en términos de resultados, ya que se han obteniendo unas calificaciones finales de las prácticas con un aumento de 0.6 puntos sobre 10 (curso 2023/2024) en comparación con el promedio de los tres cursos anteriores. Además, el 57% de los estudiantes preguntados en la encuesta final han valorado la actividad del Escape Digital Room como lo más positivo o destacable de la asignatura, y que la actividad ha ayudado que el 87 % hayan mejorado su opinión sobre la electrónica. Estos resultados, están muy bien alineados con los objetivos del proyecto, ya que han sido capaces de mejorar el aprendizaje del alumnado a la vez que mejorar la percepción de estos sobre la electrónica.

C. Proyecto de diseño electrónico

La asignatura Sistemas Electrónicos Analógicos (SEA) se imparte en el séptimo semestre del GITI, en la mención de Electrónica Industrial. Es, por tanto, una asignatura que cursa el alumnado próximo a su graduación y a su inserción en el mundo laboral. Por ello, se considera de gran importancia en esta asignatura incidir en la adquisición de las competencias van a ejercer en su futuro desarrollo profesional. En consecuencia, se decidió desarrollar una actividad docente activa en la parte práctica de la asignatura (un 50% de la misma), que se dedicaría a la realización de un proyecto de diseño electrónico que además serviría de hilo conductor a la teoría y ejercicios explicados en el aula. Los alumnos, divididos en grupos de tres componentes, debían diseñar, simular, construir y depurar un afinador electrónico de guitarra con un desarrollo modular que emplea los bloques más habituales de la electrónica analógica. Los detalles de la implementación de este enfoque PBL pueden leerse en [11].

Para intentar analizar el impacto del nuevo diseño de la asignatura, así como la adhesión del alumnado a la asignatura y la mención de electrónica, se cuenta con el resultado de una encuesta, una escala de Likert de acuerdo con cinco posibles respuestas, que fue completada por casi el 90% de los estudiantes matriculados. Algunas de las preguntas, las más relacionadas con los objetivos del proyecto de innovación aquí presentados, y sus resultados se muestran en la Tabla II (el cuestionario completo y sus resultados pueden consultarse en [11]). Como puede comprobarse, la introducción de esta nueva actividad formativa ha sido bien recibida por el alumnado, que considera que le ayuda a mejorar su preparación para desenvolverse en otros contextos, y se ha conseguido mejorar su percepción sobre la electrónica y la especialidad del grado, uno de los objetivos claves de lo aquí descrito.

Cabe también destacar que casi todos los comentarios positivos recibidos en las respuestas libres de la encuesta son precisamente sobre la introducción del proyecto. También de esas respuestas, se intuyen cuáles fueron las dificultades que esta nueva metodología supuso: el tiempo empleado en el proyecto puede llegar parecerles excesivo y tienen dudas sobre si compensa reducir las actividades más tradicionales; así los alumnos echan de menos la resolución de ejercicios convencionales e incluso explicaciones teóricas, sobre todo porque les inquieta la evaluación con el examen final. Esta

información avala la aplicación de la actividad, y permite plantearse cambios para mejorar el desarrollo del proyecto tal y como se ha planteado en las fases 4 y 5 del proyecto aquí presentado.

TABLE II. RESULTADOS DE LA ENCUESTA FINAL ASIGNATURA

Pregunta	Media	Desv. Estandar
El aprendizaje mediante el proyecto me pareció una mejor alternativa a solo la clase presencial.	4.24	0.76
Desarrollar un proyecto aportó más a mi aprendizaje que las habituales prácticas guiadas de laboratorio	4.04	0.96
El proyecto permitió aprender y contextualizar el contenido de la asignatura	4.08	0.93
Realizar el proyecto y otras actividades en grupo me resultó más estimulante y provechoso que el estudio individual	4.24	0.71
El proyecto me supuso un estímulo para practicar habilidades que me permitan adaptarme a situaciones nuevas e inesperadas	3.96	0.87
La asignatura ha contribuido a mejorar mi percepción de la electrónica y la especialidad	3.70	0.78

Además de las opiniones de los estudiantes, es interesante analizar los resultados académicos obtenidos. Si bien, ya en años anteriores el % de alumnos presentados es alto, ha aumentado este curso, lo que puede deberse al hecho de que las horas y esfuerzo dedicados al proyecto les haga sentirse más involucrados con la materia y evite el abandono de la misma. Los resultados son mejores también, con un aumento claro del número de alumnos que superan la asignatura [11].

VI. CONCLUSIONES

El proyecto de innovación educativa presentado muestra el diseño y desarrollo de una nueva estrategia de formación para aplicar en la especialidad de electrónica en el grado y máster de Ingeniería Industrial de la UPNA, mediante metodologías activas de aprendizaje y una interrelación más estrecha con el sector industrial. El proyecto ha sido planificado e implantado en los cursos 2022/2023 y 2023/2024, respectivamente, siendo el curso 2026/2027 donde se conocerá el impacto real sobre la primera promoción formada con las iniciativas desarrolladas en el marco del proyecto. El proyecto ha desarrollado una estrategia fundamentada en la elaboración de actividades activas adaptadas a los niveles formativos y objetivos de aprendizaje de cada asignatura. Además, se han creado nuevas actividades docentes que permiten la participación e interacción con empresas del sector, que favorece un aprendizaje más aplicado y una mejora en la percepción que se tiene de la electrónica industrial. Los resultados derivados de la implantación del proyecto en las asignaturas del semestre de otoño del curso 2023/2024 muestran un impacto positivo en el aprendizaje alcanzado y la percepción que el alumnado tiene de la especialidad, si bien será necesario aplicar mejoras que favorezcan una mejor coordinación y planificación de las actividades desarrolladas. A corto plazo, se espera elevar el porcentaje de alumnos de las titulaciones de Ingeniería Industrial de grado (máster) que eligen especializarse en el área de electrónica desde el 20% (10%) hasta el 30% (20%), así como favorecer una formación más aplicada, avanzada y cercana a las necesidades del sector de la electrónica en Navarra.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en esta comunicación se enmarca en la convocatoria de los proyectos de innovación educativa PINNE 2022 de la Universidad Pública de Navarra.

REFERENCIAS

[1] G. de Navarra, “Plan industrial de Navarra 2025,” www.navarra.es, 2023. https://www.navarra.es/es/-/nota-prensa/el-gobierno-aprueba-el-plan-industrial-de-navarra-2025

[2] Ministerio de Universidades, “Datos y cifras del Sistema Univesitario Español. Publicación 2022-2023,” Datos y cifras, pp. 1–182, 2023, [Online]. Available: http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/cancer

[3] D. P. Morales, E. Castillo, L. Parrilla, A. Garcia, and A. Ótin, “Towards Project-Based Learning applied to the Electronic Engineering Studies,” 2015 Conf. Des. Circuits Integr. Syst. DCIS 2015, 2016.

[4] [D. López-Fernández, P. Salgado Sánchez, J. Fernández, I. Tinao, and V. Lapuerta, “Challenge-Based Learning in Aerospace Engineering Education: The ESA Concurrent Engineering Challenge at the Technical University of Madrid,” Acta Astronaut., vol. 171, no. December 2019, pp. 369–377, 2020.

[5] Akiyama Koji, “Problem-based Learning Style IoT System Education Method by Student’s Self-construction of Prototype System | Semantic Scholar,” Int. J. Internet Things 2018, vol. 7, no. 2, pp. 30–36, 2018.

[6] [6] R. Sanchez-Muñoz, M. Carrió, G. Rodríguez, N. Pérez, and E. Moyano, “A hybrid strategy to develop real-life competences combining flipped classroom, jigsaw method and project-based learning.,” J. Biol. Educ., vol. 00, no. 00, pp. 1–12, 2020, doi: 10.1080/00219266.2020.1858928.

[7] “Cátedra de Tecnología Electrónica.” https://www.unavarra.es/catedra-tecnologia-electronica/

[8] A. Andueza, “Proyecto innovación docente inter-asignatura para el diseño de un vehículo autónomo. 2o MUII. UPNA,” Youtube, 2024. https://youtu.be/lm0EIjkkJ-I

[9] M. Legaz, Asier; Colosev, Vadim; Álvarez, “Meet WALL·E! An AGV Robot For Logistic Purpose,” DesignSpark Community, 2024. https://www.rs-online.com/designspark/content-preview/article/30356?lang=en (accessed Mar. 13, 2024).

[10] A. Urrutia, L. Ruete, D. López, A. Andueza, and C. Elosua, “Proyecto Escape Digital Room: implementación en asignaturas de electrónica digital,” enviado al XVI International Conference of Technology, Learning and Teaching of Electronics. Malaga, 2024.

[11] L. Escribano, S. Tainta, and M. Erro, “Analog electronics projects to encourage active learning,” Submitted to XVI International Conference of Technology, Learning and Teaching of Electronics. Malaga, 2024.

Experiencias de investigación formativa como factor diferencial en egresados de Ingeniería

Mónica Ayde Vallejo Velásquez
Universidad Nacional de Colombia
Sede Medellín, Facultad de Minas,
Departamento de Energía Eléctrica y Automática.
Medellìn, Colombia.
https://orcid.org/0000-0002-5958-1490

Freddy Bolaños Martínez
Universidad Nacional de Colombia
Sede Medellín, Facultad de Minas,
Departamento de Energía Eléctrica y Automática.
Medellìn, Colombia.
https://orcid.org/0000-0002-3123-5481

Eliana Isabel Arango Zuluaga
Universidad Nacional de Colombia
Sede Medellín, Facultad de Minas,
Departamento de Energía Eléctrica y Automática.
Medellìn, Colombia.
https://orcid.org/0000-0002-0947-3694

Abstract*— La Práctica Académica Especial (PAE), es una apuesta educativa de la Universidad Nacional de Colombia que posibilita la participación de los estudiantes en actividades de investigación formativa, proyectos y organización de eventos. En este trabajo se analiza y reflexiona acerca del impacto de esta estrategia articulada a las experiencias de investigación formativa propuestas desde el Semillero de Investigación en Instrumentación, Control y Robótica – SInCRo del Departamento de Energía Eléctrica y Automática de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, como un diferenciador clave y motivador en la continuación de actividades formales de investigación, o estudios a nivel de maestría y/o doctorado. Para validar esta hipótesis se aplica una encuesta a los egresados y egresadas de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería de Control vinculados a SInCRo en el periodo comprendido entre 2013 y 2021

Keywords*— Investigación formativa, formación integral, semillero de investigación, estudios de posgrado.

I. INTRODUCCIÓN

La Universidad Nacional de Colombia tiene definidas tres componentes para sus programas de formación a nivel de pregrado: Fundamentación, Disciplinar y Libre Elección. La Componente de Fundamentación hace referencia a aquellos saberes y conocimientos básicos de la carrera, que a menudo son comunes a varias disciplinas, y que deben cursarse al principio del proceso de formación. La Componente Disciplinar hace referencia a asignaturas y saberes propios de cada disciplina, y que definen la identidad del programa curricular. La Componente de Libre Elección, como su nombre lo indica, representa asignaturas y saberes que el estudiante decide adquirir por voluntad propia, generalmente como complemento a las otras dos componentes de formación.

Al igual que en muchos otros países, las instituciones de educación superior usan el Crédito Académico, o simplemente Crédito, para cuantificar la cantidad de tiempo que los estudiantes deben dedicar a las diferentes asignaturas y actividades académicas que requieren en su formación. En Colombia, un crédito educativo equivale a 48 horas de trabajo académico e independiente por parte del estudiante y depende de la relación de carga académica establecida por cada Universidad [1]. Para las tres componentes de la formación de pregrado definidas por la Universidad Nacional de Colombia, la Componente de Libre Elección representa el 20 % del total de créditos académicos, de los cuales los estudiantes pueden inscribir hasta un 5 % de créditos, usando la figura de Prácticas Académicas Especiales o PAEs [2].

Los PAEs se pueden ver como asignaturas corrientes del proceso de formación (con una dedicación específica, cuantificada por la cantidad de créditos asociada), pero que corresponden a proyectos cuyas actividades están orientadas a la formación complementaria de los estudiantes, tales como: investigation formativa, desarrollo de proyectos, actividades académico-administrativas, actividades culturales, etc. El espíritu de los PAEs es ofrecer la oportunidad a los estudiantes de participar de experiencias, habilidades y saberes más allá de las asignaturas convencionales que se ofrecen en el programa académico. El programa de cada asignatura PAE se define entre el profesor y el estudiante, desde la selección del tema de interés, la formulación de los objetivos que orientan el trabajo, las actividades que deberá desarrollar el estudiante para dar cumplimiento a los objetivos y los productos parciales y finales que deberá entregar como parte del seguimiento y la evaluación de la asignatura. Esta construcción participativa que involucra a los estudiantes en todas las etapas, desde la definición hasta la evaluación, contribuye a asegurar un mayor compromiso y motivación por parte de los estudiantes y en consecuencia lograr un trabajo de mayor calidad.

A medida que la investigación ha cobrado mayor relevancia en el quehacer de las universidades, la investigación formativa se presenta como una estrategia pedagógica que, a partir de la indagación, problematización contextualizada y la reflexión, configura un espacio para el aprendizaje basado en problemas que promueve la apropiación y el desarrollo de conocimiento, competencias y habilidades a través de la interdisciplinariedad y el diálogo de saberes [3][4]. En la investigación formativa el quehacer didáctico transita por el aprender a aprender, al promover la participación activa de los sujetos educativos en la aprehensión y reconstrucción de los conocimientos científicos [5][6].

En Colombia, el Consejo Nacional de Acreditación, CNA a partir de la segunda mitad de la década del 90 define la investigación formativa como un tipo de investigación que se hace entre estudiantes y docentes en el proceso de desarrollo del currículo de un programa [4]. En este contexto, los semilleros de investigación se presentan como una estrategia fundamental para la formación investigativa, que permite a los estudiantes participar activamente en el proceso de investigación y generación de conocimiento a través de la práctica y la resolución de problemas [4][7].

En la Universidad Nacional de Colombia a partir del Acuerdo 033 de 2007 del Consejo Superior Universitario, se reconoce que la formación para la investigación reviste un papel fundamental como instrumento de crecimiento académico, intelectual, profesional y humano del estudiantado [8], pero solo a partir de la Resolución de Rectoría 670 de 2020 se reconoce la importancia de los Semilleros de Investigación los cuales, al igual que los grupos de investigación, resultan imprescindibles para incentivar en los

estudiantes la construcción autónoma de conocimiento académico [9].

El Semillero de Instrumentación, Control y Robótica – SInCRo liderado por tres profesores del Departamento de Energía Eléctrica y Automática de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, surge en el 2013 y se formaliza ante el Sistema de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia (SIUN) en el 2020. En los primeros años del semillero, la vinculación de los estudiantes se daba principalmente a través de la inscripción del Trabajo de Grado (TDG) en modalidad de proyecto de investigación, sin embargo, el número de estos TDG se ha reducido significativamente debido a que en los últimos años los estudiantes prefieren llevar a cabo prácticas en empresas con el propósito de poder tener mejores oportunidades en el mercado laboral al egresar con experiencia previa. Este cambio de contexto conllevó a fomentar el uso del PAE como estrategia de formación en la investigación. Aprovechando la posibilidad de que los estudiantes podían matricular parte de sus créditos de la Componente de Libre Elección en PAEs, en SInCRo, se estableció la inscripción de la Práctica Académica Especial (PAE) como forma principal de vinculación de los estudiantes cada semestre. Este lineamiento ha contribuido no solo a la consolidación del Semillero, también ha permitido garantizar su sostenibilidad en el tiempo impactando en la formación integral de varias generaciones de estudiantes de los programas de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería de Control que han estado relacionados con SInCRo.

En este artículo se analiza la hipótesis que sugiere que la participación de los estudiantes de pregrado en proyectos de investigación formativa por medio de PAEs, alienta a dichos estudiantes a continuar con actividades formales de investigación, concretamente, con estudios a nivel de maestría y/o doctorado, así como con la participación en actividades tales como proyectos de investigación, y la generación de productos académicos tales como artículos, ponencias, pósters y demás publicaciones académicas. Los autores consideramos importante validar estas premisas, por medio de las apreciaciones de los propios egresados y egresadas que en su momento participaron en los proyectos.

II. Resultados

El principal insumo para la captación y análisis de resultados fue una encuesta de percepción de 20 preguntas, aplicada a través de un formulario electrónico (Google Forms) a un conjunto de egresados y egresadas de los programas de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería de Control, de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. La encuesta fue contestada por un total de treinta (30) egresados, cuya fecha de grado varía entre marzo de 2015 y abril de 2023, además 26.67% de los egresados que llenaron la encuesta se identifican con el género femenino, mientras que el 73.33% restante se identifican con el género masculino. La totalidad de encuestados participó en el Semillero de Instrumentación, Control y Robótica (SInCRo) de la Facultad de Minas, de la Universidad.

Como ya se ha mencionado, en el semillero SinCRo, se ha madurado una metodología para la gestión de proyectos de investigación con estudiantes de pregrado, aprovechando la figura de las Prácticas Académicas Especiales (PAEs), que ofrece la universidad. La Fig, 1 muestra la distribución de PAEs en los que participó cada uno de los egresados, de acuerdo a la encuesta mencionada.

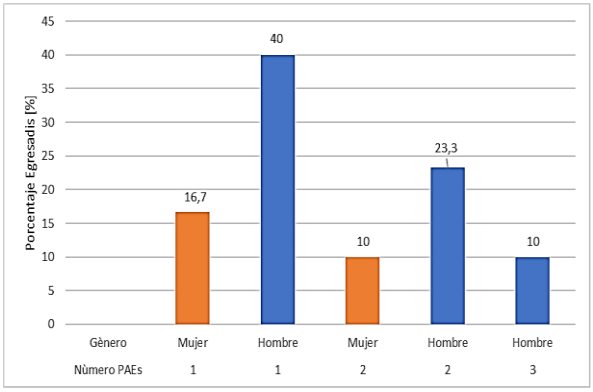


Fig. 1. Distribución porcentual de la cantidad de PAEs desarrollados por los egresados de discriminado por género.

Como puede verse en la Fig 1 56.7% de los egresados desarrollaron como mínimo un PAE en el transcurso de su formación de pregrado, del cual el 16,7% corresponde al género femenino y el 40% restante el género masculino. El 33.3 % de los egresados realizaron dos PAEs, de estos, el 10% corresponde al género femenino y el 23.3% restante el género masculino; y finalmente un 10% correspondiente solo a egresados del género masculino, llegaron a realizar tres PAEs.

Ante la pregunta de si la experiencia con los PAEs en el marco del semillero, motivó a los estudiantes a adelantar una trayectoria en investigación, la Fig. 2 muestra la distribución porcentual de egresados que decidieron adelantar estudios de posgrado en maestría o doctorado.

De la Fig. 2 se puede observar que un 36.7 % de los egresados que participó en el semillero SInCRo, decidió emprender estudios de maestría, distribuido en 10 % y 26.7% para mujeres y hombres respectivamente. Para el caso de estudios de doctorado, de los 5 egresados correspondientes al 13.3% que han adelantado este tipo de formación, solo se reporta 1 mujer. Los encuestados reportan que dichos estudios de posgrado han tenido lugar en instituciones de alta calidad, de carácter nacional e internacional. De acuerdo en lo observado en las Fig. 1 y Fig. 2 se puede afirmar que independientemente del género el 50% de los egresados y egresadas han cursado estudios de posgrado, lo cual es una cifra significativa.

Por supuesto, la información de la Fig. 2 no necesariamente está correlacionada con el hecho de haber desarrollado PAEs en el semillero, por lo que una pregunta de la encuesta atañe directamente a esta cuestión: 90 % de los egresados considera que el haber desarrollado PAEs en el marco del semillero SinCRo, sirvió de motivación para emprender estudios de maestría o doctorado.

Entre las razones que los encuestados aducen para afirmar que el desarrollo de PAEs los anima a adelantar estudios de posgrado, se pueden inferir de algunas de las respuestas abiertas recogidas:

- El semillero SINCRO es un espacio dónde se puede dar lugar a investigaciones de un nivel de posgrado.
- La investigación despierta muchas preguntas que resolver y esto inspira en avanzar los estudios.
- El desarrollo del PAE en el semillero SINCRO es una excelente forma de iniciarse en la investigación.

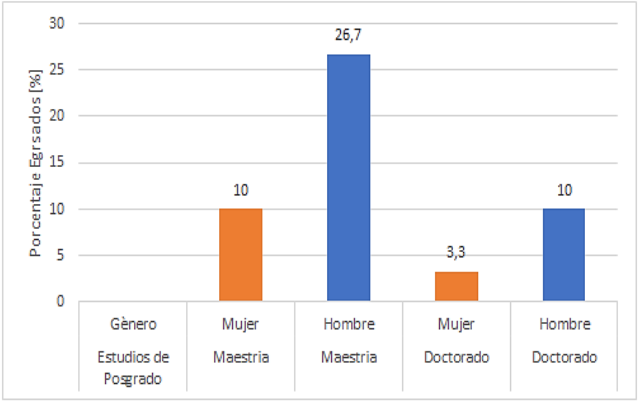


Fig. 2. Distribución porcentual de la cantidad de PAEs desarrollados por los egresados de discriminado por género.

- Los PAEs fomentan el deseo por adquirir nuevos conocimientos de manera adicional, generar entregables palpables para materializa ese conocimiento adquirido.
- A través de los PAEs y la vinculación al semillero SINCRO, se entiende mucho mejor el enfoque de investigación, trabajo autónomo y con sentido que se desarrolla en los posgrados.
- El desarrollo de PAEs en el semillero SINCRO motiva adentrarse a estudiar un tema de interés y seguir profundizando en él.
- El semillero SINCRO es un espacio que ayuda a desarrollar habilidades referentes a la investigación y trabajo en equipo, además de poder potenciar las ideas generadas en el pregrado.
- El desarrollo de PAEs en el semillero SINCRO puede servir de motivación tanto para adelantar estudios de posgrado como para acercarse más a un proyecto en la industria real.
- Puedo decir que me gustó mucho más y le puse mayor empeño a ese PAE que a muchas materias (incluyendo seminario de proyectos en ingeniería) y en parte, gracias a ese PAE, pude hacer las prácticas en una empresa de energía solar en la que fui empleado desde las prácticas hasta 4 años más adelante que me independicé.
- El desarrollo de PAEs en el semillero SINCRO me permite profundizar o especializarse en temas específicos, lo que puede motivar más. Si posterior a la graduación las funciones que se ejerzan, como investigador si se siguió la línea o como empleado, requiere de esto, motiva a tomar posgrado. El PAE es más un abre bocas a la línea de ser investigador.
- El PAE fue un espacio de investigación aplicada por lo tanto se desarrollan habilidades prácticas muy útiles en la industria y al mismo tiempo se aprenden las formalidades de una investigación científica rigurosa, entonces fácilmente uno puede inclinarse a continuar estudios de posgrado.
- El desarrollo del PAE me brindó herramientas para investigar de una forma organizada, y fue satisfactorio que este fuera una aplicación en la industria.
- El desarrollo del PAE en el semillero SINCRO fomenta el autoaprendizaje y te hace buscar cómo resolver los problemas de la vida real desde el punto de vista profesional.
- El PAE, permite realizar los primeros acercamientos a métodos de investigación y casos de estudio que pueden ser utilizados para llevar a cabo investigación.
- Al poder compartir con el grupo de compañeros y profesores en el semillero SINCRO diferentes proyectos, surgen ideas que pueden ser interesantes al momento de decidir en qué se desea profundizar a nivel académico.
- Los PAEs ayudan a aprender a desarrollar el espíritu investigador, a aplicar los conocimientos aprendidos en escenarios reales y motivar la creatividad para encontrar soluciones simples a problemas complejos.

Matizando los resultados mostrados en la Fig. 2, se podría pensar que hacer una maestría o un doctorado no necesariamente es la única manera de emprender una carrera en investigación. Es por eso que la encuesta también refleja que el 43.33 % de los encuestados ha participado de manera activa en proyectos, convocatorias y/o grupos de investigación. De manera complementaria, 96.66 % de los egresados considera que el haber participado en los PAEs en el marco del semillero, aportó elementos necesarios para emprender un proceso investigativo, más allá de lo aprendido en la formación tradicional (clases, asignaturas, talleres, laboratorios, etc).

Para complementar este último aspecto, se le suministró a los egresados la siguiente lista de competencias, relacionada con cualquier proceso de investigación:

A) *Elaborar un estado del arte acerca de algún tema de interés, desarrollando la capacidad para la síntesis de información científica/tecnológica/técnica.*

B) *Buscar información en bases de datos especializadas.*

C) *Formular una propuesta de investigación con identificación del problema, justificación, definición de objetivos, alcance y metodología.*

D) *Elaborar y gestionar un cronograma de actividades en un proyecto.*

E) *Presentar estados de avance del proyecto.*

F) *Desarrollar la capacidad de diagnosticar y definir problemas, oportunidades y necesidades antes de proponer soluciones que satisfagan los requisitos de un proyecto.*

G) *Desarrollar la capacidad de comunicarse con pares, expertos, o incluso público en general.*

H) *Elaborar productos de divulgación tales como artículos, pósters, ponencias, para potenciar las habilidades de comunicación oral y escrita.*

La encuesta contiene una escala de Likert [10], con la cual se pretende valorar el nivel de contribución que el hecho de desarrollar PAEs en SInCRo, aporta al desarrollo de las habilidades recién listadas. La escala tiene cinco (5) niveles de contribución, a saber:

1. *Muy poco.*
2. *Débilmente.*
3. *De forma parcial.*
4. *Fuertemente.*
5. *De manera fundamental.*

La Fig. 3 lista los resultados de la Prueba de Likert, para las habilidades de investigación listadas anteriormente. Por razones de espacio, se listan solamente los dos resultados más altos de la escala (4 - Fuertemente; 5 – De manera fundamental). Como puede verse en la figura, un gran porcentaje de los encuestados (en casi todos los casos más del 80 %) opina que el desarrollo de PAEs en el semillero ha contribuido entre Fuertemente y De manera Fundamental, al desarrollo de las competencias listadas. La Fig. 3 muestra entonces de manera contundente cómo los egresados perciben la importancia de la participación en los PAEs de SInCRo, para el desarrollo de sus competencias de investigación.

Finalmente, y como un indicador más para inferir la incidencia que tiene el haber desarrollado PAEs en el marco de SInCRo, con la disposición de los egresados a acometer actividades de investigación en su vida profesional, se preguntó en la encuesta por el desarrollo de productos académicos. Un tercio de los encuestados (33.33 %) informa haber presentado ponencias en eventos nacionales e internacionales, mientras que un sexto (16.66 %) ha logrado la publicación en artículos de revista.

III. Conlusiones

Los resultados mostrados en la sección anterior, permiten inferir tres cosas: En primer lugar, la totalidad de los encuestados desarrollaron PAEs en el marco del semillero SInCRo, lo cual es previsible, ya que los PAEs son la forma más común de asumir los procesos de investigación en el semillero. En segundo lugar, los egresados y egresadas perciben que la gestión de dichas actividades de investigación en el semillero, les ha permitido desarrollar competencias más allá de los procesos de formación convencional ofrecidos por la universidad. Se detallan en este aspecto opiniones muy favorables de los egresados en cuanto a lo aprendido, y se evidencian también opiniones positivas en cuanto a la importancia que el desarrollo de los PAEs tiene para reforzar competencias de investigación concretas. Finalmente, de las encuestas se obtuvieron evidencias concretas que relacionan la participación en los PAEs del semillero, y el futuro perfilamiento de los egresados en labores de investigación: Estudios de posgrado, participación en grupos, proyectos y convocatorias de investigación, y realización de publicaciones del estilo póster, ponencias y artículos de revista.

La vocación de los programas académicos de pregrado, ofrecidos en la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, no está de ninguna manera orientados únicamente a la investigación, sin embargo, este trabajo sugiere una correlación importante entre el desarrollo de Prácticas Académicas Especiales (PAEs) al interior del Semillero SInCRo, y una predisposición a desarrollar actividades de investigación, una vez se hace el egreso del programa. Los autores consideramos que estas actividades sirven como complemento a la formación tradicional ofrecida por la universidad, y además como una oportunidad para que los estudiantes conozcan los procesos de investigación, continúen participando de dichos procesos en su vida profesional.

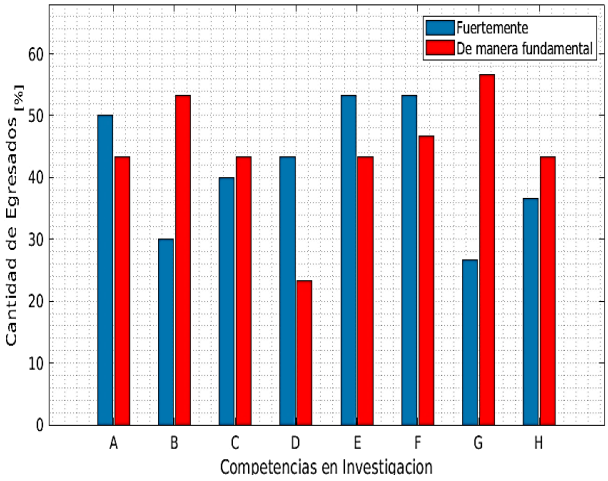


Fig. 3. Relación percibida entre el desarrollo de competencias de investigación y la participación en PAEs en el marco de SInCRo

Referencias

[1] Decreto 0808 de Abril 25 de 2002. Presidencia de la República de Colombia. 2002

[2] Acuerdo 033 de 2007. Consejo Superior Universitario. Universidad Nacional de Colombia. "Por el cual se establecen los lineamientos básicos para el proceso de formación de los estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia a través de sus Plan de Estudios curriculares", Capítulo III, Estrategias de Formación. 2007.

[3] María. Torres-Villarreal, Beatriz. Londoño-Toro, María-Teresa. Palacios-Sanabria, Johanna. Cortes y Beatriz. Aliaga, "Investigación formativa y nuevas propuestas pedagógicas en las facultades de Derecho. Caso: Facultad de Jurisprudencia de la Universidad del Rosario". Studiositas, ISSN 1909-0366, Vol. 3, Nº. 1, 2008, pp. 28-33.

[4] B. Restrepo Gómez, "Conceptos y Aplicaciones de la Investigación Formativa y Criterios para Evaluar la Investigación científica en sentido estricto". Bogotá: CNA, 2011. https://www.mineducacion.gov.co/CNA/1741/articles-186502_doc_academico5.pdf

[5] O. Turpo-Gebera, P. M. Quispe, L. C. Paz y M. Gonzales-Miñán, "La investigación formativa en la universidad: sentidos asignados por el profesorado de una Facultad de Educación", Educ. Pesqui., vol. 46, 2020. Accedido el 8 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: https://doi.org/10.1590/s1678-4634202046215876

[6] Universidad Católica de Pereira. Propuesta pedagógica. Pereira: Universidad Católica de Pereira, 2003.

[7] M. C. Rodríguez-Vargas, O. O. Alcázar-Aguilar, S. L. Gil-Cueva, R. Garay-Argandoña y R. M. Hernandez, "Researchers' Seedbeds for the Development of Research Skills in Universities", Int. J. Criminol. Sociol., vol. 9, pp. 961-967, noviembre de 2020. Accedido el 8 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: https://doi.org/10.6000/1929-4409.2020.09.101

[8] Acuerdo 014 de 2006, Consejo Superior Universitario, Universidad Nacional de Colombia, "Por el cual se crea y organiza el Sistema de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia", Acta 09 del 4 de abril de 2006. Disponible: http://www.legal.unal.edu.co/rlunal/home/doc.jsp?d_i=34213

[9] Resolución 670 DE 2020, Rectora de la Universidad Nacional de Colombia, Universidad Nacional de Colombia, "Por la cual se reglamenta la conformación de Semilleros de Investigación, Creación, Extensión Solidaria o Innovación de la Universidad Nacional de Colombia", 22 de octubre de 2020. Disponible: http://www.legal.unal.edu.co/rlunal/home/doc.jsp?d_i=96610

[10] Cañadas Osinski, I., & Sánchez Bruno, A. (1998). CATEGORÍAS DE RESPUESTA EN ESCALAS TIPO LIKERT. Psicothema, 10(Número 3), 623-631. Recuperado a partir de https://reunido.uniovi.es/index.php/PST/article/view/7489

Modelo de vinculación con socios formadores y retos para el desarrollo de competencias

Miguel Ángel García Ruiz
Escuela de Ingeniería y Ciencias
Tecnologico de Monterrey
Monterrey, México
garcia.ruiz.miguel@tec.mx

***Abstract*— Se implementa un modelo educativo a nivel nacional para el desarrollo de competencias de egreso, incluyendo la participación de socios formadores del sector público, privado y de organizaciones civiles, desarrollando soluciones para retos y problemáticas reales al interior de las organizaciones. Un modelo educativo que enfatiza el desarrollo de competencias disciplinares y transversales a través de la experiencia vivencial, resolviendo retos reales dentro de las empresas. Si bien esto se aplica a todas las disciplinas, el desarrollo de competencias en el área de la electrónica y en las áreas que la integran, como la mecatrónica, ha tenido valiosos resultados.**

Keywords—educación profesional, innovación educativa aprendizaje basado en retos, competencias disciplinares, competencias transversales, modelo TEC-21.

I. INTRODUCCIÓN

A. *La importancia del desarrollo de competencias en la educación actual y la vinculación con socios formadores*

Se han realizado estudios para determinar los resultados y la relevancia de los sistemas de educación superior para el mercado laboral en México [1] y dentro de ellos se ha evaluado el nivel de competencias de los egresados de estudios profesionales y su impacto, tanto positivo como negativo, en la productividad y competitividad del país [2]. Dichos estudios muestran la necesidad de una formación profesional más alineada a las necesidades del mercado laboral y una mejora continua en el desarrollo de las competencias adecuadas para lograr una fuerza laboral más robusta.

En los últimos años, se ha orientado la educación en las áreas STEM (*science, technology, engineering and mathematics*) hacia una pedagogía basada en el desarrollo de competencias, a través de la cual el estudiante aprende el contenido temático de que se trate y, primordialmente, desarrolla las competencias de egreso necesarias para la realidad y los retos actuales [3]. Ahora bien, en diversas partes del mundo, la vinculación con la industria, las organizaciones y los empleadores en general, ha sido abordada como una estrategia para mejorar el desarrollo de competencias, logrando egresados mejor preparados y con un nivel de adaptación a las organizaciones más apropiado [4] e, incluso, se han hecho estudios sobre la percepción que tienen los empleadores sobre el perfil de los egresados bajo estos modelos educativos [5] para retroalimentar el proceso.

Estos estudios subrayan colectivamente la importancia de un entorno de aprendizaje propicio, un desarrollo profesional de alta calidad y una colaboración eficaz entre las instituciones educativas y los socios formadores para mejorar los resultados y su relevancia para el mercado laboral.

B. *Breve explicación del modelo de vinculación con socios formadores y su potencial para enriquecer la formación*

El Tecnológico de Monterrey, a partir de agosto 2019, implementó un nuevo modelo educativo en su oferta de educación profesional denominado “Modelo Educativo TEC21”, en el cual prevalecen dos características principales: 1. El énfasis en el desarrollo de competencias de egreso, tanto disciplinares como transversales y 2. Una formación basada en retos en vinculación con el entorno, con socios formadores: empresas del sector privado, público y organizaciones civiles, que plantean retos o problemáticas reales y a través de las cuales los estudiantes desarrollan las competencias de egreso asociadas al programa de estudio [6]. Bajo este modelo, más del 50% de los cursos de la curricula se vincula con un socio formador, en una unidad formativa llamada “bloque” impartida en diferentes módulos y por varios profesores, centrándose en una metodología de enseñanza-aprendizaje basada en retos, Fig. 1.

Numerosas universidades se centran en las ventajas y la importancia del desarrollo de competencias en colaboración con socios formadores; sin embargo, muchas de las universidades lo hacen de forma relativamente parcial, vinculando a los estudiantes en la última etapa de su formación. En los programas de ingeniería, el modelo TEC21 lo hace desde el semestre 4 de un total de 8, esto es, un 62.5 % de los semestres vinculados con socios formadores, lo cual resulta en un robusto desarrollo de las competencias de egreso del programa.

En torno a la experiencia específica del impacto de este modelo educativo en las unidades formativas en las que se desarrollan competencias relativas a la enseñanza-aprendizaje de la electrónica, dentro del programa de Ingeniería en Mecatrónica, se han logrado experiencias enriquecedoras con resultados formativos relevantes, los cuales son el objeto de estudio de este trabajo.

Fig. 1. Modelo de enseñanza-aprendizaje basado en retos [6].

II. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

A. *Descripción del modelo de vinculación con socios formadores*

En el marco de nuestro modelo, las empresas u organizaciones pueden participar como socios formadores aportando problemas o necesidades reales dentro de sus procesos, para que nuestros estudiantes puedan desarrollar competencias a través de la generación de propuestas de solución. Los socios formadores pueden ser:

- Locales
- Nacionales
- Internacionales

Por otra parte, la participación del socio formador puede ser en diferentes escenarios:

- En una unidad formativa (curso curricular llamado "bloque", asesorado por todos los profesores de los diferentes módulos y un asesor de la empresa u organización)
- En una estancia profesional (estancia en la empresa u organización de tiempo completo durante un semestre, asesorado por un profesor y un colaborador de la empresa)
- En una estancia de investigación (estancia en la universidad, empresa o un centro de investigación de tiempo completo durante un semestre, asesorado por un investigador interno y otro externo)
- En una concentración (curso de especialización durante un semestre, asesorado por todos los profesores de los diferentes módulos y un asesor de la empresa u organización)

Se requieren, como mínimo, cuatro momentos clave en la vinculación:

- Definición y selección del reto (socio formador en colaboración con profesores)
- Presentación del reto por parte del socio formador a los estudiantes (puede ser en la universidad o en las instalaciones del socio formador, preferentemente)
- Presentación intermedia de los estudiantes con el avance de sus propuestas de solución al reto, seguida de retroalimentación por parte del socio formador
- Presentación final de los estudiantes con sus propuestas de solución al reto, seguida de retroalimentación por parte del socio formador y la evaluación final en conjunto con los profesores

B. *Descripción general del modelo de competencias de egreso*

Las competencias de egreso del programa de Ingeniería en Mecatrónica se clasifican en tres categorías:

- Competencias de Área (SIIT), que son específicos para la Escuela de ingenierías y cubren el área de ingeniería en general.
- Competencias del Programa (SMR), que son específicas del programa y es donde se encuentran las competencias de interés relativas a la enseñanza y aprendizaje de la electrónica
- Competencias Transversales (SEG), que se definen para todos los estudiantes de pregrado del Tecnológico de Monterrey, independientemente de su carrera o campo de estudio.

El Modelo Educativo Tec21 define los niveles de dominio de competencias y los clasifica como nivel A, B y C, siendo este último el de mayor complejidad en el hacer, profundidad en el conocimiento y autonomía. Los niveles de dominio describen el desempeño relativo a la competencia en un momento determinado del proceso de formación. El desarrollo de competencias representa un proceso gradual que se vuelve más complejo a medida que más competente es el estudiante. Por esta razón, la evaluación del desempeño se realiza en diferentes niveles de dominio. Como se puede observar en el diagrama en espiral, Fig. 2, la complejidad, profundidad y autonomía aumentan a medida que el estudiante avanza por los diferentes niveles.

En el modelo de evaluación, tener niveles de dominio permite:

- Saber con claridad cuándo inicia el desarrollo de la competencia y cuándo finaliza (en qué etapa curricular se deberá desarrollar cada nivel)
- Definir y acotar el alcance de las competencias en cada unidad formativa
- Clarificar los parámetros de evaluación de las competencias en cada unidad formativa

Para emitir un juicio sobre el logro en torno al desarrollo de una competencia de los estudiantes, es necesario comparar su desempeño con el nivel de dominio deseado, por lo que este último se convierte en un referente indispensable en el proceso de evaluación.

Las actividades que se llevan a cabo para la medición del desarrollo de las competencias son:

- Definición de un plan de evaluación, que indica las metas a alcanzar durante el periodo académico anual para cada competencia
- Evaluación de competencias realizado por docentes y socios formadores en las unidades de formación durante la impartición

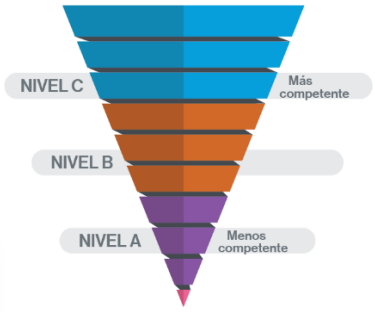


Fig. 2. Niveles de dominio de las competencias de egreso.

- Generación de un reporte en el que se contraste el resultado alcanzado con la meta definida en el plan de evaluación
- Análisis de los resultados
- Establecimiento y documentación de acciones puntuales a realizar en el siguiente ciclo para mejorar los resultados, si es necesario

Cada indicador de desempeño tiene su meta en el plan de evaluación. El objetivo es lograr que el 80% de los estudiantes alcancen cada una de las competencias en el nivel A y el 70% en los niveles B y C.

C. La enseñanza-aprendizaje de la electrónica en el programa de Ingeniería Mecatrónica

La formación en el programa de Ingeniería en Mecatrónica se divide en las siguientes cuatro áreas:

- Sistemas electrónicos para la automatización
- Automatización y control
- Diseño y sistemas robotizados
- Sistemas ciberfísicos

En el área de sistemas electrónicos para la automatización se encuentran las unidades de formación de interés para este trabajo, cuyos temas se centran en la formación de la electrónica para el programa estudiado. En la Tabla I se puede observar el detalle sobre las unidades formativas, los temas relativos a la electrónica y las competencias asociadas a desarrollar en dichas unidades formativas. Las competencias asociadas se describen de forma general en la Tabla II.

TABLA I. UNIDADES FORMATIVAS DE INTERÉS DEL PROGRAMA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

Unidad de formación	**Unidades formativas, temas relativos a la Electrónica y sus competencias asociadas**		
	Nombre de la unidad de formación	***Temas relativos a la electrónica y sus bases***	***Competencias asociadas***
TE1020	Análisis de circuitos eléctricos	Análisis de circuitos en CD	SIIT0301B, SIIT0101B, SEG0501A, SEG0502A
MR2022	Análisis de elementos de la mecatrónica	Sistemas de medición Sensores y actuadores	SMR0101A, SMR0301A, SIIT0102B, SEG0501B
MR2003B	Integración mecatrónica	Análisis de circuitos en CA Sistemas lógicos de control	SMR0101B, SMR0104A, SEG0601A, SEG0302A, SIIT0301C
MR2004B	Implementación de sistemas mecatrónicos	Materiales semiconductores, diodos, transistores, tiristores, acoplamiento y acondicionamiento de señales, etapas de potencia. Microcontroladores	SMR0302A, SMR0303A, SMR0304A, SEG0301A, SIIT0102C
MR2005B	Solución de problemas de procesos	Amplificadores operacionales (configuraciones sin retroalimentación, con retroalimentación positiva y negativa y sus aplicaciones)	SMR0403A, SIIT0303C, SIIT0402C, SEG0402A, SIIT0302C
MR2006B	Automatización industrial	Sensores y actuadores industriales Sistemas de control basado en microcontroladores Controladores lógicos programables	SMR0102B, SMR0302B, SMR0401B, SMR0402A, SEG0404A

TABLA II. DESCRIPCIÓN DE LAS COMPETENCIAS ASOCIADAS A LAS UNIDADES DE FORMACIÓN DE INTERÉS

Competencia y su nivel	**Competencias asociadas y su descripción general**	
	Nombre de la competencia	***Descripción general***
SIIT0101B	Explicación del funcionamiento de sistemas y dispositivos ingenieriles	Explica el funcionamiento de sistemas y dispositivos ingenieriles por medio de argumentaciones sustentadas en principios de las ciencias.
SIIT0102B	Demostración del funcionamiento de sistemas y dispositivos ingenieriles	Demuestra el funcionamiento de sistemas y dispositivos ingenieriles mediante evidencias empíricas o teóricas aplicando metodologías científicas.
SIIT0102C	Demostración del funcionamiento de sistemas y dispositivos ingenieriles	Demuestra el funcionamiento de sistemas y dispositivos ingenieriles mediante evidencias empíricas o teóricas aplicando metodologías científicas.
SIIT0301B	Evaluación del problema	Evalúa los componentes que integran una problemática de acuerdo a principios y procesos relacionados con sistemas y dispositivos ingenieriles.
SIIT0301C	Evaluación del problema	Evalúa los componentes que integran una problemática de acuerdo a principios y procesos relacionados con sistemas y dispositivos ingenieriles.
SIIT0302C	Toma de decisiones	Genera propuestas de solución a problemas en condiciones de incertidumbre y diferentes niveles de complejidad con base en metodologías de ingeniería y ciencias.
SIIT0303C	Implementación de acciones	Implementa soluciones a problemas complejos empleando acciones científicas e ingenieriles.
SIIT0402C	Aplicación de principios de sustentabilidad	Aplica los principios de sustentabilidad en la solución de problemas de sistemas y dispositivos ingenieriles que garanticen el bienestar de las generaciones futuras.
SEG0301A	Diversidad	Respeta la diversidad como un elemento enriquecedor del quehacer personal y profesional, con fundamento en los derechos humanos, en diferentes saberes y distintas culturas.
SEG0302A	Colaboración	Construye acuerdos e interacciones entre diversos grupos y personas, con base en una comunicación que considera las diferencias y habilidades propias y de los demás.
SEG0402A	Argumentación ética	Soluciona problemas de diversos ámbitos de la vida con conciencia ética, argumentando desde principios y valores.
SEG0404A	Compromiso ciudadano para la transformación social	Construye soluciones comprometidas, sostenibles y solidarias ante los problemas y necesidades sociales, por medio de estrategias que fortalezcan la democracia y el bien común.
SEG0501A	Pensamiento sistémico	Analiza problemáticas con una visión integrada desde la inter y la transdisciplinariedad, concibiendo la realidad como un conjunto de sistemas interconectados.

Competencia y su nivel	Competencias asociadas y su descripción general	
	Nombre de la competencia	***Descripción general***
SEG0501B	Pensamiento sistémico	Analiza problemáticas con una visión integrada desde la inter y la transdisciplinariedad, concibiendo la realidad como un conjunto de sistemas interconectados.
SEG0502A	Pensamiento científico	Resuelve problemas e interrogantes de la realidad, a partir de metodologías válidas y confiables.
SEG0601A	Lenguaje oral	Comunica oralmente ideas, argumentos y emociones, integrando la expresión corporal, tecnologías, el uso del espacio, la estructuración verbal y el contexto.
SMR0101A	Establece los requerimientos en un proyecto mecatrónico	Establece los requerimientos funcionales, económicos y de seguridad del problema a resolver de ingeniería mecatrónica.
SMR0101B	Establece los requerimientos en un proyecto mecatrónico	Establece los requerimientos funcionales, económicos y de seguridad del problema a resolver de ingeniería mecatrónica.
SMR0102B	Aplica tecnologías para desarrollar un producto o sistema mecatrónico	Aplica apropiadamente tecnologías mecánicas, electrónicas, de software y de control automático tomando en cuenta especificaciones.
SMR0104A	Analiza interacción de componentes mecatrónicos	Analiza la interacción entre los componentes de un sistema mecatrónico tomando en cuenta la sinergia entre ellos.
SMR0301A	Realiza modelación teórica y experimental de procesos	Modela el proceso a mejorar validando su comportamiento.
SMR0302A	Diseña estrategias para automatizar procesos	Diseña estrategias para automatizar procesos, sistemas y maquinaria utilizando herramientas de ingeniería.
SMR0302B	Diseña estrategias para automatizar procesos	Diseña estrategias para automatizar procesos, sistemas y maquinaria utilizando herramientas de ingeniería.
SMR0303A	Valida propuestas de automatización	Valida propuestas de automatización garantizando calidad, seguridad y productividad.
SMR0304A	Implementa propuestas de automatización	Implementa propuestas de automatización utilizando tecnologías de vanguardia.
SMR0401B	Investiga el estado de la técnica para el desarrollo de productos	Elabora investigación del estado de la técnica basándose en fuentes confiables para generar una propuesta de un sistema mecatrónico.
SMR0402A	Genera propuestas de sistemas mecatrónicos	Genera propuestas innovadoras de un sistema mecatrónico de acuerdo con normas.
SMR0403A	Evalúa factibilidad de desarrollos mecatrónicos	Evalúa la factibilidad técnica y económica del desarrollo tecnológico basado en restricciones.

III. Resultados obtenidos y problemas encontrados

Este modelo de vinculación permite que el estudiante a través de un formato aprendizaje-acción o aprendizaje-activo desarrolle competencias tanto disciplinares como transversales mediante un acercamiento al ejercicio en el mundo real profesional, lo que se suele llamar en la literatura "enseñanza-auténtica".

En el Tecnológico de Monterrey, campus Querétaro, se han realizado hasta ahora vinculaciones con 22 socios formadores, entre ellos las empresas u organizaciones Valeo, Universal Robots, SIEMENS, JCA Technologies, Brose, Eurotranciatura, Case New Holland, EDAG Group, CRIQ (Centro de Rehabilitación Integral de Querétaro), Hortisoluciones, entre otros.

En la Fig. 3 se muestran los resultados de la medición del desarrollo de competencias en una población de 200 estudiantes, como muestreo, de la carrera de Ingeniería en mecatrónica, con un enfoque en las competencias de interés presentadas, donde es posible observar que se logra el objetivo planteado en todas ellas: que el 80% de los estudiantes logren el desarrollo de las competencias en el nivel A y el 70% en los niveles B y C. Es posible observar que los niveles A de las competencias son alcanzados por porcentajes más altos, no así los niveles B y C.

A partir de ello se plantea un trabajo de mejora continua basado en la filosofía del Ciclo de Deming o PDCA (*Plan, Do, Check and Act*). Este ciclo tiene una duración semestral e incluye valoración y evaluación de los resultados estudiantiles y del programa. Aproximadamente, cada cinco años se realiza este ciclo de mejora junto con otro proceso en el que el plan de estudios y los objetivos educativos del programa se revisan en función de los comentarios de los grupos de interés: facultad, empresarios, exalumnos, estudiantes, entre otros.

Las cuatro etapas clásicas del ciclo de Deming se relacionan con nuestro proceso de mejora continua como se resume en los siguientes párrafos.

- *Plan*.

  Esta etapa se llama Definición del plan de evaluación. Este plan consta de una tabla que indica para todos los cursos, desde el primero al octavo semestre, las competencias específicas que se estarán desarrollando y midiendo. De forma periódica, esta tabla se analiza con la información resultante de la retroalimentación por parte de los profesores para mantener o modificar las competencias o el número de ellas a evaluar en cada curso.

- *Do*.

  Esta etapa se llama Evaluación del curso. Al final del semestre, los profesores evalúan el logro en el desarrollo de las competencias por parte de los estudiantes, de forma individual y para cada criterio en la herramienta de evaluación (rúbricas, exámenes argumentativos, entregables finales) y cargan esta información en la herramienta de software para la gestión de las evaluaciones. El sistema integra automáticamente la información de los estudiantes y puede calcular el índice integral que evalúa el desarrollo de las competencias de los estudiantes.

- *Check*.

  Esta etapa se llama Cierre de ciclo. En esta etapa se analiza toda la información resultante de la evaluación de las competencias de todos los cursos, para evaluar los niveles de logro de los estudiantes.

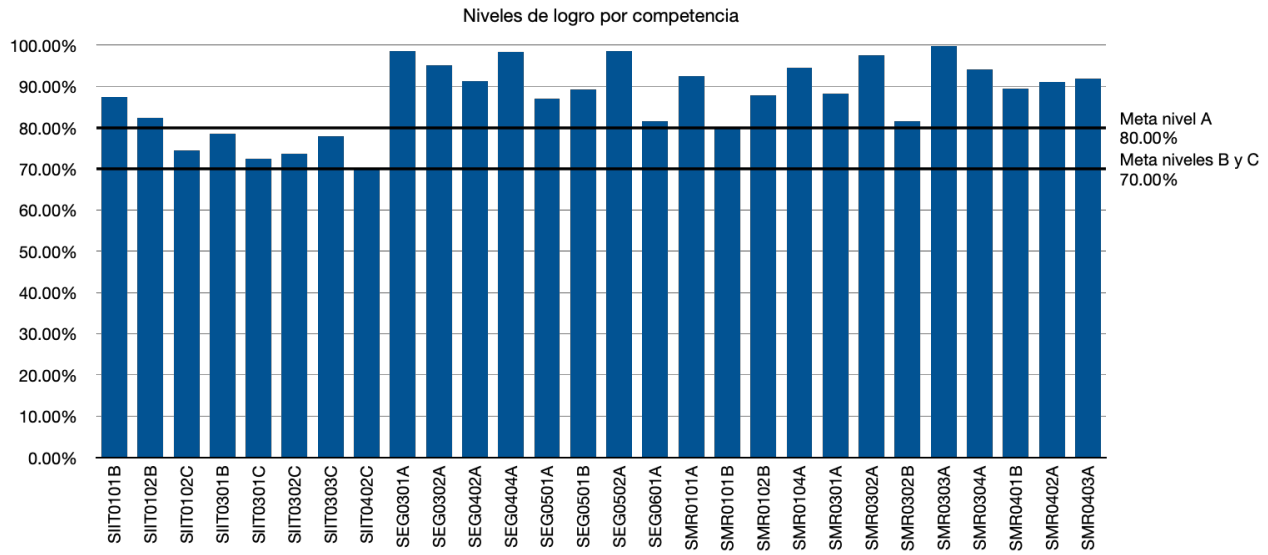


Fig. 3. Resultados obtenidos de la evaluación de competencias de interés

Este paso refleja la evaluación del programa y es monitoreado, revisado nacionalmente.

- *Act*.

  Esta etapa cierra el plan de mejora y es en la que se consideran los comentarios y conocimientos recopilados de todo el proceso de evaluación para establecer el plan de acción del próximo ciclo y ejecutarlo.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer, especialmente, a todos los estudiantes involucrados en este modelo educativo basado en el desarrollo de competencias y a todos los profesores y directivos involucrados en el diseño y en la implementación de éste, lo cual ha representado un esfuerzo, sin duda, importante. Adicionalmente, el autor desea agradecer el apoyo financiero de *Writing Lab, Institute for the Future of Education*, Tecnologico de Monterrey, México, en la producción de este trabajo.

REFERENCIAS

[1] OECD, "Higher education in Mexico: labour market relevance and outcomes", Higher education, OECD Publishing, Paris, 2019, doi: 10.1787/9789264309432-en.

[2] OECD, "OECD Skills Strategy Diagnostic Report: Mexico 2017", OECD Skills Studies, OECD Publishing, Paris, 2017, doi: 10.1787/9789264287679-en.

[3] M. Henri, M.D. Johnson, and B. Nepal, "A review of competency-based learning: tools, assessments, and recommendations," J. Eng. Educ., vol. 106, pp. 607-638, 2017, doi: 10.1002/jee.20180.

[4] L. P. Kozlova, O. A. Kozlova, "The Role of Strategic Educational Partnerships," Proceedings of 2018 17th Russian Scientific and Practical Conference on Planning and Teaching Engineering Staff for the Industrial and Economic Complex of the Region, PTES 2018, pp. 136-137, 2018, doi: 10.1109/PTES.2018.8604242.

[5] J. Henrich, "Competency-based education: the employers' perspective of higher education,", *The Journal of Competency-based Education*, vol. 1, pp. 122–129, 2016, doi: 10.1002/cbe2.1023.

[6] S. L. Olivares Olivares, J. R. López Islas, M. J. Pineda Garín, J. A. Rodríguez Chapa, C. H. Aguayo Hernández, L. O. Peña Ortega, Modelo educativo Tec21: retos para una vivencia que transforma. Monterrey, México: Editorial Digital Tecnológico de Monterrey, 2021.

Modelo de experiencias significativas para el desarrollo de competencias

Fabian Alonso Lara Vargas
*Universidad Pontificia Bolivariana Grupo ITEM.*Monteria Cordoba.
Instituto Universitario de Ingenierìa Energetica Universitat Politecnica de Valencia.
Valencia España.
ORCID 0000-0001-8246-1852

Dayan Ariadna Guzmán Bejarano
Universidad Libre
Grupo GINCE.
Bogotá, Colombia.
ORCID 0000-0002-1640-0696

Rosa Liliana Tarazona Caceres
Universidad Pontificia Bolivariana Grupo ITEM.
Monteria Cordoba
ORCID-0000-0001-6732-5107

Carlos Vargas Salgado
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universitat Politècnica de València.ITEM. Instituto Universitario de Ingenierìa Energetica Universitat Politecnica de Valencia
Valencia España.
ORCID 0000-0002-9259-8374

***Abstract*—Este estudio con enfoque de investigación mixto analiza el impacto de un modelo pedagógico basado en experiencias significativas sobre la percepción de capacidad, la motivación y la percepción de complejidad entre los estudiantes de un curso de Electrónica de Potencia en una universidad privada de la región Caribe de Colombia. El estudio evaluó a 15 estudiantes, y los resultados revelaron un aumento del 59,40% en la percepción de capacidad, del 33,33% en la motivación, y una disminución del 25,56% en la percepción de complejidad durante un período de 16 semanas. Estos resultados demuestran que este modelo propuesto contribuye a desarrollar capacidades de aprendizaje en los estudiantes y, al mismo tiempo, hace que el contenido del curso les resulte más accesible. En consecuencia, este enfoque pedagógico promete ser efectivo para incrementar la excelencia de la enseñanza técnica superior.**

Keywords—Modelo pedagógico, Experiencias significativas, Capacidad, motivación

I. INTRODUCTION

La investigación educativa explora a fondo formas de mejorar los resultados de los estudiantes, centrándose en modelos predictivos y factores clave de éxito [1]. A continuación, la introducción está organizada en las siguientes secciones:

A. Factores que influyen en el éxito estudiantil.

Varios estudios han empleado modelos de análisis predictivo identificando los factores dominantes que influyen en el éxito de los estudiantes, tales como las actividades de aprendizaje en línea y las puntuaciones de las evaluaciones trimestrales [1]. Además, la eficacia de los centros escolares para lograr una mejora en el rendimiento académico de los estudiantes se ha relacionado con su situación socioeconómica y sus capacidades, como con la inversión en instalaciones escolares y/o la calidad del profesorado [1].

La valoración de las actividades formativas y evaluativas es crucial para monitorear el rendimiento de los estudiantes, no obstante, también es esencial tener en cuenta el impacto de la estructura educativa. Mientras algunos estudios subrayan la importancia de las características de la institución educativa y el programa, otros destacan el papel de la autorregulación y la motivación de los estudiantes. [2].

Esto lleva a reconocer un panorama multifacético en el que el factor institucional y el personal se combinan para influir en el rendimiento académico de los estudiantes. Este reconocimiento de la complejidad subyacente a la mejora del rendimiento académico de los estudiantes lleva a una hipótesis inicial: la mejora del rendimiento académico de los estudiantes es una cuestión polifacética que implica el análisis de varios factores predictivos y el uso de diferentes metodologías. La investigación desarrollada por [2] sugiere que, si bien las características de la institución educativa y del programa son importantes, los factores relacionados con el estudiante, como la autorregulación, la motivación y la situación socioeconómica, desempeñan un papel crucial [2]. Por lo tanto, es fundamental avanzar en la exploración de estas dimensiones para avanzar en la comprensión de la mejora académica [3].

La mejora de las competencias académicas es un elemento fundamental de los sistemas educativos y contribuye al conocimiento de las estrategias de enseñanza/aprendizaje [4]. Por su parte, la investigación desempeña un papel importante en la mejora de la calidad de la educación y la reducción de la brecha entre teoría y práctica [5].

B. Importancia de las estrategias pedagógicas.

Los enfoques pedagógicos innovadores [6] y [7] demuestran como el aprendizaje basado en proyectos, pueden mejorar significativamente los resultados del aprendizaje y el rendimiento académico de los estudiantes.

Sin embargo, mientras que [8] sólo informa de una ligera correlación entre los métodos de simulación y el rendimiento académico en educación física, [7] encuentra un fuerte impacto del aprendizaje basado en problemas sobre el rendimiento de los estudiantes en la enseñanza de la química. Esta diferencia sugiere que la eficacia de las estrategias de enseñanza puede estar asociada al curso. Asimismo, [9] indica que las estrategias cognitivas de aprendizaje median en la relación entre las creencias motivacionales y el rendimiento académico, lo que

sugiere que la motivación por sí sola no es suficiente para el éxito académico sin la aplicación de estrategias de aprendizaje cognitivas y metacognitivas por parte del estudiante.

C. Contextualizacion del aprendizaje.

Ampliando esta perspectiva, investigaciones anteriores indican que el aprendizaje experimental y la educación contextualizada influyen positivamente en los resultados del aprendizaje de los estudiantes. Se ha demostrado que el aprendizaje experimental, que implica un compromiso práctico o inmersivo con el contenido, mejora no sólo las competencias académicas, sino también los resultados no académicos, como el autoconocimiento y el bienestar [10]. Del mismo modo, se ha comprobado que la integración del aprendizaje basado en proyectos (ABP) con el aprendizaje experimental, mejora las capacidades de evaluación y valoración de los estudiantes [11]. Adicionalmente, la participación de los estudiantes en métodos de aprendizaje experimental y simulaciones se ha asociado a un rendimiento académico superior, como se demostró en una escuela de negocios de España en 2017 [12].

No obstante, es importante señalar que la eficacia de las intervenciones educativas puede variar en función del contexto específico y del tipo de propuesta. Por ejemplo, mientras algunos juegos educativos de física resultaron ser muy eficaces para mejorar los resultados de aprendizaje de los estudiantes, otros fueron calificados como poco eficaces [13]. Además, también se ha demostrado que el uso de la tecnología en educación, como los robots asistentes de profesores, la ludificación y la realidad virtual, influye positivamente en el compromiso, la motivación y el rendimiento académico [14].

La conexión entre los recursos tecnológicos y las estrategias pedagógicas es cada vez más fuerte en la época contemporánea. La bibliografía indica que, aunque cada vez se hace más hincapié en la innovación pedagógica dentro de la enseñanza superior, existe un vacío notable en las investigaciones que integran el tipo de innovación pedagógica, el grado de apropiación de los conocimientos y las experiencias pedagógicas, pesar de haber algunos trabajos o iniciativas. Algunos estudios han destacado la importancia de los programas de desarrollo del profesorado para promover la innovación pedagógica [15], los retos a los que se enfrentan los profesores de ciencias a la hora de adoptar prácticas pedagógicas en línea [16] y las percepciones del profesorado y los estudiantes sobre el impacto de la enseñanza innovadora [17].

D. Desafios en la innovación pedagógica

Por otra parte, en la literatura surgen aspectos relevantes. Mientras algunas investigaciones apuntan al impacto positivo de la innovación pedagógica en las prácticas docentes y la satisfacción de los estudiantes [17] , otras señalan que son los obstáculos institucionales que impiden el pleno despliegue de tales innovaciones. [15]. Asimismo, se destaca la influencia de la cultura disciplinaria en la selección del tipo de innovación pedagógica y su correspondiente adopción [18], lo que sugiere que la relación entre innovación y práctica pedagógica puede ser compleja y polifacética.

E. Objetivos de la investigación.

Teniendo en cuenta lo anterior, este estudio pretende abordar la oportunidad de desarrollar nuevo conocimiento mediante el diseño e implementación de un modelo de aprendizaje basado en experiencias significativas en un curso de Electrónica de Potencia de un programa de Electrónica de una universidad privada de la región caribe colombiana.

Sin embargo, surge la siguiente pregunta: ¿Cómo puede un modelo de aprendizaje basado en experiencias significativas mejorar las competencias académicas en un curso de Electrónica de Potencia? Este estudio diseña e implementa un modelo pedagógico centrado en experiencias significativas dentro de la enseñanza de la Electrónica de Potencia, con el objetivo de evaluar su impacto en la optimización en la consecución de los resultados de aprendizaje de los estudiantes. Se plantea como hipótesis que la adopción de un enfoque basado en experiencias significativas contribuirá sustancialmente a mejorar el rendimiento académico de los estudiantes en el curso mencionado.

A diferencia de los métodos tradicionales de enseñanza, que a menudo se centran en lecciones expositivas y adoptan un enfoque único [19], el modelo propuesto de experiencias significativas pone al estudiante en el centro del proceso educativo. Este enfoque invita a los estudiantes a ser participantes activos en su propio aprendizaje, involucrándolos directamente en experiencias prácticas que son significativas, ya que son pertinentes de acuerdo con su formación disciplinar y relevantes al permitir la aplicabilidad a situaciones reales dentro y fuera del aula. Con relación al tipo de evaluación, este modelo propone evaluaciones formativas en lugar de evaluaciones sumativas tradicionales, lo cual permite que el estudiante reciba retroalimentación constante y oportuna y potencializa su motivación y compromiso. Este método no solo fomenta un entorno de aprendizaje más dinámico y participativo, sino que también prepara eficazmente a los estudiantes para enfrentar y resolver problemas complejos en entornos profesionales, mejorando su capacidad de adaptarse y aplicar sus conocimientos de manera flexible en el mundo real.

La implementación de este tipo de modelo no implica un costo adicional para las instituciones, el pasar del tradicional a este; de forma que se considera viable en su fase inicial. No obstante, en caso de que se incluya uso de equipos diferentes a los que están a disposición, y deba pagarse por un alquiler, o hacer salidas pedagógicas u otro tipo de actividades, ahí si debe ser elaborado un presupuesto propio, de acuerdo con las necesidades e intereses de la institución.

A continuación, se explica brevemente la metodología a usar. Esta se estructura en ocho secciones: la primera sección detalla el diseño de la investigación, y la segunda se adentra en los principios del modelo propuesto. A continuación, la tercera sección esboza la ruta de desarrollo y la cuarta describe la metodología usada para la implementación del modelo. La quinta sección se dedica a la recolección de datos, seguida de la sexta, que presenta la metodología empleada para analizar dichos datos. La penúltima sección, la séptima, expone las conclusiones derivadas del estudio. Por último, la octava y final sección aborda las consideraciones éticas pertinentes al estudio.

II. Materiales y Métodos

La sección de Materiales y Métodos detalla la implementación del modelo propuesto basado en experiencias significativas para mejorar el aprendizaje en un curso de Electrónica de Potencia. La Fig. 1, muestra el diagrama de fases de la metodología usada.

Fig. 1. Diagrama de fases de la metodología de investigación para la implementación y análisis en el curso de Electrónica de Potencia.

A. Diseño de la Investigación.

Este estudio se enmarca en un paradigma constructivista, con influencia sociocrítica, ya que reconoce que el aprendizaje es un proceso activo de construcción de conocimiento producido dentro de un contexto social [20]. Además, se adopta un método mixto de análisis cualitativo y cuantitativo para proporcionar una comprensión contextualizada de cómo los estudiantes obtienen significado de estas experiencias educativas en el curso de Electrónica de Potencia. El estudio tuvo una duración de 16 semanas, para evaluar el impacto del modelo pedagógico en el aprendizaje de los estudiantes. El estudio desarrolló 3 experiencias de aprendizaje de distinta duración, en las que se aplicaron encuestas al inicio y al final de cada una, con el propósito de tener en cuenta una línea base para cada experiencia y se tomaron notas evaluativas en cada una. Los participantes fueron quince estudiantes de noveno semestre de carrera, con rangos de edad entre los 20 y 24 años, tres mujeres y doce hombres.

Para fortalecer la validez interna del estudio, se empleó un diseño que integra métodos mixtos que permitieron la triangulación de datos a través de análisis cualitativos y cuantitativos. Sin embargo, la selección de participantes podría limitar la generalización de los resultados (validez externa), lo cual se podría abordar en futuras investigaciones

B. Principios del modelo propuesto.

El modelo propuesto tiene en cuenta las capacidades humanas y competencias que propone Martha Nussbaum [21]. Las capacidades humanas y competencias, las cuales se valoran como un proceso que determina el nivel de desarrollo de habilidades, conocimiento y actitudes [21]. De acuerdo con unos criterios previos, el modelo informa al estudiante sobre su proceso de avance, para que comprenda y autorregule su aprendizaje de acuerdo con los resultados de aprendizaje [22] .

Los resultados de aprendizaje permean todos los cursos que componen el programa. Algunas universidades usan esta escala de niveles de aprendizaje para mediar los resultados de aprendizaje declarados en sus programas: a) novato, b) aprendiz, c) bueno y d) experto. Siendo el nivel de experto en el cual el estudiante alcanza entre un 80 % y 100%, el nivel bueno entre el 51% al 79%, aprendiz del 21% al 50% y novato del 0% al 20% [23]. De acuerdo con lo anterior, es importante establecer una meta de aprendizaje en términos del nivel que se desearía o debería alcanzar, de manera que para efectos de este trabajo de investigación se formuló el interrogante siguiente ¿cuáles deberían ser las pautas o procesos necesarios para guiar al estudiante a alcanzar hacia dicho nivel?

El primer principio del modelo denominado **nivel de apropiación** busca orientar los procesos necesarios para que el estudiante alcance un nivel de experto. Este se fundamenta en los siguientes elementos [24]: ambiente válido, experiencias frecuentes, retroalimentación a tiempo y práctica deliberada. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, las tecnologías de la electrónica e informática han desarrollado nuevas formas de aprendizaje, por lo que es importante articularlas al desarrollo del proceso de formación, así se describen algunos aspectos importantes a tener en cuenta [25]. La Fig. 2, describe estos aspectos.

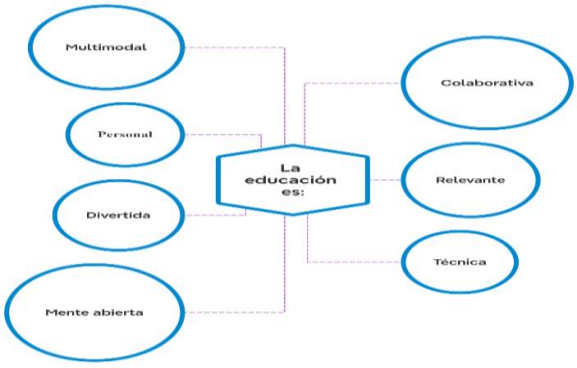


Fig. 2. Características de la educación.

Cada uno de estos adjetivos proporciona un énfasis o cualidad que se asocia a la educación, desde ser adaptable y personalizable ("Personal"), a ser inclusiva y atractiva ("De mente abierta" y "Divertida"), pasando por ser práctica y cooperativa ("Técnica" y "Colaborativa") [25].

El segundo principio es denominado **experiencias**. Este busca generar experiencias de aprendizaje únicas y memorables, que aumenten y motiven el desarrollo cognitivo del estudiante, a partir de la interacción con la tecnología y el trabajo colaborativo, en el marco de un aprendizaje contextualizado de las temáticas.

De igual forma, existen aspectos fundamentales del proceso de formación, tales como las metodologías, los recursos académicos, los agentes que participan en el proceso educativo y las interacciones entre estos. Es así como se construye el tercer principio denominado **innovación**, el cual está centrado en el estudiante y busca el desarrollo de relaciones armónicas entre los aspectos anteriormente descritos. La Fig. 3 ilustra el modelo

propuesto. A continuación, se describe la ruta de desarrollo correspondiente.

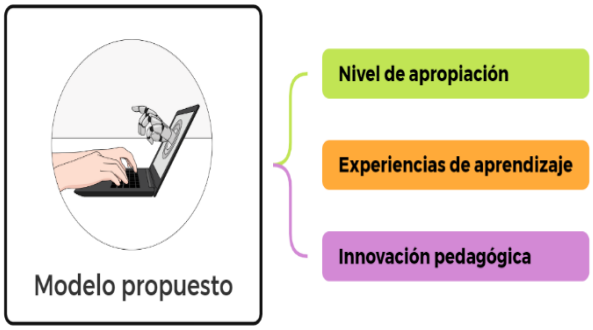


Fig. 3. Componentes del modelo propuesto.

C. Ruta de desarrollo.

Para la construcción del curso de Electrónica de Potencia, se procedió con los siguientes pasos:

1. Formulación de los resultados de aprendizaje esperados del curso.
2. Selección de un nombre impactante para la experiencia de aprendizaje.
3. Diseño e implementación de las experiencias de aprendizaje significativo, en las cuales se desarrollaron las siguientes preguntas desde el principio de innovación: ¿Qué metodologías son las más adecuadas para esta experiencia de aprendizaje significativa? ¿Qué recursos académicos serán necesarios para alcanzar el objetivo de la experiencia de aprendizaje significativo? ¿Qué agentes participarán de esta experiencia de aprendizaje y cómo interactuarán dichos agentes en ella?
4. Construcción de las actividades: las experiencias de aprendizaje significativo están conformadas por tareas o actividades con una duración no mayor a un mes. Para llevarlas a cabo, es necesario elaborar instrumentos de evaluación, establecer la modalidad de interacción (presencial, virtual o híbrida) con el estudiante y determinar los entregables de dichas actividades.
5. Desarrollo del principio de experiencias: es necesario escoger entre las distintas opciones posibles o combinaciones descritas en *Young Digital Planet* (multimodal, personal, divertida, técnica, mente abierta, colaborativa, relevante) [25].

Estos pasos permitieron guiar la construcción de las experiencias de aprendizaje desde los puntos de vista metodológico, tecnológico, colaborativo y sensorial. Sin embargo, el modelo propuesto también integra los siguientes ejes transversales a los principios descritos:

1. Añadir puntos de repetición en la temática a lo largo de la actividad, para lograr que el estudiante pueda afianzar lo aprendido, haciendo ejercicios, análisis de ejemplos, muy similares a los que se desean desarrollar.
2. Incluir espacios de retroalimentación oportuna a la evaluación del estudiante, donde se le pueda guiar en los aspectos que necesita reforzar para alcanzar la competencia y potencializar aún más las fortalezas que posee.
3. Posibilitar espacios de mejora de la competencia para que el estudiante que no pudo alcanzar determinado aspecto de la competencia pueda volver a practicar y entregar solo ese aspecto para ser evaluado nuevamente en un momento posterior.
4. Desarrollar entornos de retroalimentación dentro de las actividades para que los distintos agentes que participaron puedan dar sus impresiones y sugerencias para una mejora continua.
5. Iniciar la experiencia de aprendizaje concientizando al estudiante de que es el agente educativo con la mayor responsabilidad dentro del proceso formativo.
6. Asignar espacios al inicio y al final de cada experiencia que permitan evaluar conocimientos previos y posteriores, expectativas y opiniones.

En consonancia con lo anterior, se procede a la implementación en el curso propuesto.

D. Implementación en el curso de Electrónica de Potencia.

La implementación del modelo pedagógico en el curso de Electrónica de Potencia se articuló a través de tres experiencias de aprendizaje diseñadas para mejorar de manera progresiva el conocimiento teórico y las habilidades prácticas de los estudiantes. Un enfoque integral de evaluación basado en rúbricas permitió una valoración cuantitativa del saber, saber hacer, y saber ser de los estudiantes, alineando cada experiencia de aprendizaje a los resultados esperados del curso.

- Enfoque de evaluación basado en rúbricas
- Saber (conocimiento teórico):
- Saber hacer (habilidades prácticas):
- Ser (desarrollo personal y profesional):
- Retroalimentación personalizada

Las experiencias significativas desarrolladas fueron:

Primera Experiencia: "Conozcamos la Electrónica de Potencia": la cual se enfocó en conceptos básicos y competencias iniciales en Electrónica de Potencia.

Segunda Experiencia: "Diseñemos Equipos de Potencia": evaluación enfocada en el diseño y aplicación práctica de dispositivos y sistemas electrónicos de potencia.

Tercera Experiencia: "Pongamos en Marcha los Equipos": evaluación centrada en la aplicación real y la resolución de problemas mediante proyectos y análisis en contextos industriales.

Evaluación Global y Retroalimentación: la evaluación final integró los resultados de las tres experiencias, proporcionando una visión holística del progreso del estudiante en el curso. Los estudiantes, el cuerpo docente y las partes interesadas externas, como las empresas colaboradoras, recibieron informes

detallados de los resultados y el impacto del modelo pedagógico implementado. Se procede a continuación con el análisis de datos.

E. Análisis de Datos.

El análisis de datos se centró en evaluar la efectividad del modelo pedagógico implementado en el curso de Electrónica de Potencia. Se prestó especial atención a las dimensiones de saber, saber hacer y saber ser, con el objetivo de evaluarlo nuevamente siguiendo la estructura establecida por las rúbricas de evaluación. Este análisis permitió una valoración cuantitativa y cualitativa del impacto del modelo en el aprendizaje de los estudiantes.

Recopilación y preparación de Datos: las encuestas digitales administradas al inicio y al final de cada experiencia de aprendizaje no solicitaron datos personales, garantizando la confidencialidad de los participantes. Se recopiló información sobre:

- Autoevaluación de los estudiantes respecto a los objetivos de aprendizaje.
- Nivel de apropiación de las temáticas antes y después de cada experiencia.
- Aplicabilidad de los conocimientos adquiridos.
- Valoración del tiempo invertido fuera del aula.
- Motivación de los estudiantes antes y después de las experiencias.
- Sugerencias de los estudiantes para mejorar futuras implementaciones.

Las escalas de valoración de las encuestas permiten la identificación de 3 niveles de percepción de complejidad: NO= 3, No lo sé = 2, Si= 1, para la motivación, Alta= 3, Media = 2, Baja= 1 y para la percepción de capacidad, el valor 5 equivalente al 100% y 0 al 0%. La siguiente etapa propuesta es la metodología de análisis.

F. Metodología de Análisis.

Para el análisis de los datos se utilizó Microsoft Excel, desarrollando los siguientes componentes:

Tablas comparativas: Se crearon para visualizar la evolución del conocimiento de los estudiantes y la motivación a lo largo y la percepción de complejidad durante las experiencias. Esto permitió identificar tendencias, mejoras y áreas de oportunidad.

Análisis cuantitativo: Se calculó la variación promedio en la autoevaluación y las calificaciones, antes y después de cada experiencia. Esto ayudó a cuantificar el impacto del modelo pedagógico en el aprendizaje de los estudiantes. Además, se hizo un análisis de correlación entre las variables y el uso de regresión lineal simple de los datos provenientes de las notas.

Análisis cualitativo: Este análisis subrayó la contribución de las experiencias significativas al desarrollo académico y personal de los estudiantes.

Interpretación de resultados: Se interpretaron los datos en el contexto de los objetivos de investigación y el marco teórico establecido. El análisis buscó correlacionar las estrategias propuestas y los resultados para evaluar la efectividad del modelo propuesto, teniendo en cuenta las variables de saber, saber hacer y saber ser. Seguidamente se describe la fase de conclusiones.

G. Conclusiones.

El análisis de datos sugirió que el modelo pedagógico basado en experiencias significativas tuvo un impacto positivo en el aprendizaje de los estudiantes en el curso de Electrónica de Potencia. Las autoevaluaciones y evaluaciones, el aumento en el conocimiento teórico y práctico, así como la mejora en la motivación y la aplicación de lo aprendido, indican la efectividad del modelo. Los comentarios de los estudiantes proporcionaron *insights* valiosos para la refinación continua del modelo pedagógico propuesto durante el proceso de investigación. Finalmente, se concluye con la etapa de consideraciones éticas.

H. Consideraciones Éticas.

El estudio contó con la aprobación institucional y el consentimiento informado de todos los participantes, respetando su derecho a la confidencialidad y la posibilidad de retirarse de la investigación en cualquiera de sus fases desarrollo.

III. Resultados

Los resultados del análisis de variación en la percepción de los estudiantes son mostrados a continuación.

Como puede observarse en la Fig. *4*, la primera y segunda columna denominadas capacidad miden la percepción de capacidad de los estudiantes antes y después de la experiencia 1; la tercera y cuarta columna miden el nivel de motivación antes y después de la experiencia 2 y la quinta y sexta columna miden el nivel de percepción de complejidad antes y después de la experiencia 3.

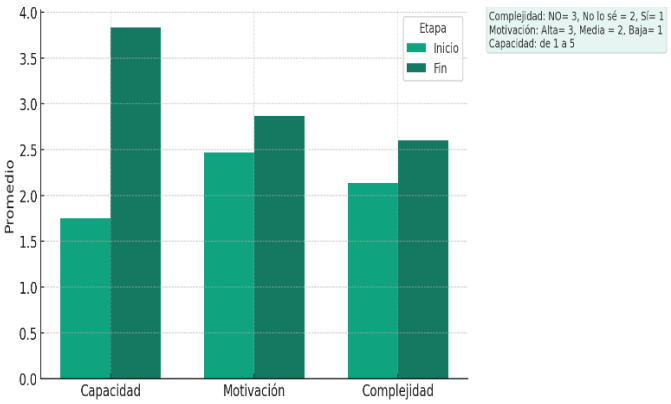


Fig. 4. Evolución de la percepción de los estudiantes durante la primera experiencia.

Luego de desarrollar las experiencias, los estudiantes aumentan su percepción de motivación y disminuyen la percepción de complejidad de la temática propuesta. Como puede observarse en la Fig. 5, es notable que la percepción de capacidad fue superior finalizar la experiencia.

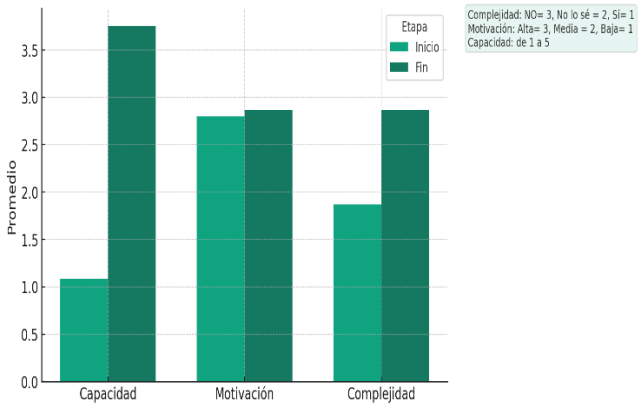


Fig. 5. Evolución de la percepción de los estudiantes durante la segunda experiencia.

En la Fig. 6, se puede apreciar que la percepción de no complejidad permanece casi constante entre la segunda y la tercera experiencia.

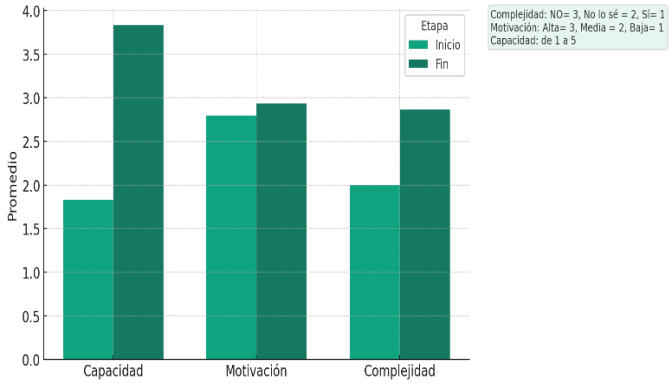


Fig. 6. Evolución de la percepción de los estudiantes durante de la tercera experiencia.

Finalmente, en la Fig. 7, se puede apreciar que los resultados de las evaluaciones académicas permanecen casi constantes en el tiempo con un ligero aumento en la tercera experiencia.

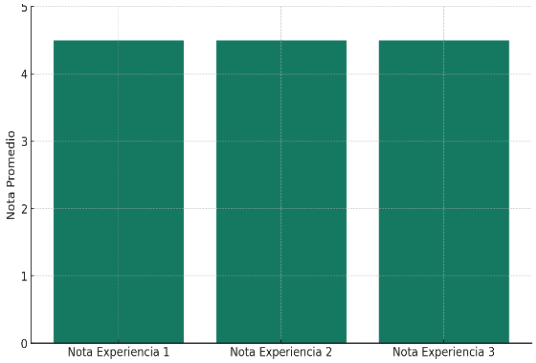


Fig. 7. Evolución de las evaluaciones (notas) desde la primera hasta la tercera experiencia.

En la experiencia 1, la percepción capacidad referente a las temáticas aumentó en promedio un 54.05%, indicando un crecimiento sustancial en la habilidad de los estudiantes para resolver las tareas o situaciones presentadas. Para la experiencia 2, esta percepción experimentó un aumento de 16.22%, en comparación con la experiencia 1, reflejando una mejora continua. En la experiencia 3, la percepción de capacidad subió en promedio un 55.23%, mostrando un crecimiento en esta variable, aunque no tan pronunciado como la diferencia entre la experiencia 1 a la experiencia 2.

En la experiencia 1, la motivación referente a las estrategias usadas aumentó en promedio 14.29%. En la experiencia 2 no se mostró un incremento en la motivación con referencia a la experiencia 1, lo que sugiere que los niveles se mantuvieron estables a lo largo de esta experiencia. Durante la experiencia 2, la motivación creció un 3.57%, lo cual representa un aumento leve, indicando una ligera reducción en el interés o el entusiasmo de los estudiantes respecto a las actividades propuestas en la experiencia. En la experiencia 3 se reflejó un aumento en la motivación del 1.75%, indicando una estabilización de la motivación de los estudiantes, después de desarrolladas las experiencias.

En la experiencia 1, la percepción de no complejidad referente a las estrategias usadas aumento en promedio un 11.54%. Esto significa que, en general, al final de la Experiencia 1, los estudiantes encontraron las tareas menos complejas en comparación con el inicio. Una interpretación de este cambio podría ser que, a medida que los estudiantes se familiarizaban con las tareas o adquirían habilidades relevantes, percibían las tareas como menos difíciles. En la experiencia 2, la percepción de no complejidad aumentó en un 34.48%, y un 22.94% con referencia a la experiencia 1. Este aumento sugiere que las tareas en la experiencia 2 fueron inicialmente percibidas como menos desafiantes, por lo que la mayoría de los estudiantes las encontraron considerablemente menos complejas al final. Finalmente, en la experiencia 3, en contraste con las experiencias anteriores, la percepción de no complejidad aumento un 28.57%, pero disminuyo un 6.0% con relación a la experiencia 2. Este cambio indica que, al contrario de las experiencias previas, las tareas en la Experiencia 3 fueron percibidas como más complejas hacia el final de la experiencia. Esta inversión en la tendencia sugiere que los desafíos presentados en la Experiencia 3 fueron significativamente mayores, o que requerían habilidades o conocimientos que los estudiantes encontraron más difíciles de aplicar o adquirir, resultando en una percepción superior de complejidad.

A. Análisis de Correlación.

El análisis de correlación muestra las relaciones entre las variables de percepción de capacidad, motivación, y la percepción de complejidad con las notas obtenidas por los estudiantes en cada experiencia. Algunas observaciones clave son:

El modelo propuesto muestra a través de las notas correlaciones positivas moderadas entre sí a través de las experiencias, indicando que los participantes que tienen notas altas en una experiencia tienden a tener notas altas en otras.

La complejidad muestra en general una correlación negativa con las notas, sugiriendo que mayores niveles de complejidad podrían estar asociados con notas más bajas. La motivación y la percepción de capacidad muestran patrones mixtos de

correlación con las notas, sugiriendo que la relación entre estas variables y el desempeño puede variar entre experiencias.

B. Análisis de Tendencia.

El modelo de regresión lineal aplicado a las notas promedio a lo largo de las tres experiencias indica una tendencia ascendente leve, con una pendiente de aproximadamente 0.033. Esto sugiere que, en promedio, hay un ligero aumento en las notas de una experiencia a la siguiente. Sin embargo, la magnitud de esta tendencia es pequeña, lo que implica que las variaciones en las notas entre experiencias son relativamente estables.

C. Discusiones preliminales.

Correlaciones: Las relaciones entre las variables de interés y las notas son complejas y varían entre experiencias. Especialmente la complejidad parece tener un impacto negativo en las notas, lo cual es una tendencia que merece atención en futuras experiencias.

Tendencia de notas: Aunque la tendencia general de las notas es ascendente, el cambio es mínimo, lo que indica que las experiencias están generando resultados consistentes en términos de evaluación.

Este análisis ofrece una visión general de cómo las diferentes variables se relacionan con las notas y cómo estas últimas evolucionan a lo largo de las experiencias. Podría ser útil realizar análisis adicionales o específicos basados en preguntas o hipótesis de interés particulares. Por otro lado, el 100% de los estudiantes declaró que el tiempo de trabajo autónomo o fuera del aula empleado por ellos, fue fundamental para la consolidación de cada experiencia. Este aspecto también podría se objetó de estudio de futuras investigaciones.

IV. Conclusiones

El estudio realizado para investigar el impacto de un modelo pedagógico basado en experiencias significativas en el aprendizaje de estudiantes de un curso de Electrónica de Potencia ha revelado hallazgos importantes. A través de un enfoque metodológico mixto que combinó análisis cualitativos y cuantitativos se ha podido demostrar una influencia positiva en varias dimensiones clave del aprendizaje estudiantil. En primer lugar, la autoevaluación de los estudiantes mostró un incremento notable, reflejando una mejora en la percepción sobre su capacidad y comprensión de los conceptos del curso, especialmente después de la primera experiencia de aprendizaje con un aumento promedio de 54.05% en la percepción de capacidad y la calificación promedio del grupo fue de 4/5, lo que equivale a un 90%. Además, se observó un avance significativo en los conocimientos teóricos y prácticos de los estudiantes, con un crecimiento promedio de 8.52% entre las distintas experiencias, en la percepción de capacidad, lo que resalta la efectividad del modelo en facilitar un aprendizaje complejo, profundo y aplicado. Por otro lado, los estudiantes reportaron una mayor percepción de capacidad para aplicar los conocimientos adquiridos en contextos prácticos, lo que indica la relevancia y el impacto positivo del modelo pedagógico en la preparación de los estudiantes para enfrentar situaciones reales. La motivación de los estudiantes también experimentó una notable mejora, particularmente evidente después de la primera experiencia, con un aumento del 14.29%. Este resultado sugiere que el modelo pedagógico no solo es eficaz en la mejora de las competencias académicas, sino que también contribuye significativamente a revitalizar el interés de los estudiantes en el aprendizaje.

Las experiencias de aprendizaje incorporadas en el estudio están enfocadas en actividades prácticas y colaborativas diseñadas para maximizar la motivación y el compromiso estudiantil. Corresponden a unidades didácticas diseñadas e implementadas con el objetivo de que los estudiantes apropien las competencias definidas en la carta del curso. Si bien se tuvieron en cuenta las temáticas propias del curso de “nombre del curso”, estas fueron integradas estratégicamente a las experiencias propuestas, que permitieron la formulación del modelo.

Estos hallazgos cuantitativos subrayan la efectividad del modelo pedagógico basado en experiencias significativas mediante el enriquecimiento de la experiencia de aprendizaje de los estudiantes. Sin embargo, es crucial reconocer las limitaciones inherentes al estudio, como el tamaño y la diversidad de la muestra y la ausencia de un grupo de control, lo que sugiere la necesidad de investigaciones futuras para validar y extender estos resultados a diferentes contextos educativos. La implicación práctica de estos resultados es clara: la implementación de modelos pedagógicos focalizados en experiencias de aprendizaje significativas y contextualizadas cuentan con un gran potencial para ser un enfoque efectivo para mejorar las competencias académicas y la motivación de los estudiantes. Investigaciones futuras podrían apuntar a validar el modelo en distintas disciplinas y niveles educativos, contribuyendo así a una comprensión más profunda sobre cómo optimizar el proceso de enseñanza-aprendizaje en la era contemporánea.

CONSIDERACIONES

Se obtuvo el consentimiento informado de todos los estudiantes, asegurando su comprensión y voluntad para participar. La confidencialidad y el anonimato se mantuvieron en todo momento para proteger la privacidad de los participantes, a quienes les fue garantizado el derecho de retirarse del estudio sin consecuencias.

REFERENCIAS

[1] A. Namoun and A. Alshanqiti, “Predicting student performance using data mining and learning analytics techniques: A systematic literature review,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 1. 2021. doi: 10.3390/app11010237.

[2] M. H. Dembo and M. J. Eaton, “Self-regulation of academic learning in middle-level schools,” *Elementary School Journal*, vol. 100, no. 5, 2000, doi: 10.1086/499651.

[3] S. A. Alwarthan, N. Aslam, and I. U. Khan, “Predicting Student Academic Performance at Higher Education Using Data Mining: A Systematic Review,” *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, vol. 2022. 2022. doi: 10.1155/2022/8924028.

[4] G. Rizakhojayeva, M. Akeshova, and G. Yussupova, "Update of the Master's Program on the Basis of Action Research Project: Academic Skills Development Issues in Theory and Practice," *Journal of Educational Sciences*, vol. 73, no. 4, 2022, doi: 10.26577/jes.2022.v73.i4.03.

[5] A. Rajvanshi and G. Mittal, "Active Learning Strategies for Teaching Research Skills to First-Year Design Students," in *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2021. doi: 10.1007/978-981-16-0119-4_26.

[6] A. Raj Sharma, M. Mandot, and J. Singh, "IMPACT ASSESSMENT OF INNOVATIVE LEARNING APPROACHES ON EDUCATION: A CRITICAL REVIEW," *Int J Adv Res (Indore)*, vol. 11, no. 05, pp. 989–995, May 2023, doi: 10.21474/IJAR01/16955.

[7] Z. Ahmad, M. Ammar, A. Sellami, and N. J. Al-Thani, "Effective Pedagogical Approaches Used in High School Chemistry Education: A Systematic Review and Meta-Analysis," *J Chem Educ*, vol. 100, no. 5, 2023, doi: 10.1021/acs.jchemed.2c00739.

[8] Dominic B. Micua, Ace M. San Gabriel, Ricky Boy M. Garcia, and Marinelle S. Domingo, "ENHANCING PHYSICAL EDUCATION LEARNING THROUGH MODERNIZED INTERACTIVE TEACHING APPROACHES: A STUDENT PERCEPTION AND ACADEMIC PERFORMANCE STUDY," *EPRA International Journal of Multidisciplinary Research (IJMR)*, 2023, doi: 10.36713/epra14165.

[9] C. M. Muwonge, U. Schiefele, J. Ssenyonga, and H. Kibedi, "Modeling the relationship between motivational beliefs, cognitive learning strategies, and academic performance of teacher education students," *South African Journal of Psychology*, vol. 49, no. 1, 2019, doi: 10.1177/0081246318775547.

[10] R. Star, A. Taylor, and I. Brent, "Learning With Dogs: An Exploration of Student Outcomes from a Canine-Assisted Experiential Learning Intervention," *Inquiry@Queen's Undergraduate Research Conference Proceedings*, vol. 17, no. 2, 2023, doi: 10.24908/iqurcp16749.

[11] A. Poonputta, "The Impact of Project-Based and Experiential Learning Integration on Pre-Service Teacher Achievement in Evaluation and Assessment," *International Journal of Learning, Teaching and Educational Research*, vol. 22, no. 7, 2023, doi: 10.26803/ijlter.22.7.19.

[12] A. L. Leal-Rodríguez and G. Albort-Morant, "Promoting innovative experiential learning practices to improve academic performance: Empirical evidence from a Spanish Business School," *Journal of Innovation and Knowledge*, vol. 4, no. 2, 2019, doi: 10.1016/j.jik.2017.12.001.

[13] Suliyanah *et al.*, "Literature Review on the Use of Educational Physics Games in Improving Learning Outcomes," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. doi: 10.1088/1742-6596/1805/1/012038.

[14] "A case study on the impact of technology integration on student learning outcomes at indus international school, bangalore," *International Journal of Development Research*, pp. 63411–63414, Aug. 2023, doi: 10.37118/ijdr.27045.08.2023.

[15] M. Ranieri, J. E. Raffaghelli, and I. Bruni, "Supporting Learning Design as a Driver for Pedagogical Innovation Within an Integrated Model of Faculty Development," 2019. doi: 10.4018/978-1-5225-8476-6.ch005.

[16] S. Ramaila and L. Mavuru, "Postgraduate Science Students' Impressions and Experiences of Online Pedagogical Practices: Implications for Technology-Enhanced Pedagogy," *International Journal of Learning, Teaching and Educational Research*, vol. 22, no. 1, 2023, doi: 10.26803/ijlter.22.1.7.

[17] A. M. Walder, "Pedagogical Innovation in Canadian higher education: Professors' perspectives on its effects on teaching and learning," *Studies in Educational Evaluation*, vol. 54, 2017, doi: 10.1016/j.stueduc.2016.11.001.

[18] A. M. Walder, "The relationship between discipline and innovation : A factor in professorial involvement in integrating pedagogical innovation 1 . The Disciplines : From Shared Innovation," *Science Journal of Education*, vol. 2, no. 4, 2014.

[19] J. Lahiassi, O. Elwarraki, S. Aammou, and Y. Jdidou, "Pedagogical innovations in personalized learning," in *Fostering Pedagogical Innovation Through Effective Instructional Design*, 2024. doi: 10.4018/979-8-3693-1206-3.ch015.

[20] B. Ghaedi, A. Gholtash, A. Hashemi, A. A. Mashinchi, I. Seyed, and A. Asghar Mashinchi -Assistant, "The Educational Model of Social Constructivism and Its Impact on Academic Achievement and Critical Thinking," *Journal of Education Experiences*, vol. 3, no. 2, 2020.

[21] D. M. N.N. Lopes Salles, V. Da Silva Lima Ribeiro, and V. R. Cunha Cancio, "Dignidade humana como ponte entre capacidades e direitos em Martha Nussbaum," *Revista Interdisciplinar de Direitos Humanos*, vol. 11, no. 1, 2023, doi: 10.5016/ridh.v11i1.229.

[22] J. A. García and S. Tobón, "Estrategias didácticas para la formación por competencias," *2009*, 2009.

[23] Universidad Pontificia Bolivariana, "MODELO-PEDAGOGICO," 2015.

[24] derek Muller, USA. *The 4 things it takes to be an expert*, (Aug. 02, 2022).

[25] Young Digital Planet SA, *The book of trends in Education 2.0*. 2015.

Acústica Musical: los alumnos frente al reto de realizar un proyecto personal

Ana M. Barbancho
Universidad de Málaga
ATIC Research Group
Málaga, Spain
abp@uma.es

Alberto Peinado
Universidad de Málaga
BIOSIP Research Group
Málaga, Spain
apeinado@uma.es

Isabel Barbancho
Universidad de Málaga
ATIC Research Group
Málaga, Spain
ibp@uma.es

Lorenzo J. Tardón
Universidad de Málaga
ATIC Research Group
Málaga, Spain
ltg@uma.es

Sergio Guillén
Universidad de Málaga
ATIC Research Group
Málaga, Spain
sergiogj@ic.uma.es

***Abstract*—Los alumnos de último curso de grado en menos de un año han de estar en disposición de buscar trabajo. Actualmente, la realización de proyectos personales resulta una gran carta de presentación para poder acceder a una entrevista de trabajo. Por ello, en la asignatura Acústica Musical, optativa de cuarto curso de la titulación Graduado en Ingeniería de Sonido e Imagen, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad de Málaga, se les ha propuesto a los alumnos la realización de un proyecto personal, que puedan añadir a su curriculum. En este artículo, se presentan tanto el planteamiento del proyecto personal, como los distintos resultados obtenidos por los alumnos. Asimismo, se analizan y comparan los objetivos docentes alcanzados con la realización del proyecto personal frente a las prácticas de laboratorio habituales. También se recogen las opiniones de los alumnos y los profesores, sobre el cambio de prácticas clásicas a la realización de proyectos personales.**

Keywords*—*Proyecto personal, Telecomunicación, Acústica Musical, Futuro profesional

I. Introducción

Actualmente, el mundo laboral se ha vuelto cada vez más competitivo y disponer de un grado universitario, aunque suele ser una condición necesaria para acceder a un puesto de trabajo cualificado, no es suficiente. Por ello, desde muchas universidades, se está trabajando en el concepto de portafolio o proyectos personales, de cara a mejorar la empleabilidad de sus egresados [1], [2]. Además, el concepto de creatividad, que muchas veces se encuentra sólo asociado al área de humanidades y bellas artes, se está incluyendo como competencia clave en las ingenierías [3]. Junto con esto, también en todas las escuelas de ingeniería se está en constante renovación de los planes de estudio que incluyen tanto cambios en los contenidos, como cambios en las competencias a alcanzar por los estudiantes [4].

Todos estos cambios, además de por la evolución rápida de las tecnologías y la adaptación al cambiante mundo laboral, también viene impuesto por las exigencias de las empresas tecnológicas. Cada vez más, las empresas valoran la realización de proyectos personales, cuya temática y tecnología estén directamente relacionadas con el puesto de trabajo a desarrollar [2]. Esto hace que los alumnos de último curso de grado, que en menos de un año han de estar en disposición de buscar trabajo, tengan que ir pensado en qué quieren trabajar, así como en su curriculum vitae.

Por ello, en la asignatura Acústica Musical [5], optativa de cuarto curso de la titulación Graduado en Ingeniería de Sonido e Imagen, de la Universidad de Málaga, se ha ofrecido a los estudiantes la posibilidad de escoger entre dos opciones, como parte de la evaluación continua: realizar las prácticas habituales asociadas a la asignatura o realizar un proyecto personal. En este artículo se presentan, tanto el planteamiento del proyecto personal, como los distintos resultados obtenidos por los alumnos. Asimismo, se analizan y comparan los objetivos docentes alcanzados con la realización del proyecto personal frente a las prácticas de laboratorio habituales. También se recogen las opiniones de los alumnos y los profesores, sobre el cambio de prácticas clásicas a la realización de proyectos personales.

La estructura de la comunicación es la siguiente: en el apartado II se describe el contexto en el que se desarrolla la experiencia. A continuación, en el apartado III, se describe el planteamiento de la actividad de proyecto personal. En el apartado IV se muestran los resultados obtenidos con los proyectos personales. Por último, en el apartado V se presentan las conclusiones extraídas de este trabajo.

II. Contexto

La Universidad de Málaga (UMA), cuenta con 21 centros y un número de alumnos por curso siempre superior a los 33000, desde 2018-19 hasta 2022-23, aunque la tendencia en el número de alumnos es decreciente (1000 alumnos menos en 5 años) [6]. En la Fig.1, se muestra la evolución de los alumnos matriculados en la UMA.

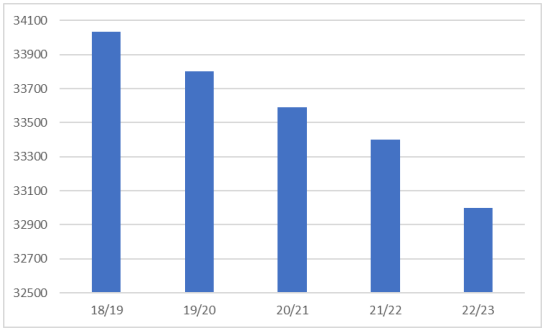


Fig. 1. Evolución de los alumnos matriculados en la UMA.

Este trabajo es parte del trabajo realizado por el grupo permanente de innovación educativa GPIE22-036, financiado por la Universidad de Málaga. La publicación es parte del proyecto PID2021-123207NB-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE. Este trabajo ha sido realizado en la Universidad de Málaga, Campus de Excelencia Internacional Andalucía Tech.

Los alumnos involucrados en este estudio están matriculados en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación; en concreto, en la asignatura Acústica Musical. Esta asignatura tiene una carga docente de 6 ECTS, lo que suponen 60 horas de clase presencial, distribuidas en 30 horas de clase teórica, 18 horas de prácticas, 6 horas de clases de problemas, 2 horas de presentaciones por parte de los alumnos y 4 horas de otras actividades (visitas a estudios de grabación, teatros, asistencias a conferencias, etc.). En la Fig.2, se presenta una comparativa de los alumnos matriculados en la ETSI de Telecomunicación de la UMA en los últimos cinco cursos junto con los matriculados en la titulación de graduado en ingeniería de sonido e imagen. En esta figura se ve como las tasas de matriculados en los últimos cinco años es bastante estable.

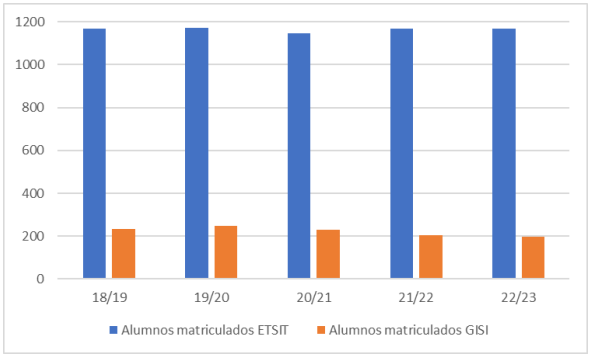


Fig. 2. Evolución de los alumnos matriculados en la ETSI de Telecomunicación de la UMA junto con los matriculados en la titulación de graduado en ingeniería de sonido e imagen (GISI).

En la Fig.3, se muestra la evolución de los alumnos matriculados, así como la relación entre alumnos aprobados y alumnos que abandonan la asignatura Acústica Musical. Es de destacar que tras el repunte de alumnos matriculados el año posterior a la pandemia (2020-2021), se va manteniendo el número de alumnos matriculados y, sobre todo, se está reduciendo el número de alumnos no presentados. Esto hace ver que a los alumnos la asignatura les resulta interesante, tanto por la descripción que aparece en la guía docente [5], como cuando asisten a clase. Teniendo en cuenta que el número de alumnos en la UMA y, en consecuencia, en todos los grados, está disminuyendo, la asignatura Acústica Musical, que es optativa, se puede considerar todo un éxito. Respecto a la distribución entre hombres y mujeres matriculados en la asignatura, el porcentaje es similar a los valores medios de la ETSI de Telecomunicación de la UMA [7].

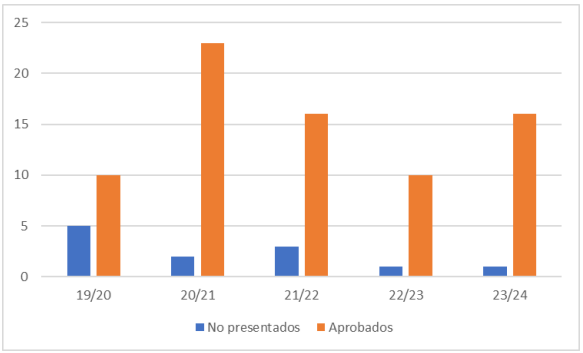


Fig. 3. Evolución de los alumnos matriculados en Acústica Musical, así como la relación entre alumnos aprobados y alumnos que abandonan la asignatura.

En la Tabla I, se recogen las razones que han ido exponiendo, en los últimos 5 cursos, en la encuesta inicial de evaluación de Acústica Musical a la pregunta "¿Por qué te has matriculado en esta asignatura?". A la vista de esta tabla queda claro que el perfil de los alumnos que se matriculan en Acústica Musical suele corresponder con alumnos que tienen interés por la música, ya sea porque han estudiado en el conservatorio, como porque quieren aprender conceptos de música para aplicarlos como graduados en ingeniería de sonido e imagen. Igualmente, les atrae la idea de ser una asignatura con un enfoque diferente.

TABLE I. RESPUESTAS DE LOS ALUMNOS DE ACÚSTICA MUSICAL A LA PREGUNTA: "¿POR QUÉ TE HAS MATRICULADO EN ESTA ASIGNATURA?"

- *Me quedan muy pocas optativas para acabar la carrera y todos mis compañeros que ya la han cursado hablan maravillas de esta asignatura.*
- *Me ha llamado la atención porque veo que puede ser muy aplicado a la realidad.*
- *Porque siempre me ha encantado la música y no he tenido la suerte de estudiar en un conservatorio, por lo que me parece una oportunidad para estudiar la música desde una perspectiva más física.*
- *Era la que me parecía más interesante a nivel de temario.*
- *Porque siempre he tenido mucho apego a la música, y creo que esta asignatura me va a ayudar a comprenderla mejor.*
- *Porque me parecía interesante.*
- *Me parecía bastante interesante y además me gusta todo lo relacionado con la música ya que he estudiado durante 10 años en el conservatorio.*
- *De las opciones disponibles, era la que más se encaminaba a lo que me gusta.*
- *Parece interesante y se estudia algo diferente, y que la acústica musical no se trata en otras asignaturas, además me dijeron que había un proyecto de crear un instrumento y eso está interesante.*
- *Me encanta todo lo relacionado con la música, y los instrumentos musicales.*
- *La acústica en general me apasiona.*
- *Porque tengo conocimientos sobre música y creo que me ayudarán de cara a afrontar la asignatura.*
- *Porque me interesa la acústica y quiero especializarme*

III. DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD PROYECTO PERSONAL

En la primera clase de la asignatura Acústica Musical, se les planteó a los alumnos que, en este curso 2022-23, de manera experimental se les iba a dar la oportunidad de elegir entre realizar las prácticas de laboratorio clásicas de Acústica Musical o realizar un proyecto personal de cara a su futuro profesional en el ámbito del sonido e imagen.

Las prácticas clásicas de la asignatura Acústica Musical son:

- Edición de partituras: Aprender a utilizar el programa MuseScore y, de manera opcional, crear una partitura nueva.
- Escalas Musicales: Sintetizar con Matlab [8], tanto para sonido de piano como de clarinete, las escalas cromáticas para las escalas de Aristógenes-Zarlino, Pitágoras, Temperamento Desigual y Temperamento Igual [9].

- Construcción y medición de un instrumento musical: Construir un instrumento musical analógico con el que se puedan interpretar, al menos, tres sonidos afinados diferentes. A continuación, grabar y caracterizar en tiempo y en frecuencia dichos sonidos.

Las prácticas solo requieren la entrega de una memoria en la que se contestan las preguntas planteadas en los guiones de realización de las mismas. Las prácticas se pueden realizar de manera individual o en grupo de no más de 3 personas.

Las directrices que se les dio para la realización del proyecto personal fueron:

- La temática tiene que tener relación con el audio y a ser posible con la acústica musical. Hay que consensuarla con el profesor coordinador de la asignatura.
- El proyecto ha de dejar algún tipo de enlace a algún repositorio web, para incluirlo en el curriculum vitae.
- Como proyecto personal, también vale la construcción de un instrumento musical novedoso, que incluya electrónica y que sea capaz de generar, al menos, tres sonidos diferentes. La documentación de la realización y funcionamiento del instrumento ha de ser un Instructable [10], redactado en inglés.
- Se puede fracasar en el intento, hay que arriesgarse. Se valorará de manera muy positiva un proyecto personal ambicioso, en el que se haya trabajado mucho, aunque al final no funcione o no se haya logrado el 100% del objetivo original.

El proyecto personal requiere la entrega de una memoria sobre el mismo, que puede ser directamente el enlace a la web o al Instructable. Además, hay que hacer una presentación en clase, a modo de clase magistral para que los compañeros aprendan los conceptos fundamentales de cada proyecto personal. El proyecto personal, se da la opción de hacerlo de manera individual o en un grupo de máximo 2 personas, en función de la envergadura del mismo.

A los alumnos se les dio un plazo de una semana para decidir si querían hacer las prácticas o el proyecto personal. A la semana el 100% de los alumnos había contestado eligiendo el proyecto personal.

IV. Resultados obtenidos

En este apartado se va a presentar, en el subapartado A, en primer lugar, los proyectos personales realizados por los alumnos. A continuación, en el subapartado B, se va a analizar si con los trabajos personales, así como su presentación en clase, los alumnos han cumplido objetivos similares a los de las prácticas clásicas de Acústica Musical. En el subapartado C, se recogen los comentarios de los alumnos sobre la realización de los proyectos personales.

A. Proyectos personales presentados por los alumnos

En total, entre los 16 alumnos que han cursado la asignatura el curso 2023-2024, se han presentado un total de12 proyectos personales diferentes, dado que 4 de ellos se han realizado por parejas. Todos los instructables se han incluido en la colección de Instructables titulada "*Musical Acoustic Student Projects*" [11]. En la Fig. 3, se presentan algunos de los proyectos de esta colección.

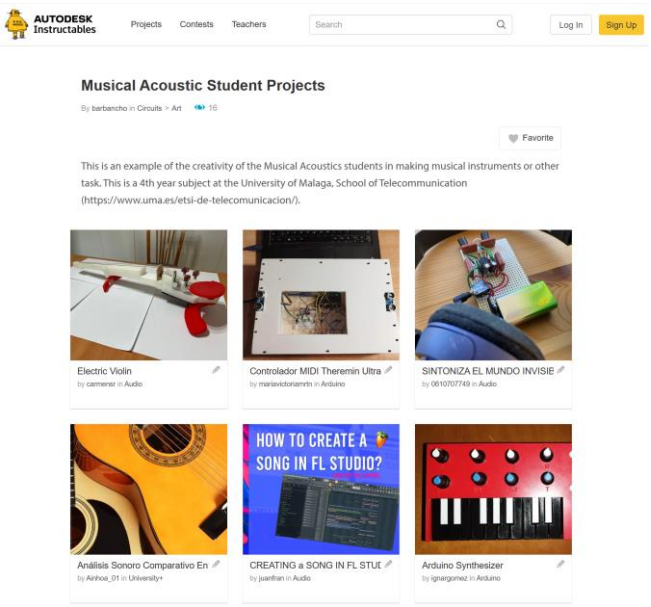


Fig. 4. Página web de la colección de Instructables titulada "Musical Acoustic Student Projects"[11].

A continuación, se van a exponer brevemente los resultados más relevantes de dichos proyectos:

- Creación de canciones en FL Studio. El trabajo ha consistido en un Instructable muy detallado, en el que se incluyen todos los pasos para crear y editar una canción en el FL Studio. Además, en SoundCloud se proporcionan las pistas de audio para poder tanto escucharlas como utilizarlas para hacer prácticas de edición.
- Sistema de generación de melodías aleatorias con Matlab. El alumno de este proyecto personal era la primera vez que se enfrentaba desde cero a realizar un proyecto con Matlab. Ha conseguido sintetizar melodías aleatorias de distintos compases. No ha generado ningún entregable web.
- Mesa de DJ. El proyecto personal ha consistido en exponer la evolución de las mesas de mezclas, así como presentar la suya propia, poniendo ejemplos de utilización. En general ha sido un proyecto con muchas deficiencias y no ha generado ningún entregable web.
- Composición y producción de la canción "Another Way". En este proyecto se ha explicado el proceso de composición, grabación y producción de una canción. Se ha compuesto la letra, los acordes y se han grabado todas las pistas en el estudio de grabación de la escuela. El entregable ha sido una web personal en la que se documenta todo el proceso y se proporcionan todas las pistas de audio.
- Trabajo sobre Radio Almargen. Han ido a la emisora de Almargen, han grabado un programa de radio que se ha emitido en Almargen y han aprendido todos los equipos que se utilizan en una radio. El entregable ha sido el audio del programa que está en la web de la emisora.

- Micrófono electromagnético. A partir de un diseño de micrófono para captar las radiaciones electromagnéticas de los dispositivos electrónicos, lo han construido. Con él, han ido grabando distintos dispositivos y luego lo han integrado en una pequeña composición. El entregable ha sido un Instructable.
- Análisis acústico comparativo de guitarra clásica y acústica. Este proyecto explica tanto las diferencias entre la guitarra clásica y la acústica como las distintas técnicas de grabación de guitarra. Se ha entregado un Instructable en español.
- AudioFeno: El proyecto personal ha consistido en la creación de una App, que sirve para limpiar el altavoz de los móviles. Este proyecto ha supuesto el estudio de las frecuencias necesarias para limpiar altavoces. La entrega ha sido un web en la que descargar la App.
- Pedal de fuzz. El proyecto personal consistía en la realización de una guitarra a partir de madera y cuerdas, así como la construcción de un pedal de fuzz. Al final no ha funcionado el pedal. El alumno ha demostrado durante todo el trimestre, muchísimo interés y trabajo. Quizas su problema es que ha trabajado solo. No ha realizado Instructable y solo ha entregado el pptx.
- Theremin ultrasónico. En este trabajo personal se ha construido un Theremin ultrasónico, que funciona correctamente e incluye botones para controlar Abletom. La entrega ha sido un Instructable muy detallado.
- Violín eléctrico. Este trabajo personal ha consistido en la impresión 3D de un violín, pero no se ha realizado demo debido a que tenía problemas para la afinación e interpretación. La entrega ha sido un Instructable.
- Sintetizador con Bela. Este proyecto personal, es la primera parte de lo que ha de ser un trabajo fin de grado. Se ha conseguido poner a funcionar el Bela y hacer síntesis substractiva con varias formas de onda. Se ha entregado un documento, dado que se quiere hacer un Instructable cuando el sistema esté completo.

En la Tabla II, se presenta a modo de resumen los títulos de los proyectos personales, junto con el número alumnos que han realizado cada proyecto y el tipo de entregable que se ha obtenido.

Para la calificación de los proyectos personales, se ha tenido en cuenta: calidad y dificultad del proyecto, cantidad de tareas realizadas para obtener el proyecto, presentación en clase y formato y calidad del entregable. Las calificaciones finales de los proyectos, sobre 10 puntos, han ido entre 7 a 10, siendo la media 8.75 puntos. Esto hace ver calidad de los proyectos desarrollados. Decir que no hay diferencia de género en las calificaciones obtenidas, es decir, no hay diferencia entre las notas obtenidas por los hombres que por las mujeres que han realizado los proyectos personales.

TABLE II. CARACTERÍSTICAS DE LOS TRABAJOS PERSONALES PRESENTADOS: TÍTULO, NÚMERO DE ALUMNOS Y TIPO DE ENTREGABLE

Título	Nº	Entregable
Creación de canciones en FL Studio	1	Instructable
Sistema de generación de melodías aleatorias con Matlab	1	Ficheros Matlab
Mesa de DJ	1	Power Point
Composición y producción de la canción “Another Way”	1	Web personal
Trabajo sobre Radio Almargen	2	Audio en la web de la emisora
Micrófono electromagnético	2	Instructable
Análisis acústico comparativo de guitarra clásica y acústica	1	Instructable
AudioFeno	1	Web donde descargar la App
Pedal de fuzz	1	Power Point
Theremin ultrasónico	2	Instructable
Violin eléctrico	2	Instructable
Sintetizador con Bela	1	Documento pdf

B. Análisis de los objetivos docentes cumplidos con los trabajos personales

En el análisis de los objetivos docentes cumplidos con los trabajos personales, se incluye que los alumnos han asistido a todas las presentaciones de los proyectos personales de sus compañeros y han participado activamente mediante preguntas y consejos. Los objetivos principales de las prácticas clásicas de Acústica Musical, se pueden resumir en los siguientes:

- Refuerzo de los conceptos teóricos impartidos en Acústica Musical (escalas musicales, física de los instrumentos).
- Aprender a utilizar software musical: MuseScore, como ejemplo de editor de partituras.
- Caracterización acústica de sonidos musicales.
- Aprender las dificultades de construir un instrumento musical de manera práctica.

Dada la gran variedad en las temáticas de los trabajos personales, puede parecer que los objetivos de las prácticas están alejados de los objetivos de los trabajos personales. Sin embargo, si se hace un análisis detallado de los objetivos y los trabajos se pueden extraer las siguientes similitudes:

- Refuerzo de los conceptos básicos impartidos en Acústica Musical. Dado que todos los proyectos han tenido un marcado componente musical, todos los estudiantes se han enfrentado al problema de generar sonidos afinados (desde el DJ que tiene que saber cómo mezclar la música hasta en la emisora de radio que han de mezclar voz con música). También se han tenido que enfrentar a la física de los instrumentos (los que han construido instrumentos de una forma y el proyecto de generación de melodías aleatorias, viendo cómo generar sonidos afinados de manera sencilla con Matlab, de manera que se parezcan a un instrumento).
- Aprender a utilizar software musical. Ciertamente, los alumnos no han utilizado en sus trabajos personales editores de partituras. Sin embargo, han utilizado software de edición musical profesional (FL Studio,

Abletom, etc.) con el que han demostrado que saben utilizar software profesional que no han aprendido en los estudios de grado. Es más, con la App AudioFeno, se ha aprendido a programar aplicaciones para móviles Android.

- Caracterización acústica de sonidos musicales. En todos los trabajos se han presentado distintas representaciones de los sonidos, desde señales en tiempo, señales en frecuencia y en todos los casos se ha demostrado que se entiende el significado de todas las herramientas de caracterización.
- Aprender las dificultades de construir un instrumento de manera práctica. Cada uno de los trabajos han tenido su dificultad y han tenido que resolver problemas prácticos, como el ir a un pueblo lejos de la capital para realizar un programa de radio.

Por lo tanto, se ve que se han cumplido todos los objetivos de las prácticas. Es más, se han conseguido incluir tres objetivos nuevos:

- Creatividad: Se ha permitido que los alumnos trabajen e investiguen sobre algo que les interese desde cero, viendo que la ingeniería es algo creativo.
- Reflexionar sobre su futuro profesional: La mayor dificultad para algunos alumnos ha sido decidir la temática del proyecto, dado que, aunque están en el último curso del grado, no tienen claro a que dedicarse profesionalmente.
- Empezar a tener un portafolio de proyectos a mostrar para poder buscar un trabajo adaptado a sus capacidades e intereses.

C. Opiniones de los alumnos y de los profesores sobre la realización de proyectos personales

Todas las opiniones recibidas por parte de los alumnos que han realizado el proyecto personal han sido favorables y recomiendan que se vuelva a realizar en Acústica Musical el curso 2024-25. También reconocen que es la primera vez en todos los estudios de grado en el que tienen la libertad de hacer algo que les interese de manera creativa y sin miedo a equivocarse. Otro comentario interesante ha sido que, a pesar de estar en el último curso del grado, no se habían planteado de manera seria su futuro profesional ni habían pensado en su curriculum vitae. Los alumnos reclaman poder realizar más actividades de este tipo en otras asignaturas, para sentirse mejor preparados para su futuro profesional.

Respecto a la opinión de los profesores es de destacar que, aunque en principio parecía una idea alejada de los planes de estudio o que pudiera llevar a que los alumnos no se la tomaran en serio, los resultados han demostrado que los proyectos personales pueden ser una gran herramienta docente. La mayor dificultad ha sido ayudar a los alumnos a elegir el tema y a tutorizar todos los trabajos, dado que cada uno era de un tema diferente. Sin embargo, la presentación de los trabajos y los comentarios de los propios alumnos hace ver que, aunque definiendo mucho mejor los objetivos y entregables, se trata de una actividad a consolidar.

V. CONCLUSIONES

De este trabajo se pueden extraer muchas conclusiones, que van desde la actitud de los alumnos y profesores frente a la realización de proyectos personales, como parte evaluable de una asignatura, así como del contenido y presentación de los proyectos realizados por los alumnos.

- Aunque en un primer momento a los alumnos les sorprendió la idea de realizar un proyecto personal, el 100% de los alumnos matriculados en Acústica Musical (asignatura de último curso de la titulación Graduado en Ingeniería de Sonido e Imagen en la ETSI de Telecomunicación de la UMA), han elegido la realización de un proyecto personal, frente a la realización de las prácticas clásicas de Acústica Musical.
- La mayor dificultad que han encontrado los alumnos ha sido la selección del tema del trabajo. Por una parte, les ha resultado difícil reflexionar sobre qué temática elegir y, otra parte, han tenido que adaptar el tema, de manera que fuera abordable, pero no algo demasiado sencillo.
- Los alumnos reconocen que, a pesar de estar en el último curso del grado, no tienen muy claro a qué se quieren dedicar profesionalmente. La elección del tema del trabajo personal ha sido un primer acercamiento serio hacia esta elección.
- La parte creativa de los proyectos ha sido también valorada muy positivamente por los alumnos, dado que es la primera vez en todos sus estudios universitarios que han podido elegir libremente el tema a investigar y profundizar.
- Los alumnos, en general, han recomendado que la actividad de proyectos personales en Acústica Musical se continúe en los siguientes cursos. También reclaman más actividades de este tipo en otras asignaturas.
- Se puede decir que los alumnos se han involucrado al 100% en los proyectos y han tratado de dar lo mejor de sí mismos. Esto se ha notado en la presentación que han realizado, así como en las calificaciones obtenidas en los proyectos. Es de destacar que el resto de compañeros han realizado preguntas sobre los distintos temas y se ha creado mucho diálogo entre todos los alumnos.
- En principio, los profesores pensaban que la realización de proyectos personales podría salirse de los planes de estudios o hacer que los alumnos no se lo tomaran en serio. Sin embargo, los resultados obtenidos hacen ver que son una gran herramienta docente.
- La mayor dificultad para los profesores ha sido el tener que tutorizar muchos trabajos con temáticas muy diferentes. Sin embargo, la presentación de los trabajos, así como los comentarios de los alumnos hacen ver que se trata de una actividad muy interesante que hay que consolidar.
- Respecto al análisis de los objetivos alcanzados con los proyectos personales frente a los objetivos de las prácticas clásicas de Acústica Musical, hace ver que

no sólo se han conseguido los mismos objetivos docentes, sino que se han visto ampliados y reforzados.

- Los nuevos objetivos docentes que se han incluido con los proyectos personales han sido: Creatividad, Reflexión sobre el futuro profesional y Creación de un portafolio de proyectos a mostrar para la búsqueda de trabajo.
- Dada la gran dispersión de temáticas y entregables de los proyectos que, aunque enriquecedora ha dificultado, en cierta medida, la evaluación y comparación de los proyectos, para otros cursos se plantea la elaboración de una guía para la realización de los proyectos personales más detallada.

REFERENCIAS

[1] S. Richerson, K. McAteer, M. Spencer and S. Scheibler, "A Portfolio Approach to Learning Professional Skills", 37th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference, 2007.

[2] M. Eliot and J. Turns, "Constructing Professional Portfolios: Sense-Making and Professional Identity Development for Engineering Undergraduates," Journal of Engineering Education, vol. 100, 2011, pp. 630-654.

[3] D. Bairaktarova and M. Eodice (Editors), Creative Ways of Knowing in Engineering, Springer, 2017.

[4] J.E. Mitchell, A. Nyamapfene, K. Roach and E. Tilley, "Faculty wide curriculum reform: the integrated engineering programme", European Journal of Engineering Education, vol. 46, no. 1, pp. 48-66, 2021.

[5] E.T.S.I. de Telecomunicación, "Programación docente. Curso académico 2023-24", E.T.S. de Ingeniería de Telecomunicación, 2023.

[6] UMA, portal de transparencia, https://www.uma.es/portal-de-transparencia-universidad-de-malaga/info/120015/datos-de-matriculacion/ (último acceso 01/04/2024)

[7] A. M. Barbancho, I. Barbancho, L. J. Tardón and A. Peinado, "Women in Telecommunications Engineering: Case Studies," in *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologias del Aprendizaje*, doi: 10.1109/RITA.2024.3381848.

[8] Matlab, https://es.mathworks.com/ (último acceso 04/04/2024)

[9] A. Hernando, El papel de la afinación musical en la historia de la música. Música, matemáticas y cambio científico desde los pitagóricos a Francisco de Salinas, Universidad de Burgos, 2019.

[10] Instructrables, https://www.instructables.com/ (último acceso 04/04/2024)

[11] Instructables, colección "Musical Acoustic Student Projects", https://www.instructables.com/Musical-Acoustic-Student-Projects/ (último acceso 04/04/2024)

Uso de Arduino en Prácticas de Instrumentación

Jorge Herrera Santos
E.T.S. Ingeniería Industrial
Universidad de Salamanca
Béjar, Spain
0000-0002-0236-4321

Raúl Muñoz Sánchez
E.T.S. Ingeniería Industrial
Universidad de Salamanca
Béjar, Spain
0000-0002-9272-5388

Federico López Simón
E.T.S. Ingeniería Industrial
Universidad de Salamanca
Béjar, Spain
fedels@usal.es

Miguel Ángel Vega Barroso
E.T.S. Ingeniería Industrial
Universidad de Salamanca
Béjar, Spain
id00811477@usal.es

Esteban Sánchez Hernández
E.T.S. Ingeniería Industrial
Universidad de Salamanca
Béjar, Spain
0000-0003-1341-8767

***Abstract*—Se presenta un programa de prácticas de la asignatura "Sistemas Electrónicos e Instrumentación Industrial" del Máster Universitario en Ingeniería Industrial (MUII). El uso de Arduino permite conseguir un programa completo de prácticas de bajo coste para trabajar con distintos tipos de sensores, estudiar buses de comunicaciones como SPI o I2C y comunicaciones LoRaWAN en aplicaciones de internet de las cosas (IoT). Se ha completado con el análisis previo de una célula de carga mediante una simulación por elementos finitos en la asignatura "Complementos de Ingeniería Mecánica". Los resultados de la asignatura han sido muy satisfactorios, permitiendo que los estudiantes adquieran experiencia no solo con sensores sino con el diseño de un sistema empotrado completo, con distintos buses de comunicaciones internas y conectividad externa en un enfoque multidisciplinar.**

Keywords—Arduino, Instrumentación, IoT, LoRaWAN, Elementos Finitos.

I. INTRODUCCIÓN

La docencia de la Electrónica en el MUII plantea varios desafíos debido a la heterogeneidad en los perfiles de acceso al mismo y el escaso tiempo disponible para desarrollarla. En el caso de la Universidad de Salamanca, los estudiantes que acceden por grados distintos de Electrónica Industrial y Automática disponen de una asignatura de 4,5 ECTS donde se debe alcanza la competencia "Capacidad para diseñar sistemas electrónicos y de instrumentación industrial". De forma análoga, los estudiantes procedentes de los grados en Ingeniería Eléctrica y Electrónica deben cursar la asignatura de nivelación "Complementos de Ingeniería Mecánica", de 6 ECTS de duración, en la que se profundiza en el estudio de la Resistencia de Materiales y el análisis estructural frente a cargas de fatiga.

La instrumentación electrónica ha experimentado un gran desarrollo no solo por la evolución de los propios sensores sino por la mejora de las técnicas de acondicionamiento de señal gracias a una gran variedad de circuitos integrados específicos para cada tipo de sensor y/o medida, que proporcionan muy buenas prestaciones a un bajo coste. En paralelo, la eclosión de nuevas técnicas inalámbricas de transmisión de datos como LoRaWAN [1] potencia el concepto de internet de las cosas (IoT), permitiendo un mayor número de aplicaciones.

Se presenta un programa de prácticas sobre la base de la placa de desarrollo Arduino MKR1310. Esta placa está dotada de conectividad LoRaWAN, permitiendo comunicarse con una puerta de enlace o *gateway* ubicada a varios kilómetros de distancia para dar acceso a la nube y de esta manera transmitir los datos [2]. Una vez en la nube, mediante una plataforma se pueden gestionar los datos para su visualización, analítica o generación de informes. Se utilizan sensores y acondicionadores de señal de bajo coste en módulos que se conectan a la placa de desarrollo mediante buses como I2C o SPI. Mediante un analizador lógico de bajo coste se monitorizan los buses, comprobando de forma práctica el funcionamiento de los mismos.

Este programa de prácticas se ha coordinado con el de la asignatura "Complementos de Ingeniería Mecánica" para analizar la deformación de una célula de carga desde el punto de vista experimental y computacional. De esta manera se pretende complementar los conocimientos adquiridos por los estudiantes en la teoría con unas habilidades que les permitan comprender la materia y les capacite para poder construir y utilizar sistemas electrónicos similares a los que se utilizan en la industria [3].

La experiencia ha sido muy positiva, permitiendo abordar de una manera global e interdisciplinar desde la simulación mecánica del proceso físico que permite la medida en el propio sensor hasta el acceso a los datos en la nube pasando por el acondicionamiento de la señal y su digitalización, la transmisión de los datos a través de los buses de comunicación dentro del sistema y con redes de largo alcance hacia Internet. Se han identificado los puntos fuertes de las prácticas y las áreas de posible mejora de esta programación.

En la siguiente sección se expondrá el diseño del programa de prácticas de la asignatura dentro del Plan de Estudios. Partiendo de unos objetivos marcados, se detalla el hardware y software utilizado para presentar los resultados obtenidos en las prácticas y finalmente las conclusiones extraídas de esta experiencia docente.

II. DISEÑO DEL CURSO DE SISTEMAS ELECTRÓNICOS E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

A. La asignatura en el Plan de Estudios

La competencia específica de la asignatura "Sistemas Electrónicos e Instrumentación Industrial" es la siguiente "Capacidad para diseñar sistemas electrónicos y de instrumentación industrial". En cuanto a los resultados de aprendizaje, se plantea: "El estudiante deberá ser capaz de implementar soluciones basadas en hardware industrial estándar para aplicaciones de adquisición de datos e instrumentación comunes en la industria. Asimismo realizará la programación de los mismos utilizando herramientas industriales estándar. Finalmente se conocerán los fundamentos y el ámbito de aplicación de los sistemas empotrados".

Teniendo en cuenta las distintas vías de acceso, que se corresponden con los grados de las distintas ramas de la familia industrial, los estudiantes que acceden desde grados que tienen solo una formación básica de electrónica deben cursar la asignatura "Complementos de Electrónica y Automática". En ella se imparten conocimientos sobre amplificadores operacionales y de instrumentación, filtros, microcontroladores y conversión analógico/digital. Posteriormente cursan la asignatura que nos ocupa, con 4,5 ECTS asignados en 7 semanas y con los siguientes temas:

1. Introducción: conceptos básicos de medida y señales.
2. Acondicionamiento de señales.
3. Sistemas empotrados.
4. Redes de sensores inalámbricos.
5. Sensores.

Los estudiantes que tienen una formación de Grado específica en Electrónica y Automática cursan la asignatura "Sistemas Electrónicos y Automáticos" con 1,5 ECTS de Electrónica, debiendo cursar únicamente los temas 3 y 4. Estos estudiantes poseen una formación básica en Resistencia de Materiales, por lo que deben cursar obligatoriamente la asignatura "Complementos de Ingeniería Mecánica". Los contenidos de esta asignatura se centran principalmente en el estudio de la integridad estructural de componentes mecánicos frentes a cargas estáticas y de fatiga.

Aunque una programación estándar indicaría que el tema de sensores debería ir antes de los sistemas empotrados, el impartir este tema al final del curso junto con las redes de sensores limitaría la posibilidad de desarrollar el programa práctico y eventualmente asignar un trabajo final ya que se produciría una sobrecarga en la asignación de tareas a los estudiantes. La temporización propuesta plantea estos temas en las semanas 3 y 4 del curso permitiendo proponer un trabajo a los estudiantes de manera que se evita una sobrecarga de trabajo y facilita la coordinación con el resto de asignaturas.

B. Objetivos

Los objetivos que se plantean con este programa de prácticas son:

- Utilizar sensores de uso habitual, con especial atención a:
  - Fundamentos físicos de un tipo de sensor.
  - Acondicionamiento de señales
- Conocimiento de buses de comunicación, SPI e I2C.
- Comunicaciones en redes de sensores de largo alcance.
- Integración de datos en la nube.
- Diseño con sistemas empotrados.
- Coordinar la práctica con la asignatura "Complementos de Ingeniería Mecánica".

C. Programa de prácticas

El programa plantea prácticas en cinco sesiones de dos horas con un trabajo final:

- Medida de temperatura mediante RTD y comunicación SPI.
- Medida de temperatura, humedad relativa y presión con comunicación I2C
- Puente de medida de galgas extensiométricas en célula de carga.
- LoRaWAN: transferencia de datos con una plataforma en la nube, utilizando *The Things Network* (TTN).
- LoraWan: integración de plataformas de analítica IoT con TTN. Se utilizará ThingSpeak, de Mathworks.
- Como complemento a la práctica de galgas extensiométricas, se ha simulado el efecto de una carga estática conocida sobre el campo de deformaciones que experimenta una célula de carga en las zonas donde se ubican las galgas extensiométricas.

El trabajo final de la asignatura consiste en la realización de un sistema completo capaz de realizar medidas periódicas utilizando una de las tres placas de desarrollo y enviarlas periódicamente a través de LoraWAN para visualizarlas en un panel. Este panel se enlazará dentro de un hilo creado al efecto en el Moodle de la asignatura, de tal manera que todos los estudiantes pueden ver los paneles del resto de compañeros.

D. Materiales

Todo el programa de prácticas se desarrolla sobre la base del Arduino MKRWAN1300 ó MKRWAN1310 [4] (Fig. 1). Utiliza el procesador de 32 bit ARM Cortex-M0 SAMD21 y el módulo de comunicaciones Murata CMWX1ZZABZ junto con el chip de criptoseguridad ECC508.

Se valoró utilizar una placa de desarrollo basada en el procesador ESP32, muy económica y con conectividad Wifi, Bluetooth y pantalla OLED de 0,96 pulgadas, pero se descartó por la necesidad de desarrollar bibliotecas específicas para LoRaWAN, especialmente en lo relativo a la comunicación con la red TTN. Al requerir unos mayores conocimientos de electrónica y programación, esta placa consideramos que es más adecuada para el desarrollo de este programa de prácticas en una asignatura del Grado en Electrónica Industrial.

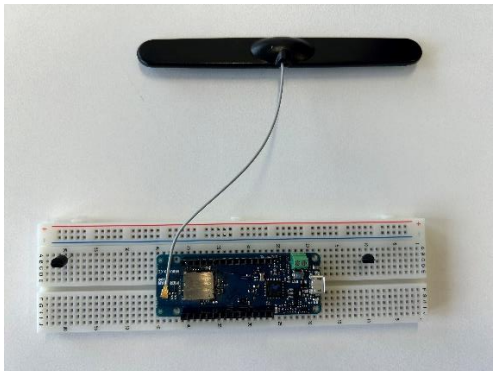


Fig. 1. Placa de desarrollo Arduino MKRWAN1300/1310

Para la monitorización de los buses de comunicación entre las placas de sensor y el Arduino se utiliza un analizador lógico de bajo coste (Fig. 2) compatible con el software Logic 2 de la empresa Saleae. Este analizador permite monitorizar 8 canales digitales a una frecuencia máxima de 20 MHz.

Fig. 2. Analizador lógico de bajo coste.

Para la realización de las prácticas, se dispone de los siguientes módulos:

- Acondicionador de sensores de temperatura resitivos RTD Adafruit [5]. Basado en el circuito integrado MAX 31865, permite la conexión de sensores Pt100 y Pt1000 en configuración de 2/3/4 hilos (Fig. 3). Este módulo se comunica mediante bus SPI.
- Módulo de medida de temperatura, presión y humedad relativa basado en el sensor Bosch BME 280 [6] (Fig. 4). Este módulo se comunica mediante bus I2C.
- Acondicionador de señal de galgas extensiométricas Seed Studio Grove ADC for Load Cell [7] (Fig. 5). Está basado en el sensor HX711 de AVIA Semiconductor, que permite conectar un puente de medida a un conversor sigma-delta de 24 bit y que utiliza comunicación serie.

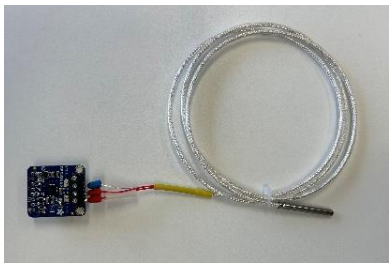


Fig. 3. Módulo de acondicionamiento de RTD Adafruit MAX31685 y Pt 100.

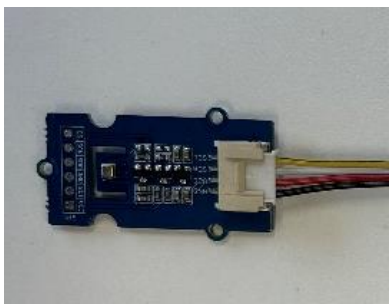


Fig. 4. Módulo de medida de temperatura, presión y humedad relativa Seed Studio Grove Barometer Sensor BME280.

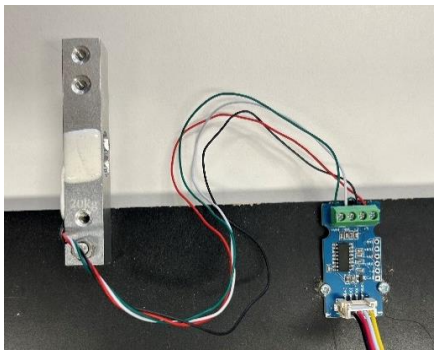


Fig. 5. Módulo de acondicionamiento de galgas extensiométricas Seed Studio Grove ADC for Load Cell HX711 y célula de carga

En la Tabla I se detalla el coste de los componentes utilizados, resultando en un coste aproximado de 90 € por puesto de prácticas.

TABLA I. DESGLOSE DE MATERIALES

Componente	Referencia	Coste Unitario
Circuito acondicionador ADC para PT100	Adafruit 3328 (MAX31865)	13.90 €
Termopar de Sensor de temperatura PT100	PT100 Type 1M	3.94 €
Sensor de parámetros ambientales	BME280 Grove	17.39 €
Circuito acondicionador ADC para celda de carga	Grove - ADC for Load Cell (HX711)	4.00 €
Celda de Carga 20 kg	Adafruit 4543 Strain Gauge Load Cell - 4 Wires – 20 kg	3.67 €
Analizador lógico	24 MHz 8 Canales	7.02 €
LoRaWAN	Arduino MKR1310	42.41 €
TOTAL		92.33 €

E. Software

Para la programación del Arduino se utiliza el entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino versión 2. Los programas de ejemplo facilitados por los desarrolladores de las tarjetas de acondicionamiento de sensores son suficientes para la realización de las prácticas de una manera ágil.

Para visualizar la comunicación se utiliza el software Logic 2 de la empresa Saleae [8]. Este software permite decodificar buses estándar como I2C o SPI y existen analizadores lógicos de bajo coste compatibles con el mismo.

Para las comunicaciones LoRAWAN se utiliza la plataforma web de TTN, que permite la configuración de las aplicaciones que acceden a la plataforma y los dispositivos físicos vinculados con cada aplicación, así como los servicios IoT que pueden intercambiar los datos con cada aplicación.

ThingSpeak es la plataforma de analítica en Internet de las Cosas (IoT) de Mathworks, con las herramientas de Matlab, entorno que es utilizado por los estudiantes.

La simulación del comportamiento mecánico de la célula de carga se ha realizado mediante el código de elementos finitos implícito Abaqus Standard 2018. Dada la simplicidad de la pieza, es posible realizar la práctica de simulación mediante la versión educacional gratuita.

III. DESCRIPCIÓN DE LAS PRÁCTICAS

Se presentará en esta sección la metodología seguida para la realización de las prácticas por parte de los estudiantes. Dado el perfil de los estudiantes y el tiempo disponible para el desarrollo de las prácticas, el trabajo a realizar por parte de los estudiantes es el de saber integrar los módulos disponibles utilizando herramientas de desarrollo de bajo coste y/o acceso libre.

A. Análisis de una célula de carga

Se ha diseñado un experimento en el que una célula de carga con forma de viga en voladizo se ve sometida a la acción de una carga estática conocida en su extremo libre (Fig. 5). A continuación, se realiza el mismo ensayo de forma virtual. Finalmente, se comparan los valores experimentales y numéricos del estado tensional de la viga.

Los estudiantes provenientes del Grado en Electrónica Industrial y Automática han sido los encargados de realizar la simulación de la célula de carga en la asignatura "Complementos de Ingeniería Mecánica" y han presentado en clase los resultados al resto de compañeros. En los próximos cursos se realizará esta simulación en dicha asignatura por parte de los estudiantes de los grados en electricidad y electrónica, y los estudiantes de mecánica realizarán esta práctica en el grado.

La geometría del modelo de elementos finitos de la célula de carga se ha generado mediante el preprocesador Abaqus CAE [9]. No se han tenido en cuenta detalles geométricos como las roscas de los taladros, ya que dificultan la elaboración de la práctica y no afectan al estado tensional en la zona de interés. Dado que la célula de carga está fabricada en aluminio, se considera que el material se comporta de forma elástica e isótropa. La pieza está anclada en un extremo, por lo que se han restringido los desplazamientos en el lado empotrado y se ha aplicado una carga estática sobre el extremo libre. Para evitar singularidades numéricas, en vez de aplicar una carga puntual sobre un único nodo, se ha distribuido sobre una pequeña superficie. El coste computacional del modelo es bajo, por lo que una vez discretizado mediante tetraedro lineales, se pueden obtener los resultados de los campos de deformaciones y tensiones en pocos minutos.

Los resultados indican que la parte superior de la célula de carga está sometida a tensiones de tracción, mientras que la parte inferior trabaja a compresión (Fig. 6). Se observa que la presencia de los dos agujeros centrales provoca una concentración de tensiones en la zona en la que se ubican las galgas extensométricas, lo que a su vez favorece la generación de una señal eléctrica más intensa. Las simulaciones permiten cuantificar el valor máximo de la carga que puede aplicarse sin que se supere el límite elástico del material. Para valores superiores, el material dejaría de comportarse de forma elástica y la relación entre tensiones y deformaciones dejaría de ser lineal, con lo que la medida experimental dejaría de ser válida.

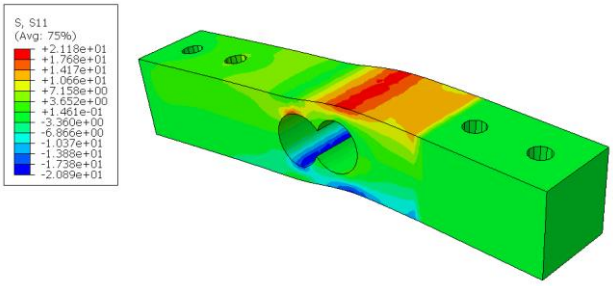


Fig. 6. Simulación mecánica de la célula de carga mediante el método de los elementos finitos. Se muestran en color rojo las zonas en las que las tensiones normales debidas a la flexión alcanzan valores máximos.

B. Prácticas con sensores

La dinámica de las prácticas se basa en la comprensión del funcionamiento de los módulos de acondicionamiento a través del uso junto con el módulo Arduino. Una vez realizado el montaje de la práctica y la programación del Arduino con el módulo sensor/acondicionador correspondiente, se comprueba su funcionamiento correcto. Seguidamente se procede a monitorizar la comunicación entre el módulo y el Arduino con el analizador lógico y el software Logic 2, como se muestra en la Fig. 7. Los cronogramas se comparan con el protocolo utilizado y con el cronograma del datasheet del circuito correspondiente. El programa ejecutado en el microcontrolador se revisa de acuerdo con el cronograma, permitiendo visualizar la comunicación de datos entre el módulo sensor/acondicionador y el microcontrolador. Finalmente, se explica el diagrama de bloques del circuito integrado en el que se basa el módulo de acondicionamiento de señal, permitiendo comprender la función de los distintos bloques que participan y que se han estudiado previamente en la asignatura como, por ejemplo: multiplexores, amplificadores de ganancia programable y conversores analógico-digital.

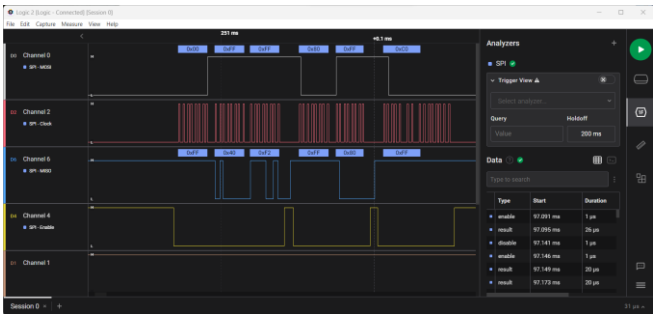


Fig. 7. Comunicación del sensor MAX31865 a través del bus SPI.

C. Comunicaciones LoraWAN e integración de datos en la nube

La evolución tecnológica ha facilitado la comunicación de los datos de los sensores, potenciando el concepto de Internet de las Cosas o IoT. La estructura actual se muestra en la Fig. 8, donde se muestra una serie de sensores conectados a un servidor en red a través de distintos concentradores de manera que se posibilita el intercambio de datos. Estos datos almacenados en el servidor, lo que se conoce generalmente como "nube". El gran éxito de este modelo radica en la

posibilidad de analizar los datos mediante diversas plataformas, adaptadas a la experiencia y necesidades del usuario.

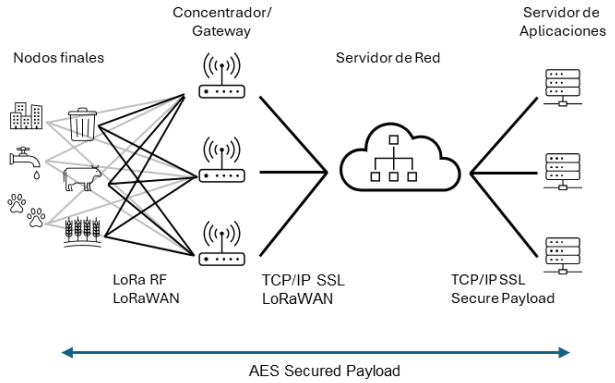


Fig. 8. Estructura de una red de sensores inalámbrica en el Internet de las Cosas utilizando The Things Network (TTN).

Esta práctica se realiza en dos sesiones. En la primera sesión se imparten los fundamentos de las comunicaciones de ancho de banda ultraestrecho y se presentan la tecnología LoraWAN y la plataforma TTN [10]. Se realiza la configuración del Arduino para su conexión a esta red y se configura la plataforma para dar de alta una aplicación y el registro de los dispositivos que tienen acceso a ella. En la segunda sesión se adapta un programa de comunicación para enviar los datos de una medida de temperatura realizada con el sensor LM35 a través de una entrada analógica. Posteriormente se realiza la configuración de la plataforma Thingspeak [11] para comunicar un dashboard con la aplicación creada en la primera sesión. De esta manera se comprende la arquitectura BackEnd/FrontEnd a través del uso de la plataforma TTN para la recolección de los datos en la nube y la plataforma Thingspeak para su presentación y analítica.

Finalmente, como tarea final cada estudiante deberá realizar de manera autónoma un sistema de medida IoT basado en cualquiera de los sensores utilizados para transmitir los datos a la nube y crear un panel frontal o dashboard accesible públicamente y que será enlazado en el Moodle de la asignatura.

IV. RESULTADOS

Este programa de prácticas se ha desarrollado desde el curso 2020-21 hasta el actual. En los cursos 2020-21 y 2021-22 se realizó un programa de prácticas de LoraWAN con un pequeño trabajo final consistente en realizar un panel o dashboard utilizando la plataforma AllThingsTalk el primer año y Thingspeak a partir del siguiente. En el curso 2022-23 se incorporaron el resto de prácticas y en el curso 2023-24 se realizó el análisis de la célula de carga mediante elementos finitos.

El último curso (2023-24) se ha realizado una encuesta con diez preguntas para valorar la actividad, mostrada en la Tabla II. Sin embargo, ningún estudiante ha respondido a la misma.

El número de estudiantes que cursan la asignatura "Sistemas Electrónicos e Instrumentación Industrial" ha sido de 9 estudiantes en los cursos 2020-21 y 2021-22, 15 en el curso 2022-23, y 5 en el 2023-24. Respecto a la asignatura "Sistemas Electrónicos y Automáticos", ha tenido 6 estudiantes en el curso 2022-23 y 2 en el curso 2023-24. Aunque solo se ha realizado una encuesta en el último curso y con nulo éxito, la realimentación que han transmitido estudiantes y egresados ha sido muy positiva ya que han trabajado con una tecnología que les era desconocida y con muchas posibilidades de aplicarla profesionalmente.

TABLA II. VALORACIÓN DE LAS PRÁCTICAS

Nº	Pregunta
1	Ha sido útil para fijar los conocimientos teóricos
2	Mejora la calidad del aprendizaje
3	Relaciona conocimientos nuevos con otros ya conocidos
4	Está relacionado con el campo profesional
5	Estimula el aprendizaje autónomo y reflexivo
6	Estimula a superar las dificultades del aprendizaje
7	Aumenta el interés en este curso
8	La dificultad y carga de trabajo es apropiada
9	El material es adecuado
10	En resumen, estoy satisfecho con estas prácticas

A partir de estas prácticas, los estudiantes han realizado varios trabajos fin de máster desarrollando aplicaciones IoT utilizando LoRaWAN. Por ejemplo, en [12] se desarrolló un sistema para medida de parámetros ambientales y control de riego.

V. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un programa de prácticas donde se trabaja desde la medición de magnitudes físicas en sensores hasta su presentación en un panel accesible desde internet. Para ello se realiza el acondicionamiento de la señal y su digitalización, la comunicación del módulo sensor/acondicionador con un sistema microcontrolador a través de buses como SPI o I2C y la comunicación del sistema con un servidor a través de redes de baja potencia y largo alcance.

De esta manera se realiza el prototipo de un sistema empotrado con capacidad de comunicarse con la nube para transmitir datos y recibir consignas. Con ello se consigue cubrir plenamente las competencias de la asignatura. La experiencia ha sido muy positiva según han manifestado los propios estudiantes, ya que se aplican los conocimientos con los que se trabaja en la parte teórica y consiguen realizar un sistema completamente funcional.

La simulación de la célula de carga mediante el método de los elementos finitos ha permitido analizar y comparar los resultados de las medidas experimentales con los de un modelo virtual, así como consolidar los conocimientos de los estudiantes sobre Elasticidad y su medida experimental.

Como ampliación de este trabajo se plantea la incorporación de nuevos sensores como un medidor de par de fuerza para simularlo de manera análoga a la célula de carga. Además, se profundizará en la comunicación de datos con la nube con la incorporación de una práctica sobre el protocolo MQTT.

También se plantea la incorporación de la práctica de la célula de carga a asignaturas del Grado en Ingeniería

Mecánica como “Ingeniería de Materiales” y “Vibraciones Mecánicas”, y la aplicación del acondicionador de galgas extensiométricas HX711 al estudio de estructuras más complejas. De la misma manera, se pueden incorporar estas prácticas al programa de la asignatura “Intrumentación Electrónica del Grado” en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

En definitiva, se ha conseguido realizar un programa de practicas completo con un enfoque multidisciplinar. El bajo coste de los materiales utilizados facilita una implementación ágil de este programa. Los resultados obtenidos abren la posibilidad de extender estas técnicas a otras asignaturas de los Grados en Ingeniería Mecánica e Ingeniería Electrónica Industrial y Automática.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al Vicerrectorado de Calidad y Enseñanzas de Grado de la Universidad de Salamanca por la concesión del Proyecto de Innovación Docente ID2023/229 “Mejora del aprendizaje en ingeniería a través de la coordinación de prácticas de laboratorio. Aplicación al estudio de una célula de carga mediante técnicas experimentales y numéricas” en la convocatoria 2023/2024.

BIBLIOGRAFÍA

[1] V. Bonilla, B. Campoverde, and S. G. Yoo, “A Systematic Literature Review of LoRaWAN: Sensors and Applications,” Sensors, vol. 23, no. 20. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), Oct. 01, 2023. doi: 10.3390/s23208440.

[2] A. M. Andueza Unanua, “Design of an Internet of Things project for electronic instrumentation training of industrial engineers,” in 15th International Conference of Technology, Learning and Teaching of Electronics, TAEE 2022 - Proceedings, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/TAEE54169.2022.9840535.

[3] P. J. Armstrong, “The Cdio Syllabus: Learning Outcomes For Engineering Education,” in Rethinking Engineering Education, Boston, MA: Springer US, pp. 45–76. doi: 10.1007/978-0-387-38290-6_3.

[4] “Arduino MKRWAN1310.” Accedido: Abr. 01, 2024. [Online]. Available: https://docs.arduino.cc/hardware/mkr-wan-1310/

[5] Adafruit, “MAX 31865.”

[6] Bosch Sensortech, “Humidity sensor BME 280.” Accedido: Abr. 01, 2024. [Online]. Available: https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280/

[7] Avia semiconductor, “HX711.” Accedido: Abr. 01, 2024. [Online]. Available: http://en.aviaic.com/detail/730856.html

[8] Saleae, “Saleae.” Accedido: Abr. 01, 2024. [Online]. Available: https://www.saleae.com/

[9] Dassault Systemes, “Abaqus/Standard.” Accedido: Abr. 03, 2024. [Online]. Available: https://www.3ds.com/products/simulia/abaqus/standard

[10] TTN, “The things network”, Accedido: Abr. 01, 2024. [Online]. Available: https://www.thethingsnetwork.org/

[11] Mathworks Inc. , “Thingspeak.” Accedido: Abr. 03, 2024. [Online]. Available: https://thingspeak.com/

[12] E. Sánchez Hernández et al., “LoRaWAN Applied to Agriculture: A Use Case for Automated Irrigation Systems,” 2022, pp. 308–316. doi: 10.1007/978-3-030-87687-6_29.

Automatización de un Banco de Pruebas para Caracterizar Convertidores Analógico-Digitales

Francisco J. Barrero Serrano
Dpto. de Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
fbarrero2000@gmail.com

Jose María Hinojo Montero
Dpto. de Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
jhinojo@us.es

Fernando Muñoz Chavero
Dpto. de Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
fmunoz@us.es

Manuel A. Perales Esteve
Dpto. de Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
mperales@us.es

***Abstract*— Los convertidores analógicos-digitales (CAD) son componentes esenciales en el desarrollo de cualquier sistema electrónico. Sin embargo, su integración práctica en el ámbito académico es reducida debido a la complejidad y alto coste económico de los sistemas de caracterización. Además, a estos factores se añade el tiempo a invertir en realizar las diferentes medidas necesarias para su caracterización completa. Por este motivo, el presente artículo describe un banco de pruebas automatizado para la caracterización de CAD haciendo uso de instrumentos de bajo coste. El propósito de esta herramienta es brindar a los alumnos la posibilidad de obtener de forma rápida y eficaz los principales parámetros que caracterizan un CAD para que puedan emplearlos en aplicaciones y/o proyectos reales; así como iniciarse en el diseño de bancos de medida automatizados.**

Keywords*— *Laboratorio remoto, convertidores analógico-digitales, caracterización de dispositivos.

I. Introducción

El escalado de la tecnología CMOS ha provocado un gran desarrollo tecnológico en los últimos años gracias a poder integrar un mayor número de dispositivos en un mismo sustrato, incrementando su complejidad y reduciendo su coste por área [1]. No obstante, la reducción de la longitud de puerta ha provocado que efectos secundarios, como puedan ser el mismatch entre transistores, las corrientes de fugas o la inmunidad al ruido, cobren gran relevancia. Además, la reducción de la tensión umbral de los transistores no es proporcional a la reducción de la tensión de alimentación, traduciéndose en una severa reducción del rango dinámico de los circuitos microelectrónicos analógicos. Estos efectos han provocado que el diseño de circuitos analógicos de altas prestaciones suponga un gran desafío. Sin embargo, la electrónica digital se ha visto claramente beneficiada por el escalado tecnológico, al no verse afectada por los problemas anteriormente descritos. Esto ha permitido mejorar la eficiencia energética de los circuitos, a la vez que su funcionalidad; habilitando el desarrollo de nuevos paradigmas de computación como puede ser el Internet de las Cosas o *Edge Computing* [2]-[3].

No obstante, estos sistemas digitales requieren interactuar con el mundo mediante la medición de señales analógicas. Por ello, en cualquier sistema electrónico moderno son fundamentales los convertidores analógico-digitales o CAD [4]. Los CAD son componentes omnipresentes y críticos en los sistemas electrónicos actuales, muestreando una amplia variedad de señales de tiempo continuo en aplicaciones como el audio, imágenes médicas, sonar, radar, guerra electrónica, instrumentación, electrónica de consumo y telecomunicaciones (terrestre y satélite). El gran número de señales continuas a digitalizar ha dado lugar a una variada selección de CAD en términos de arquitectura, resolución y tasas de muestreo [5].

Por tanto, a la hora de seleccionar un CAD, es imprescindible conocer y caracterizar sus características, entre las que se encuentran su resolución, exactitud, linealidad, velocidad de conversión o el nivel de ruido, para encontrar la arquitectura más adecuada para la aplicación concreta donde se debe integrar [6]. Esta caracterización experimental es un gran ausente en la enseñanza práctica de la electrónica, [7], que el presente trabajo pretende mitigar. Asimismo, a la hora de realizar dicha caracterización es importante seguir las convenciones establecidas por la industria, como puede ser el estándar IEEE 1241-2023 [8]. Esta normativa define una terminología común junto a los métodos que deben emplearse para evaluar un CAD. Este hecho permitirá a los estudiantes familiarizarse con los términos y magnitudes, así como los procedimientos definidos. En este contexto tecnológico, la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, que cuenta con una amplia tradición de más de 50 años en la formación en electrónica, y desarrolla una labor profusa y actual en el ámbito investigador [9]-[13]

El trabajo que se presenta en este documento es un ejercicio práctico de implementación de un banco de pruebas para la evaluación y caracterización de CADs. Se trata de un trabajo de fin de grado (TFG) desarrollado por un alumno del Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación de la Universidad de Sevilla, que le ha permitido profundizar en los conocimientos adquiridos a lo largo de su trayectoria académica. En la Sección II, se describe el sistema desarrollado. Posteriormente, se detallan las características principales que se van a obtener relacionadas con el CAD (Sección III), así como los resultados obtenidos al aplicar el sistema a un CAD de tipo Delta-Sigma que se utilizará como dispositivo bajo prueba (Sección IV). Las conclusiones alcanzadas se presentan en la Sección V.

II. Descripción del Banco de Pruebas

El TFG se ha centrado en el diseño e implementación de un sistema automático de caracterización remota de CAD haciendo uso de instrumentación básica y de bajo coste para su fácil adopción en asignaturas de instrumentación electrónica y/o de diseño de circuitos electrónicos.

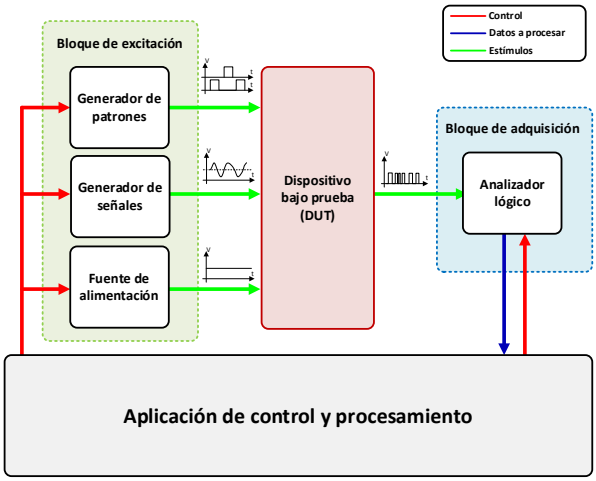


Fig. 1. Banco de pruebas desarrollado: esquema funcional

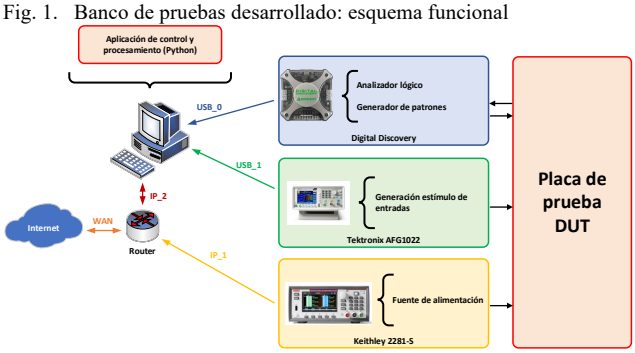


Fig. 2. Banco de pruebas desarrollado: interconexión de la instrumentación electrónica empleada.

El sistema consta de tres bloques. El primero de ellos se corresponde con el bloque de excitación, que está compuesto por una fuente de alimentación, un generador de patrones y relojes y un generador de señal. Este bloque se encarga de alimentar el DUT y generar las señales de excitación requeridas. El segundo elemento, denominado bloque de adquisición, monitoriza y registra la salida digital generada por el DUT para su posterior procesamiento. Es importante, que los datos adquiridos por este bloque estén sincronizados con la señal de muestreo. Finalmente, el tercer y último bloque se corresponde con la aplicación de control, desarrollada en lenguaje Python. Esta se ejecutará en un ordenador personal y es la responsable de controlar la generación de los estímulos de entrada y adquirir las salidas generadas por el DUT. Además, se encarga de procesar los datos adquiridos para extraer las principales características del CAD bajo estudio. La Fig. 1 muestra un diagrama de bloques que refleja la interconexión de estos tres bloques.

A. *Instrumentación Electrónica*

A continuación, se van a describir las principales características de los instrumentos electrónicos seleccionados (Fig. 2). Estos equipos se han seleccionado debido a que permiten su control de forma remota y son equipos básicos que pueden encontrarse en un laboratorio de instrumentación electrónica para fines docentes.

1) Fuente de alimentación

Se ha utilizado el modelo Keithley 2281-S, con capacidad de generar tensiones de salida en DC programables de hasta 20 V con bajo ruido con incrementos tan bajos como 100 µV. Además, permite monitorizar y registrar, de forma simultánea, el consumo de corriente del dispositivo bajo pruebas con una resolución en la medida de hasta 6½ dígitos. Además, este equipo es compatible con el estándar VISA para su control remoto [14]. Para este fin, el equipo presenta una interfaz de comunicación Ethernet.

2) Generador de señal arbitario

Se ha hecho uso del modelo Tektronix AFG1022 [15]. Este generador de señal incluye dos canales y presenta un ancho de banda de 25 MHz. Además, permite generar señales con una amplitud de salida de hasta 10 Vpp, con una distorsión y ruído bajos. Estos valores validan su uso para caracterizar un elevado número de CADs comerciales. Además, al igual que en el caso anterior, el equipo ofrece la posibilidad de ser gobernado de forma remota a través del protocolo VISA. Para este fin, el equipo incorpora una interfaz USB que debe conectarse al equipo anfitrión.

3) Multi-instrumento Digilent Digital Discovery (DDD)

Este instrumento electrónico, fabricado por la compañía Digilent, se trata de un dispositivo de medida muy versátil ya que integra las funcionalidades de diferentes instrumentos de medida y generación en un mismo dispositivo de tamaño reducido y de bajo coste [16]. Cabe indicar que este equipo puede actuar, de forma simultánea, como analizador lógico (dispone de 24 canales de adquisicion con una frecuencia máxima de muestreo de hasta 800 Msps), analizador de protocolos (permite interpretar los principales protocolos empleados en electrónica como puede ser I2C, SPI, UART, CAN, etc.) y/o generador de patrones (puede gestionar hasta 16 canales CMOS con una tasa máxima de muestreo de 100 Msps). Además, es posible configurar sus pines como entradas y salidas digitales de propósito general. En el caso de las salidas digitales, estas pueden configurarse como drenador o fuente abierto, triestado o push-pull. Este dispositivo presenta una interfaz de comunicación USB.Para su programación, el fabricante facilita un conjunto de herramientas de desarrollo que permiten crear soluciones de software personalizadas para su manejo y control desde un ordenador personal. Este conjunto de herramientas, denominado WaveForm API SDK, está disponible para diferentes lenguajes de programación, lo que facilita notablemente su uso e integración.

B. *Aplicación de control*

La aplicación de control y procesamiento se corresponde con el programa implementado para regular las condiciones operativas del convertidor durante la ejecución del banco de prueba, así como la adquisición y posterior procesamiento de datos con el fin de caracterizar el CAD. Por tanto, permite al usuario ajustar parámetros claves como son la frecuencia de muestreo, el rango de frecuencias a evaluar o la tensión de alimentación y de referencia del CAD. Además, permite monitorizar el consumo de corriente del convertidor analógico-digital con el objetivo de obtener una estimación realista.

La aplicación se ha desarrollado en el lenguaje de programación Python y hace uso de PyVISA y la API suministrada por el fabricante Digilent. Cabe destacar que el dispositivo que ejecute la aplicación debe estar conectado al mismo segmento de red que la fuente de alimentación y debe tener acceso al multi-instrumento DDD y al generador de señal arbitrario a través de sus puertos USB.

La aplicación se organiza en tres grandes bloques, según el diagrama de flujos indicado en la Fig. 3. A continuación se detallan cada uno de estos bloques.

1) Configuración de los instrumentos del banco de medida.

Este primer bloque es el responsable de generar los estímulos de excitación del CAD bajo prueba y configurar adecuadamente cada instrumento. En concreto, el primer paso consiste en generar la señal de reloj de muestreo y, en caso de ser necesario, las fases de control del CAD; así como el espacio de muestras a tomar. Este espacio es definido por el usuario y se corresponde con la variación de la amplitud y frecuencia de la señal de entrada. Para dar mayor versatilidad a la herramienta, el usuario establece los valores máximo, mínimo y el número de puntos a tomar.

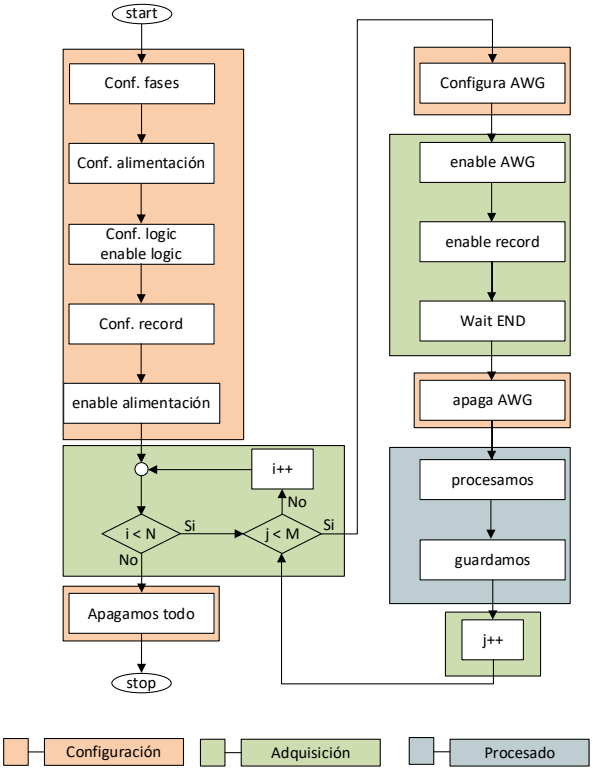


Fig. 3. Diagrama de flujo asociado a la herramienta de control y procesamiento desarrollada.

A continuación, se establece la tensión de alimentación del dispositivo y se fijan los límites de corriente y tensión necesarios para garantizar la integridad del DUT, en caso de fallo. Tras ello, se procede a configurar el analizador lógico, de acuerdo a los parámetros introducidos por el usuario. En este punto, se define también el tamaño de la ventana de muestreo. Finalmente, si todos los pasos anteriores no han generado ningún error, se procede a activar la salida de la fuente de alimentación para iniciar el proceso de adquisición.

2) Adquisición de datos del CAD.

Este segundo bloque es el responsable de ejecutar el espacio de muestras creado por el bloque anterior. Para ello, por cada valor de amplitud seleccionado por el usuario, se hace un barrido de las frecuencias especificadas. En consecuencia, el proceso de adquisición consiste en configurar el generador de señal con los valores iniciales de amplitud y frecuencia. A continuación, se habilita la salida del canal 1 y/o 2, dependiendo de si la entrada del CAD bajo estudio es *single-ended* o diferencial, y se espera un valor fijo con el propósito de que el sistema se encuentre en un régimen permanente de operación. Transcurrido este tiempo, se procede a registrar la salida del CAD. La duración de este proceso depende de la ventana de muestreo seleccionada por el usuario. Por último, una vez adquiridos todas las muestras, se desactivan las salidas del generador de señal para evaluar la salida obtenida y registrar los datos resultantes.

Este proceso se repite para cada valor de amplitud seleccionado por el usuario hasta completar todos los puntos del espacio de muestreo.

3) Almacenamiento y procesado de los datos adquiridos.

El último bloque que compone la aplicación desarrollada se centra en el procesado y registro de los datos adquiridos. Para ello, se estima la densidad espectral de potencia de los datos obtenidos con el propósito de determinar la potencia del armónico fundamental, del ruido y la potencia de los armónicos segundo, tercero y cuarto. Nótese que para estimar la potencia del ruido, el algoritmo de procesamiento determina la ubicación del armónico fundamental y lo reemplaza por el valor medio del ruido en el ancho de banda especificado por el usuario.

Una vez se han extraído todos estos valores, se procede calcular la relación señal a ruido (SNR), señal a distorsión y ruido (SNDR), el rango dinámico libre de espúreos (SFDR) y el número de bits efectivos del convertidor analógico-digital bajo estudio (ENOB). Las ecuaciones (1) – (4) muestran las expresiones empleadas para calcular las magnitudes anteriores. En ellas, el término S representa la potencia del armónico fundamental, N corresponde a la potencia de ruido en el ancho de banda a estudiar, D es la contribución de los armónicos. Cabe resaltar que en el caso de la SFDR, se debe elegir el armónico con mayor potencia dentro de la banda de frecuencia de interés.

$$SNR\ (dB) = 20\log_{10}\left(\frac{S}{N}\right) \tag{1}$$

$$SNDR\ (dB) = 20\log_{10}\left(\frac{S}{N+D}\right) \tag{2}$$

$$SFDR\ (dB) = 20\log_{10}\left(\frac{S}{\max\left(HDx\right)}\right) \tag{3}$$

$$ENOB = \frac{SINAD - 1.763}{6.02} \tag{4}$$

III. CAD BAJO ANÁLISIS

A la hora de validar la herramienta propuesta en el presente artículo se ha utilizado el modulador Delta-Sigma presentado en [17]. Este se ha seleccionado debido a que los autores del trabajo disponen de su caracterización completa haciendo uso de instrumentación electrónica de alta precisión. Por tanto, permite establecer una comparativa del rendimiento del sistema propuesto. En esta sección se describirá brevemente el funcionamiento de este modulador.

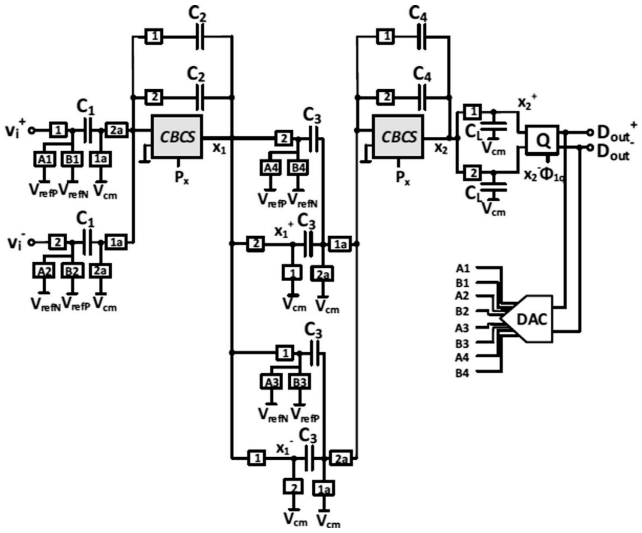


Fig. 4. Arquitectura interna del CAD, denominado SeP-D [17].

El modulador seleccionado hace uso la técnica Single - ended Processing Differential (SeP-D) presentada en [18]. La principal ventaja de este método es que permite procesar señales diferenciales con una cadena de procesamiento de tipo *single-ended*. Para ello, cada señal complementaria es procesada por la misma cadena en fases alternas de reloj. Este hecho permite conservar las ventajas del procesamiento diferencial a la vez que logra reducir los errores introducidos por el *mismatch* entre los componentes, ya que la cadena de procesamiento es la misma para cada señal. La Fig. 4 muestra la arquitectura interna del CAD. En ella, se puede observar como el primer integrador, compuesto por las capacidades C_1, C_2 y el bloque denominado CBCS procesa la entrada diferencial Vi. Para ello, durante la fase φ_1, se puede ver como la componente positiva de la señal de entrada se muestrea en la capacidad C_1 de dicha rama. Mientras tanto, la carga acumulada en la capacidad C_1 de la rama negativa durante la fase φ_2, se transfiere a la capacidad C_2 para su acumulación. El proceso contrario sucede cuando la fase φ_2 está activa. Por tanto, la salida del primer integrador, x_1, contendrá el valor negativo, Vo-, de la tensión salida durante la fase φ_1 y el valor positivo, Vo+, durante la fase φ_2. De igual forma, sucede con el segundo integrador, compuesto por el segundo bloque CBCS y las capacidades C_3 y C_4. La Fig. 5 muestra la temporización requerida por el presente modulador para su correcto funcionamiento, así como los datos esperados a la salida de cada uno de los integradores. En esta figura, X_1 y X_2 representan la salida del primer y segundo integrador, respectivamente, Dout+ y Dout- son la salida diferencial cuantizada del modulador Delta-Sigma y Dout,D+ y Dout,D- corresponden con una versión retrasada de la salida del cuantizador.

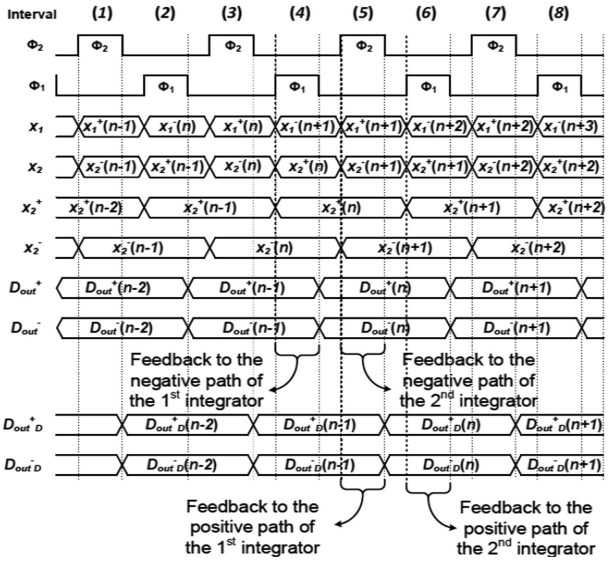


Fig. 5. Temporización asociada al convertidor analógico-digital presentado en [9].

No obstante, para el correcto funcionamiento del modulador Delta-Sigma empleado como DUT, es necesario generar, además de las fases φ_1 y φ_2, 5 fases adicionales (mostradas en la Fig. 4). Estas fases son $\varphi_{1,a}$ y $\varphi_{2,a}$- que corresponden con una versión avanzada de las fases $\varphi 1$ y φ_2 - , P1, P2, P3 y P4 - que actúan como fases de *preset* de los bloques CBCS – y φ_q. Esta última fase actúa como señal de control del cuantizador. Por tanto, la herramienta implementada, durante las fases de configuración, deberá ser capaz de generar todas estas señales y cargarlas en el generador de patrones que integra el instrumento DDD.

IV. Resultados Obtenidos

La evaluación de las prestaciones del banco de pruebas automatizado que se ha desarrollado es este trabajo se ha dividido en tres partes, relacionadas cada una de ellas con los bloques que componen la aplicación de control.

El primer grupo se ha enfocado en la presentadas en [17], permitiendo establecer una comparativa clara entre sendos resultados. Esta comparativa se muestra en las Fig. 9-11. Se aprecia de manera evidente que los resultados obtenidos coinciden de manera sustancial con los valores y hallazgos reportados en [17], no existiendo discrepancias significativas y obteniéndose resultados en consonancia con los establecidos en el documento de referencia.

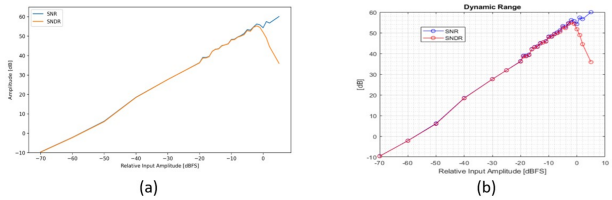


Fig. 6. SNR y SINAD obtenida por la herramienta desarrollada (a) y presentada en [17].

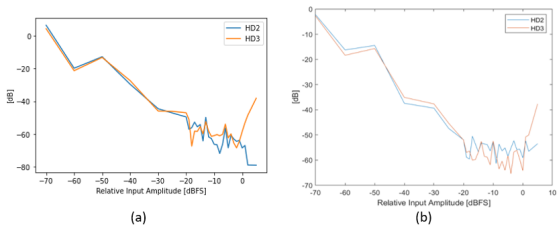


Fig. 7. Comparativa de los armónicos obtenidos en la herramienta desarrollada (a) frente a los obtenidos en [17] (b).

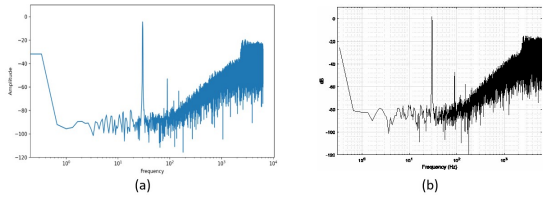


Fig. 8. Espectro obtenido por la herramienta desarrollada (a) frente al presentado en [17] (b), para una señal de entrada de 0 dBFS.

V. Conclusiones

Este trabajo se centra en el desarrollo de un sistema de caracterización automática de CAD, con capacidad para obtener sus parámetros típicos. Para ello, se ha desarrollado un banco de pruebas automatizado para la realización de ensayos formada por tres instrumentos de medida: el Digilent Digital Discovery (encargado de generar las señales de control, así como de registrar y almacenar las conversiones generadas por el CAD bajo estudio), la fuente de alimentación Keithley-Tektronix serie 2281S (que genera la tensión de alimentación del convertidor a medir) y el generador de funciones Tektronix AFG1022 (que genera las señales analógicas a convertir por el DUT). Todos los dispositivos mencionados son controlados remotamente mediante un programa desarrollado en Python que utiliza el estándar VISA para su gestión. Además, el programa desarrollado tiene la capacidad de imponer los patrones de señales de control del CAD mediante el Digital Discovery, procediendo a la lectura sincronizada del dato convertido, para lo que genera una señal adicional de sincronización o *trigger*. Los resultados obtenidos, que son almacenados en un fichero CSV, se procesan dentro del propio programa para obtener las características del convertidor, almacenándose nuevamente en el fichero CVS para su posterior revisión. El sistema desarrollado se ha validado comparando los resultados que ofrece con los presentados en un trabajo previo de investigación. Se espera que el desarrollo de este sistema permita extender la evaluación y el análisis de los convertidores a las clases impartidas por el Dpto. de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Sevilla en los diferentes Grados de Ingeniería de la ETSI.

Agradecimientos

Este trabajo es parte de los proyectos TED2021-129558B-C22 (financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación Agencia Estatal de Investigación de España MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y también por Unión Europea NextGenerationEU/PRTR) y PID2021-125189OB-I00 (financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE Ministerio de Ciencia e Innovación, Agencia Estatal de Investigación de España y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional).

Referencias

[1] M.H. Bhuyan, “History and Evolution of CMOS Technology and its Application in Semiconductor Industry,” SEU Journal of Science and Engineering, Vol. 11, pp. 28-42, 2017.

[2] M. Kavre, A. Gadekar, Y. Gadhade, “Internet of Things (IoT): A Survey,” 2019 IEEE Pune Section International Conference (PuneCon), Pune, India, pp. 1-6, 2019.

[3] W.Z. Khan, E. Ahmed, S. Hakak, I. Yaqoob, A. Ahmed, “Edge computing: A survey,” Future Generation Computer Systems, Vol. 97, pp. 219-235, 2019.

[4] H. Dalmia, K.S. Sanjeet, “Analog to digital converters (ADC): A literature review,” E3S Web of Conferences, Vol. 184, EDP Sciences, 2020.

[5] J. He, X. Tian, H. Wei, Y. Tian, B. He, “An overview of principles and types of ADC and DAC,” Journal of Physics: Conference Series, Vol. 2649, 2023.

[6] S. Rapuano et al., “ADC parameters and characteristics,” IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, vol. 8, no. 5, pp. 44-54, 2005.

[7] J. Díaz de Aguilar et al, “Characterization of an analog-to-digital converter frequency response by a Josephson arbitrary waveform synthesizer,” Meas. Sci. Technol., Vol. 30, 2019.

[8] "IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters," in IEEE Std 1241-2010 (Revision of IEEE Std 1241-2000) , vol., no., pp.1-139, 14 Jan. 2011, doi: 10.1109/IEEESTD.2011.5692956.

[9] F. Colodro, J.L. Mora, F. Barrero, M.R. Arahal, J.M. Martinez-Heredia, “Analysis and simulation of a novel speed estimation method based on oversampling and noise shaping techniques,” Results in Engineering, Vol. 21, 2024.

[10] D. Soto-Marchena, F. Barrero, F. Colodro, M.R. Arahal, J.L. Mora, “On-Site Calibration of an Electric Drive: A Case Study Using a Multiphase System,” Sensors, Vol. 23, Iss. 17, 2023.

[11] M.R. Arahal, F. Barrero, M.G. Satué, M. Bermúdez, “Fast Finite-State Predictive Current Control of Electric Drives,” IEEE Access, Vol. 11, pp. 12821-12828, 2023.

[12] M.G. Satue, M.R. Arahal, D.R. Ramirez, F. Barrero, “Multi-phase predictive control using two virtual-voltage-vector Constellations,” Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Vol. 20, Iss. 4, 2023.

[13] M.R. Arahal, F. Barrero, M. Bermúdez, M.G. Satué, “Predictive Stator Current Control of a Five-phase Motor using a Hybrid Control Set,” IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 11, Iss. 2, pp. 1444-1453, 2023.

[14] “Keithley Series 2281S battery simulator/emulator,” Keithley Series 2281S Battery Simulator/Emulator | Tektronix, https://www.tek.com/en/products/keithley/dc-power-supplies/2281s-series-battery-simulator-emulator (accessed Jan. 25, 2024).

[15] “AFG1000 arbitrary/function generator,” Tektronix, https://www.tek.com/en/products/signal-generators/arbitrary-function-generator/afg1000 (accessed Jan. 25, 2024).

[16] “Digital Discovery,” Digital Discovery - Digilent Reference, https://digilent.com/reference/test-and-measurement/digital-discovery/start (accessed Jan. 25, 2024).

[17] Elena Cabrera, “Performance enhancement in the desing of amplifier and amplifier-less circuits in modern CMOS technologies”, Tesis Doctoral, Julio de 2018.

[18] E. Cabrera-Bernal, F. Muñoz, A. Torralba, and C. Luján-Martínez, “Fully differential implementation of a delta-sigma modulator based on the pseudo-pseudo differential technique,” AEU - International Journal of Electronics and Communications, vol. 99, pp. 331–340, Feb. 2019. doi:10.1016/j.aeue.2018.12.002

Estrategia B-learning para la enseñanza de circuitos eléctricos

J.D. López
Facultad de Ingeniería
Universidad de Antioquia UDEA
Calle 70, No. 52-21 Medellín, Colombia
josedavid@udea.edu.co

A. Quintero-Zea
Escuela de ciencias de la vida y medicina
Universidad EIA
Envigado, Colombia
andres.quintero27@eia.edu.co

A. Sucerquia
angels1031@gmail.com

N. Mercado
Facultad de Ingeniería
Universidad de Antioquia UDEA
norman.mercado@udea.edu.co

***Resumen*—En su mayoría, los cursos introductorios de circuitos eléctricos siguen tópicos y estrategias de enseñanza similares. En estos cursos, se ha aceptado ampliamente el uso de herramientas de simulación para mejorar el proceso de aprendizaje. Sin embargo, hay pocos casos reales de aprendizaje mixto (*b-learning*) donde las sesiones presenciales se complementen con plataformas educativas. Este artículo propone una estrategia mixta basada en solución de problemas para enseñar circuitos eléctricos en el dominio del tiempo. El caso de estudio consiste en sistemas equivalentes masa-resorte-amortiguador de segundo y cuarto orden. La componente presencial se enfoca en encontrar los equivalentes teóricos y su simulación. La componente virtual incluye material de refuerzo, ejercicios y trabajo en equipo para simular los circuitos con diversas herramientas (*Electronic Design Automation –EDA*). Esta estrategia se validó con 172 estudiantes utilizando 14 EDA. Mediante encuesta, se observó motivación, habilidades de trabajo independiente y deseo de expandir esta propuesta a otros cursos.**

***Index Terms*—B-learning, Curso de circuitos eléctricos, Software CAD.**

I. Introducción

La presencia ubicua de las Tecnologías de la Información y las Telecomunicaciones (TIC) brinda nuevas oportunidades e impone desafíos en la educación. Los paradigmas tradicionales de enseñanza y aprendizaje se han visto modificados por la integración de componentes virtuales en el currículo, que se han masificado durante la pandemia de COVID-19 y se han convertido en tendencia en la postpandemia [1]. Ello ha obligado a ajustar proyectos curriculares a estudiantes con diversas necesidades, estilos y ritmos de aprendizaje, en los que la interacción y el trabajo tanto autónomo como colaborativo pasan a ser factores de éxito en proyectos educativos soportados a través de plataformas educativas basadas en la web [2], [3].

En la actualidad, las universidades cuentan con al menos un sistema de gestión de aprendizaje (en inglés, learning management system o LMS), espacios virtuales de aprendizaje o herramientas de apoyo basadas en Internet. En el presente artículo, proponemos una estrategia mixta *b-learning* para generar experiencias académicas que favorezcan la aprehensión de los conceptos de análisis de circuitos eléctricos en el dominio del tiempo.

El artículo comienza planteando la estrategia propuesta, desde sus componentes de docencia directa (presencial u online) y de trabajo independiente respectivamente. La componente directa se apoya en programación y estrategias de inclusión de los estudiantes en las actividades del aula. La componente virtual incluye la profundización de conceptos mediante herramientas audiovisuales, evaluación mediante análisis teórico y uso de herramientas computacionales, y trabajo grupal seleccionando entre diversos programas de simulación de circuitos para resolver un problema específico de simulación. En la sección de resultados se presenta una validación realizada con 172 estudiantes de circuitos eléctricos, donde se encuestan respecto a su aprendizaje con la herramienta propuesta y su opinión sobre los EDA utilizados. Finalmente, se presentan las conclusiones.

II. Descripción del problema

Los currículos de cursos básicos de circuitos eléctricos en ingeniería suelen ser similares alrededor del mundo, enfocados en su mayoría en el dominio del tiempo y con un uso cada vez más común de simuladores circuitales [4]. En este aspecto, actualmente hay suficiente evidencia de la importancia de utilizar herramientas de simulación de circuitos [5]–[8]. Pero en la literatura hay pocas propuestas para incluir no solo herramientas de simulación sino además ambientes virtuales que acompañen las sesiones de docencia directa en cursos básicos de circuitos eléctricos [9]–[13].

Sin embargo, desde hace más de una década se ha trabajado en la migración de clases presenciales a virtuales, principalmente en el área de electrónica de potencia. En [5] el autor analiza el aprendizaje virtual on-line desde el punto de vista de los estudiantes. Allí observan que con estas herramientas se evita el aprendizaje centrado en el profesor. A los estudiantes las aplicaciones virtuales les parecen interesantes y atractivas, lo que les anima a participar continuamente. En [6] se propone una estrategia orientada a problemas para la enseñanza de circuitos de electrónica de potencia. Los autores indican que incrementar las sesiones de laboratorio o de simuladores interactivos ha demostrado ser efectiva en esta área. Con estas ventajas, en [7] los autores proponen una reforma a cursos de electrónica analógica, buscando incrementar las capacidades de diseño de los estudiantes. Esta reforma se basa en incluir aspectos de simulación e implementación a la par de la teoría. De forma similar, en [13] se realizó un estudio comparativo entre estrategias de aprendizaje tradicional y virtual para la enseñanza de amplificadores operacionales. Los resultados mostraron que aquellos estudiantes que realizaron el módulo de manera

virtual obtuvieron un mejor desempeño en la evaluación frente al grupo que lo hizo de manera tradicional. Estas estrategias se pueden apoyar en laboratorios virtuales [14]–[18]; y en el uso de casos de estudio con simulación, de forma que el tiempo presencial de los cursos, que es limitado, sea usado eficientemente [8].

La estrategia *b-learning* propuesta en este artículo se apoya en las recomendaciones dadas en [19]: Los resultados de aprendizaje mejoran significativamente cuando se combina teoría con experimentación y es importante enseñar la teoría en paralelo con simulación. También es importante que los circuitos en los que se aplican las leyes de Kirchhoff tengan sentido para el estudiante, de ser posible mostrando conexiones con cursos de física y matemáticas. Para esto último nos apoyamos en [20], donde los autores resaltan la utilidad de utilizar modelos de ecuaciones diferenciales lineales (computador analógico), siendo un ejemplo adecuado el análisis de equivalentes entre sistemas mecánicos (masa, resorte y amortiguador, como se propone en [21]) y eléctricos.

III. Solución propuesta

La estrategia *b-learning* propuesta se divide en componentes de docencia directa y de trabajo independiente. La componente de docencia directa se divide a su vez en dos partes: la primera consiste en introducir el concepto de equivalencia entre sistemas eléctricos y mecánicos a partir de un ejemplo sencillo de segundo orden. En la segunda parte se introduce un sistema mecánico más complejo (de cuarto orden) cuya solución no es intuitiva y se presenta una solución mediante fuentes controladas, donde se muestra al estudiante la flexibilidad que ofrece la introducción de elementos activos al sistema.

Una vez finalizada la sesión, los estudiantes deberán resolver un problema de diseño y sustentarlo mediante simulaciones. Esta etapa de aprendizaje se realiza mediante trabajo independiente asesorado por medio de plataformas educativas. Debido a que éstas varían dependiendo de cada universidad, en este artículo nos limitaremos a presentar los componentes sugeridos de modo que puedan ser implementados en cualquier plataforma. En el Material Suplementario (disponible por solicitud directa a los autores) hemos incluido propuestas de material complementario, evaluaciones y ejercicios.

A. Componente presencial

1) Sistema mecánico de segundo orden: Un sistema mecánico de traslación simple consiste de una masa, un resorte y un amortiguador, tal como se ilustra en la Fig. 1. Las variables

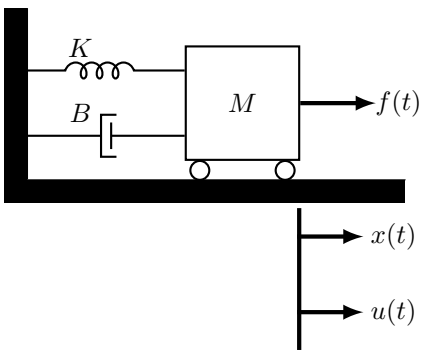


Fig. 1. Sistema Masa-resorte-amortiguador de segundo orden.

a medir o variables de estado del sistema son la posición $x(t)$ y la velocidad de la masa $u(t)$ en todo instante. Los parámetros del sistema son:

- M Masa del cuerpo, se mide en kilogramos.
- B Constante de amortiguamiento, se mide en Newton por segundo/metro.
- K Constante de elasticidad del resorte, se mide en Newton/metro.

La excitación del sistema es la fuerza $f(t)$ aplicada, medida en Newton. Las ecuaciones de estado del sistema se obtienen aplicando la segunda ley de Newton y la definición de la velocidad, así:

$$\frac{d}{dt}x(t) = u(t), \tag{1a}$$

$$M\frac{d}{dt}u(t) = f(t) - Bu(t) - Kx(t), \tag{1b}$$

En forma matricial, podemos escribir:

$$\frac{d}{dt}\begin{matrix} x(t) \\ u(t) \end{matrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K}{M} & -\frac{B}{M} \end{bmatrix} \begin{matrix} x(t) \\ u(t) \end{matrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M} \end{bmatrix} f(t) \tag{2}$$

La respuesta al escalón unitario del sistema mecánico se puede determinar de diferentes maneras. Aquí se presentará la herramienta Octave On-line (https://octave-online.net/), que es libre, multi plataforma y no requiere descarga de paquetes.

Tomando al desplazamiento $x(t)$ como respuesta del sistema, el problema de valor inicial asociado a dicha variable es:

$$M\frac{d^2}{dt^2}x(t) + B\frac{d}{dt}x(t) + Kx(t) = f(t), \tag{3a}$$

$$x(0) = 0, \quad \frac{d}{dt}x(0) = 0. \tag{3b}$$

Si la fuerza aplicada es el escalón unitario, se encontrará la respuesta para diferentes valores de los parámetros.

La Fig. 2 presenta los comandos en Octave para determinar la respuesta al escalón unitario con $M = 1$ kg, $B = 2$ Ns/m y $K = 10$ N/m.

```
M = 1;
B = 2;
K = 10;
A = [0,1;-K/M,-B/M];
B = [0;1];
C = [1,0];
D = 0;
stname = {"position","velocity"};
sys = ss(A,B,C,D,"stname", stname);
step(sys, 6, 0.01)
```

Fig. 2. Código de simulación del sistema mecánico de segundo orden.

2) Sistema eléctrico de segundo orden: El sistema mecánico de la Fig. 1 posee la misma configuración en el espacio de estados que el circuito eléctrico tipo RLC serie de la Fig. 3. Las variables de estado del sistema son la corriente $i(t)$ en el inductor y la carga $q(t) = Cv(t)$ en el capacitor. Los parámetros del sistema son:

- L Inductancia de la bobina y se mide en Henrios.
- C Capacitancia del capacitor y se mide en Faradios
- R Resistencia del resistor y se mide en Ohmios.

La excitación del circuito es la fuente de voltaje $v_s(t)$, medida en Voltios.

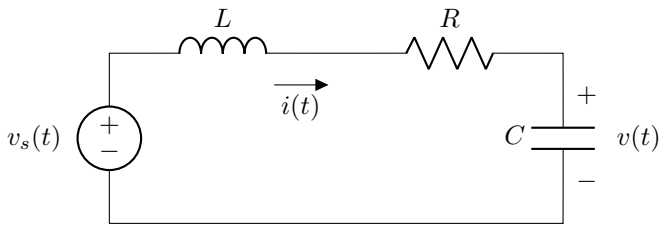


Fig. 3. Circuito eléctrico de segundo orden.

Al aplicar la ley de Kirchhoff para voltajes, se encuentran las ecuaciones de estado del sistema, así:

$$\frac{d}{dt}q(t) = i(t), \tag{4a}$$

$$L\frac{d}{dt}i(t) = v_s(t) - Ri(t) - \frac{1}{C}q(t), \tag{4b}$$

En forma matricial, podemos escribir:

$$\frac{d}{dt}\begin{matrix} q(t) \\ i(t) \end{matrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\dfrac{1}{LC} & -\dfrac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{matrix} q(t) \\ i(t) \end{matrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{1}{L} \end{bmatrix} v_s(t) \tag{5}$$

Haciendo el símil con Eq. (2) se puede observar la analogía entre el sistema mecánico y el sistema eléctrico, de tal forma que puede analizarse el comportamiento del sistema mecánico efectuando simulaciones sobre el sistema eléctrico. La equivalencia de los sistemas se presenta en la TABLA I.

TABLA I
EQUIVALENCIAS ENTRE PARÁMETROS DE LOS SISTEMAS

Sistema Mecánico	**Sistema Eléctrico**
Masa (M)	Inductancia (L)
Amortiguamiento (B)	Resistencia (R)
Elasticidad (K)	Inverso de la capacitancia $\dfrac{1}{C}$
Posición $\big(x(t)\big)$	Carga en el capacitor $\big(q(t)\big)$
Velocidad $\big(u(t)\big)$	Corriente en el inductor $\big(i(t)\big)$

Aunque pareciera que múltiples configuraciones circuitales pudieran ser equivalentes al sistema mecánico en cuestión, en realidad no es trivial encontrar una configuración en la cual la relación entre la derivada de la carga y la corriente sea 1. Como trabajo guiado en clase se propone a los estudiantes hallar los valores equivalentes de M, B y K para el circuito de la Fig. 4. Esta actividad puede realizarse en parejas, tipo test con evaluación, o invitando a un estudiante a resolverlo en el tablero.

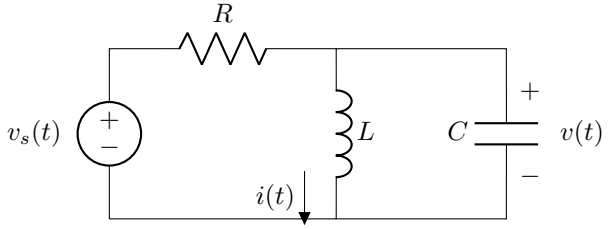


Fig. 4. Circuito alternativo equivalente al sistema mecánico.

Como resultado, las variables de estado se invierten y se obtienen las siguientes equivalencias:

$$LC = 1 \qquad M = R \qquad B = \frac{1}{C} \qquad K = R$$

Este resultado (donde los valores que pueden tomar los elementos están ligados entre sí y limitados) evidencia la dificultad para obtener un equivalente eléctrico que sea flexible al momento de elegir valores para los elementos mecánicos. A partir de este ejercicio, se explica a los estudiantes cómo para este problema en específico es recomendable que el inductor y el capacitor estén en serie, de modo que la relación entre ambas variables de estado se asemejen a las del sistema mecánico.

Como trabajo independiente, se pide a los estudiantes buscar configuraciones circuitales alternativas y obtener los valores equivalentes para los elementos mecánicos (sugerir la inclusión de más resistores). En el Material Suplementario se presenta un ejemplo de solución al problema propuesto.

3) Sistema mecánico de cuarto orden: Para esta segunda parte de la sesión teórica se propone realizar el mismo procedimiento pero con un sistema mecánico más complejo. La Fig. 5 ilustra un sistema mecánico con dos masas acopladas mediante resortes y amortiguadores. En este caso, el sistema tiene cuatro variables de estado, que son las posiciones y las velocidades de los dos cuerpos.

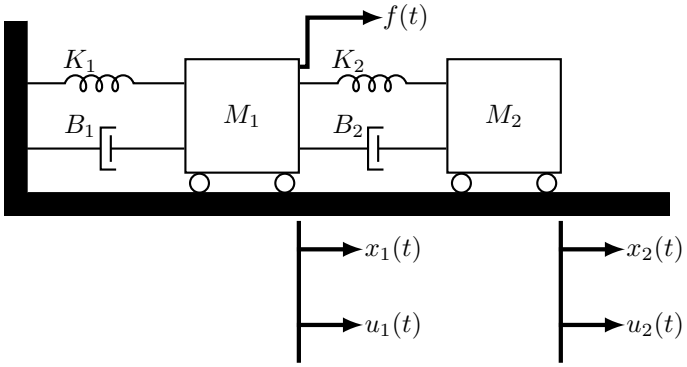


Fig. 5. Sistema Masa-resorte-amortiguador de cuarto orden.

Las ecuaciones de estado del sistema son las siguientes:

$$\frac{d}{dt}x_1(t) = u_1(t) \qquad \frac{d}{dt}x_2(t) = u_2(t) \tag{6a}$$

$$M_1\frac{d}{dt}u_1(t) = f(t) - B_1u_1(t) - K_1x_1(t) - K_2(x_1(t) - x_2(t)) - B_2(u_1(t) - u_2(t)) \tag{6b}$$

$$M_2\frac{d}{dt}u_2(t) = K_2(x_1(t) - x_2(t)) + B_2(u_1(t) - u_2(t)) \tag{6c}$$

La forma matricial se expresa mediante:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} = A\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dfrac{1}{M_1} \\ 0 \end{bmatrix} f(t) \tag{7}$$

con

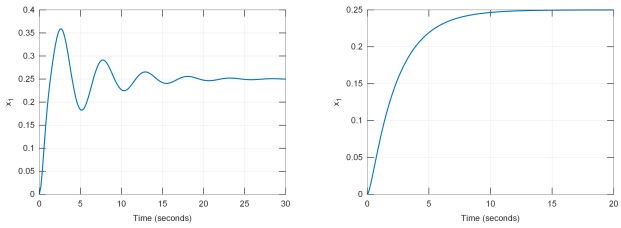
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\dfrac{K_1+K_2}{M_1} & \dfrac{K_2}{M_1} & -\dfrac{B_1+B_2}{M_1} & \dfrac{B_2}{M_1} \\ \dfrac{K_2}{M_2} & -\dfrac{K_2}{M_2} & \dfrac{B_2}{M_2} & -\dfrac{B_2}{M_2} \end{bmatrix}$$

Si se toma el desplazamiento de la masa M_1 como respuesta del sistema (es decir, x_1), se puede determinar la función de transferencia y la respuesta al escalón unitario para diferentes valores de los parámetros. La Fig. 6 presenta los comandos en Octave para determinar la respuesta al escalón unitario, utilizando los valores: $M_1 = M_2 = 1$ kg, $K_1 = K_2 = 4$ N/m, y $B_1 = B_2 = 1$ Ns/m.

```
M1=1;M2=1;K1=4;K2=4;B1=1;B2=1;
A = [0,0,1,0;0,0,0,1;
    -(K1+K2)/M1,K2/M1,-(B1+B2)/M1,B2/M1;
    K2/M2,-K2/M2,B2/M2,-B2/M2];
B = [0;0;1/M1;0];C = [1,0,0,0];
D = 0;
stname = {"pos1","vel1","pos2","vel2"};
sys = ss(A,B,C,D,"stname", stname);
step(sys)
```

Fig. 6. Código de simulación del sistema mecánico de cuarto orden.

La simulación da como resultado un sistema con polos complejos conjugados, es decir que en este caso el sistema es sub amortiguado. La respuesta al escalón unitario se ilustra en la Fig. 7(a). Finalmente, si modificamos los valores de amortiguamiento por: $B_1 = B_2 = 10$ Ns/m, el sistema ahora tiene una respuesta sobre amortiguada, como se observa en la Fig. 7(b).



(a) Respuesta sub amortiguada. (b) Respuesta sobre amortiguada.

Fig. 7. Respuestas del sistema ante diferentes valores en sus parámetros.

4) Sistema eléctrico de cuarto orden: En este punto los estudiantes comprenden que es posible emular sistemas mediante circuitos eléctricos. También comprenden la dificultad de obtener un diagrama circuital que se ajuste sin restricciones en los valores de los elementos. A continuación se propone un circuito eléctrico con fuentes controladas para simular el sistema mecánico de cuarto orden. El papel de las fuentes controladas es el de proveer el efecto del acoplamiento de las masas. El circuito de la Fig. 8 se obtuvo después de analizar de manera detallada el comportamiento del sistema mecánico.

A partir de las leyes de Kirchhoff y de los principios eléctricos básicos, planteamos las siguientes ecuaciones:

$$\frac{d}{dt}q_1(t) = i_1(t) \qquad \frac{d}{dt}q_2(t) = i_2(t)$$

$$L_1\frac{d}{dt}i_1(t) + R_1 i_1(t) + \frac{1}{C_1}q_1(t) - \frac{1}{C_2}q_2(t) + R_2\left(i_1(t) - i_2(t)\right) + \frac{1}{C_2}q_1(t) = v_s(t)$$

$$L_2\frac{d}{dt}i_2(t) + \frac{1}{C_2}\left(q_2(t) - q_1(t)\right) + R_2\left(i_2(t) - i_1(t)\right) = 0$$

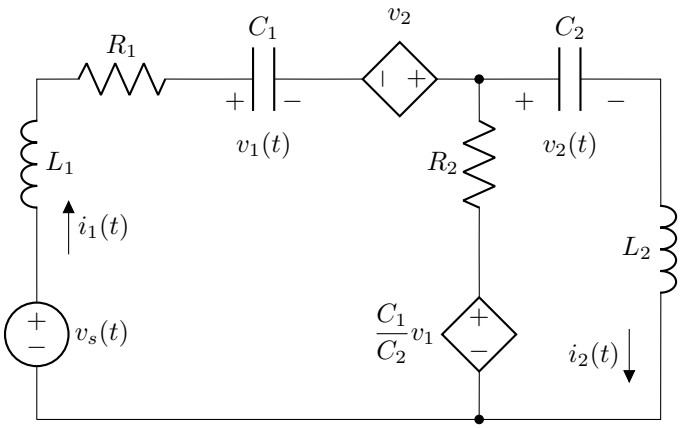


Fig. 8. circuito eléctrico de cuarto orden.

Reorganizando las ecuaciones, se obtiene el modelo en espacio de estados:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ i_1(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} = A\begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ i_1(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_1} \\ 0 \end{bmatrix} v_s(t) \tag{9}$$

con

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}}{L1} & \frac{1}{C_2L_1} & \frac{-(R_1+R_2)}{L_1} & \frac{R_2}{L_1} \\ \frac{1}{C_2L_2} & \frac{-1}{C_2L_2} & \frac{R_2}{L_2} & \frac{-R_2}{L_2} \end{bmatrix}$$

Se puede observar la analogía exacta entre la ecuación matricial de estado obtenida con el respectivo sistema mecánico. La TABLA II presenta las equivalencias de elementos entre los sistemas mecánico y eléctrico.

TABLA II
EQUIVALENCIAS ENTRE PARÁMETROS DE LOS SISTEMAS

Sistema Mecánico	**Sistema Eléctrico**
Masa 1 (M_1)	Inductancia 1 (L_1)
Masa 2 (M_2)	Inductancia 2 (L_2)
Amortiguamiento 1 (B_1)	Resistencia 1 (R_2)
Amortiguamiento 2 (B_1)	Resistencia 2 (R_2)
Elasticidad 1 (K_1)	Inverso de la capacitancia 1 $\frac{1}{C_1}$
Elasticidad 2 (K_2)	Inverso de la capacitancia 2 $\frac{1}{C_2}$
Posición 1 $(x_1(t))$	Carga en el capacitor 1 $(q_1(t))$
Posición 2 $(x_2(t))$	Carga en el capacitor 2 $(q_2(t))$
Velocidad 1 $(u_1(t))$	Corriente en el inductor 1 $(i_1(t))$
Velocidad 2 $(u_2(t))$	Corriente en el inductor 2 $(i_2(t))$

En la literatura se encuentran otras opciones que pudieran seguir esta misma metodología. Por ejemplo, en [22] los autores presentan equivalencias circuitales con procesos psicológicos.

B. Componente virtual

1) Plataforma educativa (LMS): Con el fin de proveer herramientas de estudio enfocadas en diferentes tipos de aprendizaje, se sugiere incluir en la plataforma la sesión teórica en tres formatos: *i*) texto (como se presenta en este artículo), *ii*) presentación con diapositivas, y *iii*) en video (se sugiere que esté basado en la presentación). La interacción entre el profesor y los estudiantes se dará mediante un foro donde puedan exponer sus dudas respecto a los conceptos teóricos aprendidos. En el Material Suplementario se incluye un video ejemplo utilizando la metodología de mini videos docentes modulares (http://www.ia.uned.es/minivideos/).

2) Habilidades en diseño: Esta primera etapa se basa en el modelo masa-resorte de segundo orden de la Fig. 1. El objetivo es que el estudiante adquiera competencias en análisis teórico de sistemas. Esta etapa se evalúa con un test individual tipo cuestionario que se sugiere sea resuelto en plataforma virtual.

Para este diseño se darán a los estudiantes valores a dos de los elementos físicos ($B,\ K,\ M$) y se dejará el tercero como incógnita. En la evaluación se pedirá al estudiante que encuentre los valores de todos los elementos de la configuración circuital equivalente de la Fig. 3 para cumplir con condiciones dadas. En el Material Suplementario se presenta un ejemplo de evaluación mediante LMS.

3) Habilidades de programación: Para esta sección y la siguiente se sugiere formar parejas o grupos de tres estudiantes, dependiendo del número de grupos y el criterio del profesor. No hay un límite en el número de grupos que pueden realizar esta actividad simultáneamente, solo es necesario definir el número máximo de grupos que puedan utilizar un mismo software de simulación (este punto será tratado más adelante).

Para el sistema mecánico de cuarto orden de la Fig. 5 y su respectivo modelo circuital (Fig. 8), se le solicitará a cada grupo de trabajo elaborar un programa computacional que les permita determinar todos los valores del sistema circuital para unas condiciones dadas. Cada grupo de trabajo deberá resolver un problema diferente y subir a la plataforma educativa el programa con el que lo resuelve y los resultados obtenidos.

El ejercicio sugerido para realizar en esta sección tiene la siguiente estructura: a cada grupo se le darán valores de todos los elementos del sistema mecánico de cuarto orden excepto uno. Luego, se les pedirá que elaboren un programa computacional que halle todos los valores del sistema eléctrico para obtener un tipo de respuesta específica. Ello implicará hallar mediante un algoritmo iterativo el valor faltante en el sistema mecánico. Dependiendo de los conocimientos en programación que tengan los estudiantes, se les puede liberar parte del código o que lo implementen por completo.

En esta etapa no se requiere que los valores hallados para los elementos sean comerciales (sí realistas), dado que una vez se encuentren en la etapa de simulación se hará este requerimiento. Se sugiere que el problema a resolver sea uno de los previamente evaluados en el test de habilidades de diseño: tipos de respuesta (e.g., comportamiento críticamente amortiguado) o tiempos de respuesta (e.g., tiempo de subida). En el Material Suplementario se presenta un ejemplo resuelto utilizando Octave.

4) Simulación: En la actualidad existe una amplia variedad de simuladores de circuitos eléctricos (conocidos como Electronic Design Automation –EDA). Tradicionalmente, los profesores de los cursos de circuitos eligen un software e instruyen a sus estudiantes a usarlo, ya sea por facilidad para su evaluación o por desconocimiento de otras herramientas. Sin embargo, como parte de las competencias necesarias para la industria 4.0, los estudiantes de ingeniería, más que enfocarse en aprender a utilizar una herramienta dada, deben de estar en capacidad de encontrar dicha herramienta y aprender a usarla.

Para esta última sección, se pide a cada grupo de trabajo que simule el circuito de la Fig. 8 con los valores comerciales más próximos a los valores encontrados en el ejercicio de programación. La simulación deberá realizarse en dos software de la lista de simuladores circuitales (TABLA III). Debido a que los valores comerciales no coincidirán con los obtenidos en la simulación, ello implicará un error frente al valor solicitado en el ejercicio anterior. El objetivo de esta etapa será identificar el porcentaje de error entre los resultados ideales y la simulación circuital (modelo realizable).

Con respecto al simulador a utilizar, se recomienda limitar el número de grupos que puedan usar cada herramienta, de modo que todas sean analizadas. Dado que algunos programas son más complejos de utilizar que otros, esto puede motivar a los estudiantes para finalizar antes la componente de programación. En el Material Suplementario presentamos la solución a esta actividad con todos los programas propuestos en la TABLA III, junto con los esquemáticos y gráficas de simulación obtenidas con cada uno de ellos.

5) Evaluación de la herramienta: Finalmente, al terminar cada semestre académico se recomienda evaluar con los estudiantes la estrategia *b-learning* utilizada mediante los indicadores propuestos en [23], [24]. Mediante una encuesta on-line voluntaria se invitó a los estudiantes a expresar su nivel de acuerdo con las siguientes afirmaciones:

1) Prefiero esta modalidad al curso teórico tradicional.
2) Mi desarrollo de habilidades profesionales fue mayor que si el curso hubiese sido impartido de manera tradicional.
3) El desarrollo de estas sesiones prácticas me ayudaron a desarrollar habilidades de aprendizaje independiente.
4) El desarrollo de estas sesiones prácticas me ayudaron a mejorar mis habilidades de solución de problemas.
5) El desarrollo de estas sesiones prácticas me ayudó a mejorar mis habilidades de trabajo en modalidad virtual.
6) Se deberían implementar estrategias similares en otras asignaturas.

Las preguntas debían ser respondidas según una escala de Likert, con: 1 como totalmente en desacuerdo (TD), 2 en desacuerdo (D), 3 ni en desacuerdo ni de acuerdo (N), 4 de acuerdo (A) y 5 como totalmente de acuerdo (TA). Respondieron la encuesta 172 estudiantes.

IV. Resultados

Esta propuesta se validó con una muestra de 172 estudiantes de cursos de circuitos eléctricos. Se les indagó sobre resultados de aprendizaje y su opinión sobre los EDA usados.

A. Evaluación de la estrategia

La Fig. 9 presenta los resultados obtenidos. En resumen, los estudiantes consideraron que tuvieron una mejora de

aprendizaje sobre el curso tradicional (preguntas 1 y 2), aunque podría considerarse marginal. En cambio, sí consideraron que estas sesiones prácticas les ayudaron a desarrollar habilidades de aprendizaje independiente (85 % A+TA), a mejorar habilidades de solución de problemas (69 % A+TA), y a mejorar habilidades de trabajo virtual (69 % A+TA). Finalmente, en su mayoría consideran que estrategias similares se debieran implementar en otras asignaturas (68 % A+TA).

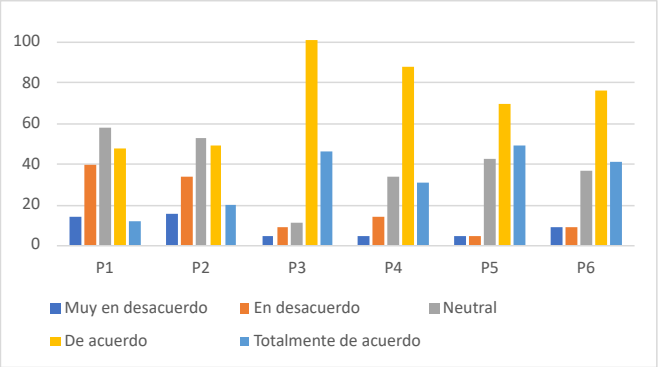


Fig. 9. Resultados encuesta a estudiantes.

Estos resultados demuestran que los estudiantes consideran que adquirieron habilidades que usualmente son relegadas en cursos tradicionales como el trabajo independiente y con componente virtual. Además, el alto interés en que este tipo de estrategias se implemente en otras asignaturas demuestra que los estudiantes valoran esta modalidad de aprendizaje.

B. Evaluación de las EDA

Para la práctica de simulación circuital los autores de este artículo encontramos 14 EDA disponibles en internet y con capacidad para realizar las tareas propuestas, en el material suplementario se ofrece un análisis de características y facilidad de manejo de cada programa. Esta información se puede dar como apoyo al estudiante para que elija qué herramientas usar en las sesiones independientes.

Luego de la práctica se indagó a los estudiantes sobre la facilidad de manejo de los EDA que les correspondieron. Se les preguntó sobre la facilidad de uso de cada EDA en esquemático y en simulación. Los autores de este artículo también realizamos nuestra valoración. La TABLA III presenta los resultados, allí se indica qué tipo de licencia mínima es necesaria para desarrollar los ejercicios aquí propuestos, bajo qué plataforma operan, y se da una valoración general (obtenida a partir de una escala de Likert: 1–Muy complejo de utilizar, 5–Muy sencillo de utilizar).

Los estudiantes encontraron que en su mayoría las EDA son poco intuitivas, especialmente para parametrizar la simulación. Multisim fue la mejor valorada entre los estudiantes (infortunadamente, en 2024 redujeron el número de nodos a 5 en su versión libre). Se resalta la diferencia entre la opinión de los profesores y los estudiantes respecto a las herramientas. Los estudiantes en general tuvieron dificultades para seleccionar la fuente de voltaje adecuada y los parámetros de simulación. Entre sus recomendaciones sugirieron crear manuales para el uso de los EDA y consultar con ellos sobre sus capacidades computacionales, dado que algunas plataformas requieren muchos recursos. En su mayoría manifestaron entusiasmo por la práctica, tanto durante asesorías como en la encuesta.

TABLA III
EVALUACIÓN DE LOS PROGRAMAS DE SIMULACIÓN EDA ANALIZADOS.

Programa	**Plataforma**	**Licencia**	**Valoración esquemático**		**Valoración simulador**	
			Prof	**Est**	**Prof**	**Est**
Orcad PSpice Lite	Windows	Libre (limitado)	3	3.7	2	3.3
Multisim Live	Online	Pago	5	4.6	4	4.2
Circuitmaker	Windows	Pago	4	3.1	3	1.8
Matlab simulink	Windows, Linux	Pago	4	2.7	5	2.8
EasyEDA	Online	Libre (publicidad)	4	4.1	4	2.8
Falstad	Online, Windows, MAC	Libre	4	3.2	3	3.6
Everycircuit	Online, APP	Trial	4	4	3	3.7
CircuitLab	Online	Trial	4	4.1	4	3.5
Sequel	Windows, linux	Libre	4	3.5	4	2.5
Electric circuit studio	APP	Libre	3	3	3	3
Droi Tesla	APP	Trial	5	3.7	2	3.3
Eagle	Windows, MAC, Linux	Libre (educación)	2	2	1	2.3
LTspice	Windows, MAC	Libre	3	3.7	2	3.3
Partsim	Online	Libre	5	3.8	4	3.3

Es difícil cuantificar comparativamente el aprendizaje tradicional con nuevas estrategias. Sin embargo, subjetivamente y basándonos en nuestra experiencia como profesores del área, luego de aplicar este ejercicio notamos cómo los estudiantes se entusiasmaron ante retos que les serán típicos como profesionales, como elegir, instalar y poner en funcionamiento un software que les es desconocido. Durante el desarrollo de las actividades independientes pudimos observar un aumento en la afluencia de estudiantes en los horarios de asesoría. La mayor parte de las dudas estuvieron encaminadas a resolver problemas puntuales, demostrando un mayor compromiso con el trabajo individual.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se propuso una estrategia *b-learning* para la enseñanza de circuitos eléctricos en el dominio del tiempo. Esta propuesta se desarrolló con el fin de facilitar la introducción de herramientas web en cursos tradicionales de circuitos, promoviendo el uso de plataformas LMS y de múltiples herramientas de simulación de circuitos, buscando con ello que el foco del aprendizaje sea basado en el estudiante y no en el profesor. La encuesta realizada a estudiantes dio resultados positivos en aprendizaje de habilidades de trabajo independiente y virtual, y demostró interés en utilizar este tipo de estrategia en otros cursos. Este hecho cobra relevancia en postpandemia, que ha popularizado el uso de herramientas virtuales en la enseñanza.

Referencias

[1] J. Lin and Y. Wang, "Unpacking the mediating role of classroom interaction between student satisfaction and perceived online learning among chinese efl tertiary learners in the new normal of post-covid-19," *Acta Psychologica*, vol. 245, 2024.

[2] H. Shu, Y. Wei, and X.-Q. Gu, "Is there difference between in and out of classroom? harnessing the group interaction of blended learning," in *2017 IEEE 17th International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT)*, 2017.

[3] A. Jesus, M. Gomes, and A. Cruz, "Blended versus face-to-face: comparing student performance in a therapeutics class," *IET Software*, vol. 11, no. 3, pp. 135–140, 2017.

[4] H. Li, J. Hu, and H. Dong, "Reformations and teaching practices of the circuit principle course in an undergraduate curriculum," *Procedia Engineering*, vol. 15, pp. 3154–3158, 2011.

[5] M. Tuncer, "The effect of presenting the electronic circuits lesson on virtual environment according to the project based learning approach on the views of the students," in *Procedia Social and Behavioral Sciences 1*, 2009, pp. 2156–2163.

[6] W. Jiang, F. Yu, and Y. Mo, "A problem oriented model for teaching power electronic circuits," in *IEEE 10th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, 2013, pp. 142–146.

[7] H. Huang, G. Du, and R. Hu, "Reform and practice of the electronic circuit experiment teaching mode for the purpose of strengthening the electronic system design ability," in *IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE)*, 2012.

[8] A. Abramovitz, "Teaching behavioral modeling and simulation techniques for power electronics courses," *IEEE transactions on education*, vol. 54, no. 4, pp. 523–530, 2011.

[9] A. Ferreiro, A. A. Nogueiras, A. M. Cao-Paz, J. M. Acevedo, and M. Castro, "A b-learning new approach applied to a practical power electronics converters course," in *IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, 2015.

[10] M. Rahman, "Teaching an electrical circuits course using a virtual lab," *Journal of College Teaching & Learning (TLC)*, vol. 11, p. 163, 09 2014.

[11] S. Aradoaei and A. Adascalitei, "Blended learning approach applied to electrical engineering courses," in *13th International Conference on Virtual Learning ICVL*, 01 2019.

[12] P. M. Holland, "Developing a blended learning approach for the effective teaching of electronic circuit analysis," in *2016 International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, May 2016.

[13] W. K. Wong and P. K. Ng, "An empirical study on e-learning versus traditional learning among electronics engineering students," *American Journal of Applied Sciences*, vol. 13, no. 6, pp. 836–844, 2016.

[14] L. Michaeli, M. Godla, and J. Saliga, "Remote access cost effective measurement stand for teaching basic electronic circuits," in *The 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*, 2011, pp. 188–191.

[15] J. Aguilar-Peña, F. Muñoz Rodríguez, C. Rus-Casas, and J. Fernández-Carrasco, "Blended learning for photovoltaic systems: Virtual laboratory with pspice," in *2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE)*, 2016.

[16] C. Rus-Casas, L. Hontoria, M. Jiménez-Torres, F. J. Muñoz Rodríguez, and F. Almonacid, "Virtual laboratory for the training and learning of the subject solar resource: Orientsol 2.0," in *2014 XI Tecnologias Aplicadas a la Ensenanza de la Electronica (Technologies Applied to Electronics Teaching) (TAEE)*, 2014.

[17] I. Ruano, P. Cano, J. Gámez, and J. Gámez, "Advanced lms integration of scorm web laboratories," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 6352 – 6363, 2016.

[18] F. Pinal, S. Nava, J. N. nez, I. Araujo, E. Vera, and A. Barranco, "Experimental b-learning laboratory for an electrical machines undergraduate course," *IEEE Latin American Transactions*, vol. 14, no. 2, pp. 524 – 529, 2016.

[19] Y. Tsividis, "Teaching circuits and electronics to first-year students," in *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 1998, pp. 424–427.

[20] A. L. Fitch, H. H. Lu, and D. D. Lu, "An analog computer for electronic engineering education," *IEEE transactions on education*, vol. 54, no. 4, pp. 550–557, 2011.

[21] W. Ardila Urueña, J. A. Chaves Osorio, and E. A. Quintero, "Simulación de un sistema masa resorte amortiguador con circuitos electrónicos," *Scientia et Technica*, vol. 2, no. 42, p. 4, 2009.

[22] M. Rupnik, F. Runovc, and M. Kordas, "The use of equivalent electronic circuits in simulating physiological processes," *IEEE transactions on education*, vol. 44, no. 4, pp. 384–389, 2011.

[23] R. M. O'Connell, "Adapting team-based learning for application in the basic electric circuit theory sequence," *IEEE Transactions on Education*, vol. 58, no. 2, pp. 90–97, 2015.

[24] J. L. Martín Núñez, J. L. Bravo Ramos, and J. R. Hilera González, "Indicators for assessing the quality of a blended university course," *IEEE Revista iberoamericana de tecnologías del aprendizaje*, vol. 12, no. 2, pp. 94–105, 2017.

Análisis deductivo para la comprensión y diseño de lazos de realimentación en amplificadores

Antonio D. Martínez Pérez
Group of Electronic Design (GDE)
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, Spain
adimar@unizar.es

Pedro A. Martínez Martínez
Group of Electronic Design (GDE)
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, Spain
pemar2@unizar.es

Diego F. Paredes Páliz
Group of Electronic Design (GDE)
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, Spain
dparedes@unizar.es

Francisco Aznar
Group of Electronic Design (GDE)
Centro Universitario de la Defensa
Zaragoza, Spain
faznar@unizar.es

Santiago Celma
Group of Electronic Design (GDE)
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, Spain
scelma@unizar.es

***Resumen*—La precisión y versatilidad de gran número de sistemas electrónicos se incrementa mediante realimentación. Por ello, su adecuada interpretación resulta crítica, tanto para la didáctica como para el diseño de circuitos analógicos. En este estudio, se propone la caracterización mediante cuadripolos de un amplificador con realimentación genérico. A partir de dicho análisis, pueden identificarse de forma más clara y directa para el alumno las distintas topologías y tipos de realimentación, además de las características para cualquier circuito lineal concreto que se desee analizar o sintetizar. Se incluyen ejemplos para demostrar el potencial del método planteado.**

***Index Terms*—Amplificadores, circuitos lineales, cuadripolos, realimentación.**

I. Introducción

La operación global de los circuitos no realimentados depende directamente de las características de sus dispositivos activos, unos factores poco reproducibles en la fabricación. Como consecuencia, aparecen grandes variaciones poco controlables entre sistemas supuestamente idénticos. Este grave problema puede mitigarse mediante las técnicas de realimentación, que consisten en establecer un camino adicional de propagación de la salida a la entrada. Esto último puede lograrse interconectando los terminales de entrada con los de salida mediante otro cuadripolo, responsable de cerrar el lazo.

La importancia de la realimentación es tal que el tema ha tenido y suele tener reservado un largo espacio en los libros de texto, aunque típicamente se obvian algunas cuestiones que no resultan tan evidentes para los alumnos.

Este artículo se organiza de la forma siguiente. En la Sección II, y a diferencia de los textos clásicos [1]–[6], se propone el estudio genérico y exacto de un sistema realimentado, formado por la interconexión de dos cuadripolos. De este modo, se analizan simultáneamente las cuatro posibles topologías, deduciendo de forma natural y exacta las expresiones de sus transmitancias y de sus inmitancias de entrada y de salida. En la Sección III se analizan las expresiones así obtenidas, particularizándolas al rango de frecuencias medias,

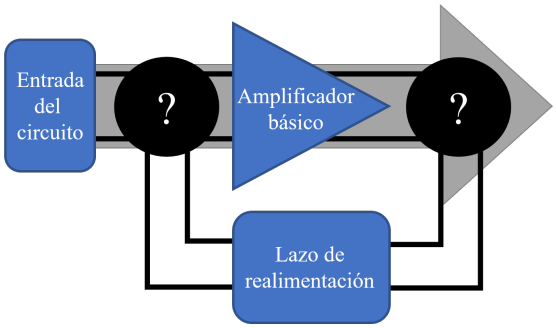


Figura 1: Diagrama de bloques de un amplificador con realimentación. Los círculos negros muestran los nodos de comparación y muestreo que definen la topología del sistema.

deduciéndose la necesidad de distinguir entre realimentación positiva y negativa. También permite obtener la clara inferencia de la topología sobre las características del sistema global. En la Sección IV, se propone un método intuitivo, alternativo y sistemático para determinar si la realimentación es efectiva y su signo, así como la topología empleada. Finalmente, la Sección V contiene una serie de ejemplos que ilustran la aplicación de este procedimiento para resolver las cuestiones planteadas, y la Sección VI contiene las conclusiones del trabajo.

II. Descripción y Caracterización de un Sistema Realimentado

Como ya hemos comentado en la sección anterior, si queremos que el sistema presente un lazo de realimentación efectivo y apreciable es necesario establecer la conexión de dos cuadripolos y ciertas condiciones. Para que la realimentación sea efectiva, la salida debe estar influyendo sobre la entrada bajo las circunstancias consideradas. Será, además, apreciable, si este efecto es significativo. De acuerdo con ello, existen cuatro

posibilidades, denominadas topologías, según las conexiones se realicen en serie (malla) o en paralelo (nudo).

La estructura genérica de un sistema realimentado es, pues, el indicado en la Figura 1, donde la conexión de los terminales de entrada se denomina comparación, mientras que los de salida se designa como muestreo.

Para cualquiera de las topologías se verifican las siguientes propiedades:

1. Se pueden establecer dos variables comunes a los dos cuadripolos, las cuales designaremos por y_1 e y_2, y que son también variables del cuadripolo resultante de la conexión.
   - Muestreo por nudo: y_2 es la tensión de salida.
   - Muestreo por malla: y_2 es la intensidad de salida.
   - Comparación por nudo: y_1 es la tensión de entrada.
   - Comparación por malla: y_1 es la intensidad de entrada.

   Las otras dos variables del cuadripolo resultante de la conexión las denominaremos como x_1 la de entrada, y x_2, la de salida.
2. El sistema total puede considerarse excitado por un generador ideal x_1, siendo necesario para ello incluir el efecto de su impedancia de salida en la descripción del amplificador básico.
3. La no existencia de excitación en los terminales de salida siempre puede traducirse por la condición $x_2 = 0$, para lo que es preciso incluir los efectos de la impedancia de carga en el amplificador básico.
4. Las variables x_1 y x_2 son la suma de las correspondientes a cada uno de los cuadripolos y que distiguiremos asociándoles un superíndice, x_n^{ab} y x_n^{lr}, según pertenezcan al amplificador básico (ab) o al lazo de realimentación (lr).

Veamos todo ello con el ejemplo de la Figura 2: topología nudo-nudo, que también puede especificarse más claramente como muestreo por nudo y comparación por nudo: $y_1 = v_1$, $y_2 = v_2$, $x_1 = i_1$ y $x_2 = i_0 = 0$.

La configuración inicial es mostrada en la Figura 2a. Aplicando las modificaciones indicadas anteriormente, dicha estructura es equivalente a la mostrada en la Figura 2b.

Se recomienda a los lectores realizar esto mismo con otra de las topologías existentes.

Realizando las transformaciones indicadas en el apartado anterior, podemos describir cada uno de los cuadripolos por los parámetros que resultan de considerar como variables independientes las comunes a ambos, es decir, y_1 e y_2:

$$x_1 = x_1^{ab} + x_1^{lr} = \alpha_{11}^{ab}\cdot y_1 + \alpha_{12}^{ab}\cdot y_2 + \alpha_{11}^{lr}\cdot y_1 + \alpha_{12}^{lr}\cdot y_2 \quad (1)$$

$$x_2 = x_2^{ab} + x_2^{lr} = \alpha_{21}^{ab}\cdot y_1 + \alpha_{22}^{ab}\cdot y_2 + \alpha_{21}^{lr}\cdot y_1 + \alpha_{22}^{lr}\cdot y_2 \quad (2)$$

Por consiguiente,

$$x_1 = \alpha_{11}\cdot y_1 + \alpha_{12}\cdot y_2 \quad (3)$$

$$x_2 = \alpha_{21}\cdot y_1 + \alpha_{22}\cdot y_2 = 0 \quad (4)$$

donde $\alpha_{nk} = \alpha_{nk}^{ab} + \alpha_{nk}^{lr}$, con $\alpha_{12} = f \approx \alpha_{12}^{lr}$.

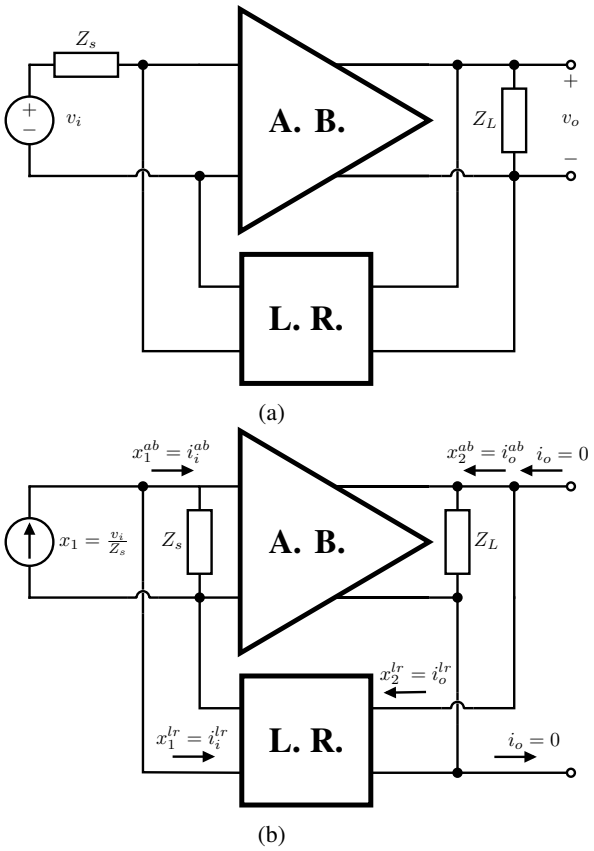


Figura 2: Amplificador básico con realimentación en topología nudo-nudo: a) configuración inicial y b) estructura equivalente.

De acuerdo con la ecuación (4),

$$y_2 = -\frac{\alpha_{21}}{\alpha_{22}}\cdot y_1 \quad (5)$$

Si definimos $x_1' = x_1 - \alpha_{12}\cdot y_2$, según (3) podemos escribir:

$$x_1' = \alpha_{11}\cdot y_1 \quad (6)$$

y según la ecuación (5), resulta,

$$y_2 = -\frac{\alpha_{21}}{\alpha_{22}}\cdot\frac{x_1'}{\alpha_{11}} = a\cdot x_1' \quad (7)$$

definiendo $a = -\frac{\alpha_{21}}{\alpha_{22}\cdot\alpha_{11}}$.

De acuerdo con las ecuaciones (6) y (7), el sistema realimentado puede interpretarse en la forma mostrada en la Figura 3. Este esquema permite obtener las características del sistema realimentado.

Así, su transmitancia puede expresarse en la forma siguiente,

$$A = \left.\frac{y_2}{x_1}\right|_{x_2=0} = \frac{ax_1'}{x_1' + fy_2} = \frac{ax_1'}{x_1' + fax_1'} = \frac{a}{1+af} \quad (8)$$

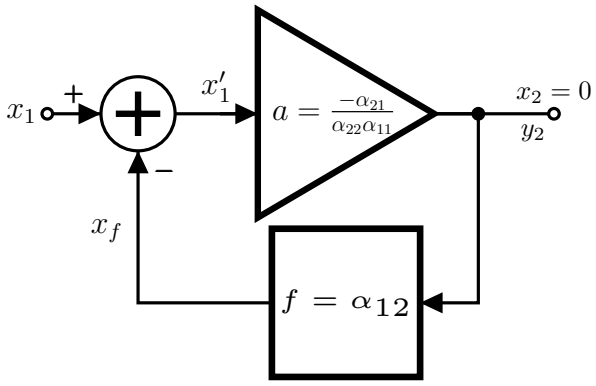


Figura 3: Diagrama de bloques de un amplificador realimentado genérico.

Su inmitancia de entrada:

$$\Gamma_i = \left.\frac{x_1}{y_1}\right|_{x_2=0} = \frac{x_1' + f y_2}{y_1} = \alpha_{11} + f \left.\frac{y_2}{y_1}\right|_{x_2=0} =$$
$$= \alpha_{11} + \alpha_{12}\left(-\frac{\alpha_{21}}{\alpha_{22}}\right. = \alpha_{11}\left(1 - \alpha_{12}\frac{\alpha_{21}}{\alpha_{22}\alpha_{11}}\right. =$$
$$= \alpha_{11}(1 + af) = \Gamma_i'(1 + af) \quad (9)$$

Su inmitancia de salida es:

$$\Gamma_o = \left.\frac{x_2}{y_2}\right|_{x_1=0} = \left.\frac{\alpha_{21}\cdot y_1 + \alpha_{22}\cdot y_2}{y_2}\right|_{x_1=0} =$$
$$= \alpha_{22} - \alpha_{21}\frac{\alpha_{12}}{\alpha_{11}} = \alpha_{22}\left(1 - \frac{\alpha_{12}\alpha_{21}}{\alpha_{11}\alpha_{22}}\right. =$$
$$= \alpha_{22}(1 + af) = \Gamma_o'(1 + af) \quad (10)$$

Nótese que los parámetros que hemos designado por a, Γ_i' y Γ_o' serían respectivamente la transmitancia, inmitancia de entrada e inmitancia de salida en ausencia de realimentación, esto es, $f = 0$.

Este método es exacto para analizar un amplificador realimentado; no obstante, existen en la bibliografía procedimientos aproximados que permiten determinar con elevada precisión las características de estos sistemas [2]–[4].

III. Rango de Frecuencias Medias

Una vez deducidas las expresiones genéricas de los parámetros característicos de un sistema realimentado, limitaremos nuestro estudio en esta sección al rango de frecuencias medias.

1. En primer lugar abordaremos el análisis de la transmitancia siguiendo la ecuación (8), $A_m = \frac{a_m}{1+a_m f_m}$, siendo el subíndice m el indicativo del valor de la magnitud en frecuencias medias.
   a) La primera conclusión importante es que el tipo de transconductancia depende de la topología del sistema.
   b) En segundo lugar, su valor está condicionado por el cuadripolo de realimentación y más concretamente por f, función de transmisión inversa. Dado que este parámetro f puede ser controlable, normalmente mediante elementos pasivos, también lo será A.
   c) Si $a_m f_m > 0$, la transconductancia del sistema realimentado es menor en módulo y presenta el mismo signo que el sistema sin realimentación. En este caso, se dice que el sistema presenta un lazo de realimentación negativa y es la situación más utilizada en el diseño de sistemas electrónicos estables.
   d) si $a_m f_m < 0$ pueden darse dos situaciones:
   - $|a_m f_m| < 1$, la transconductancia en lazo cerrado es mayor en módulo y del mismo signo que el lazo abierto.
   - $|a_m f_m| > 1$, conduce a la inestabilidad [2].

   Cuando $a_m f_m < 0$ se dice que el sistema presenta un lazo de realimentación positiva, pero sólo se utiliza en aplicaciones muy concretas.
2. De modo análogo, podemos estudiar la influencia de la realimentación sobre la inmitancia de entrada: $\Gamma_i = \Gamma_i'(1 + a_m f_m)$. Si el lazo de realimentación es negativo y la comparación se realiza por malla ($y_1 = i_1$, $x_1 = v_1$), la inmitancia de entrada tiene dimensiones de impedancia, de modo que en este caso, el lazo de realimentación incrementa la resistencia de entrada del sistema. La comparación por nudo ($y_1 = v_1$, $x_1 = i_1$) produce el efecto contrario.
3. Un estudio similar puede realizarse en la inmitancia de salida $\Gamma_o = \Gamma_o'(1 + a_m f_m)$. Las conclusiones son análogas, incrementándose la resistencia de salida si el muestreo es por malla, y disminuyéndose si es por nudo, supuesto un lazo de realimentación negativo.

Este simple análisis demuestra la importancia de conocer si la realimentación es positiva o negativa, así como la topología del lazo, cuestión que abordaremos en la siguiente sección.

A partir de las expresiones obtenidas pueden deducirse otros indudables beneficios que supone la utilización de la realimentación y que aparecen estudiados en la bibliografía, aunque tampoco se pueden obviar algunos inconveniente asociado a su empleo [3], [4].

IV. Estudio Cualitativo de un Lazo de Realimentación

De acuerdo con la sección anterior, la primera cuestión es determinar si el sistema presenta un lazo de realimentación efectivo y, supuesto que exista, si este es positivo o negativo.

Consideremos el esquema de la Figura 3 sin excitación de entrada, $x_1 = 0$. Una modificación $\pm|\Delta|$ en la tensión o intensidad en la impedancia de carga en la salida produce un cambio en x_f: $\Delta x_f = \pm f_m |\Delta|$, lo que a su vez se transmite a x_1': $\Delta x_1' = \mp f_m |\Delta|$, generando un cambio en la salida: $\mp a_m f_m |\Delta|$. Así pues, si una variación en la salida vuelve a influir en ella es que existe un lazo de realimentación efectivo.

Si la realimentación es positiva, el cambio en la salida es $\pm|a_m f_m||\Delta|$, produciéndose una variación en el mismo sentido que el inicial; además, si $|a_m f_m| > 1$ cualquier perturbación que se produzca en el sistema tiende a incrementarse, lo que se traduce en inestabilidad.

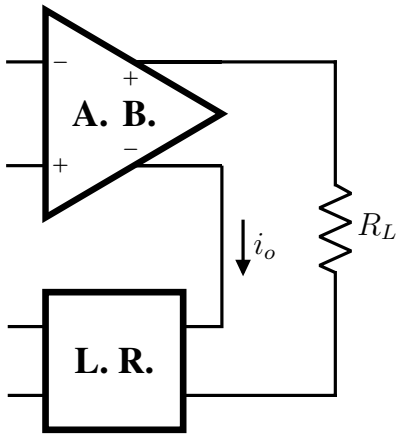


Figura 4: Muestreo por malla. Se transmite i_o. Realimentación es efectiva incluso si $R_L = 0$.

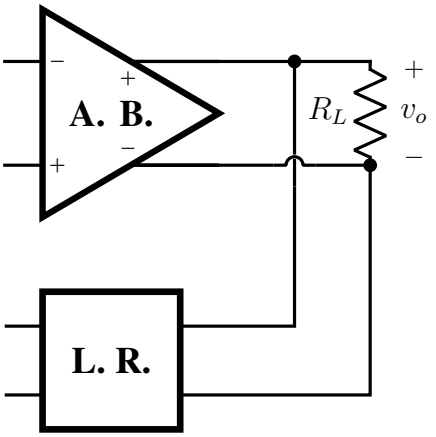


Figura 5: Muestreo por nudo. Se transmite v_o. No es efectiva si $R_L = 0$.

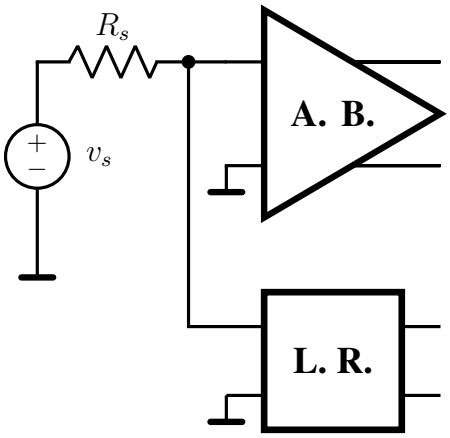


Figura 6: Comparación por nudo. Si $R_s = 0$, la realimentación no es efectiva.

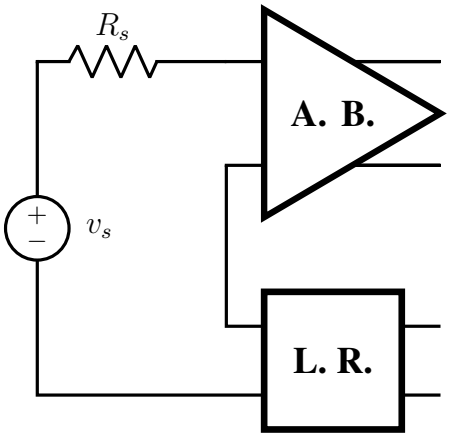


Figura 7: Comparación por malla. Si $R_s = 0$, la realimentación sigue siendo efectiva.

Si, por el contrario, la realimentación es negativa, la variación en la salida es $\mp|a_m f_m|\,|\Delta|$, es decir, la existencia del lazo crea un mecanismo que se opone a cualquier cambio en las variables del sistema. Este resultado está en concordancia con el hecho de que un lazo de realimentación negativa disminuye el módulo de la ganancia del sistema.

Otro punto importante es determinar la topología del lazo. El procedimiento obvio sería tratar de descomponer el sistema en la interconexión de dos cuadripolos, lo que, en general, no resulta sencillo.

Un método intuitivo, alternativo y sistemático de realizarlo consiste en lo expuesto en las siguientes subsecciones.

IV-A. Muestreo

La conexión en la salida de los dos cuadripolos puede determinarse considerando lo que sucede si se cortocircuitase la impedancia de carga.

Si el sistema resultante sigue presentando realimentación efectiva, es evidente que x_f, Figura 3, es proporcional a la intensidad, lo que corresponde a un muestreo por malla (Figura 4). En caso contrario, el muestreo es por nudo (Figura 5).

IV-B. Comparación

Consideremos que utilizamos como excitación un generador ideal de tensión y que anulamos toda impedancia que quede directamente en serie con él.

Si la comparación es por nudo (Figura 6), los dos cuadripolos tendrán como señal de excitación dicho generador de tensión, por lo que la realimentación no será efectiva. En caso contrario, la comparación es por malla (Figura 7).

V. Ejemplos de uso

Veamos su aplicación en varios casos concretos. Las siguientes figuras muestran únicamente el modelo para pequeñas señales de los circuitos, supuesto que todos los elementos activos están adecuadamente polarizados en su zona amplificadora. En todos los casos analizamos cómo reacciona el lazo de realimentación al producirse una variación en la tensión de salida, indicándolo cómo $v_o \uparrow$ cuando se produce un incremento y $v_o \downarrow$ si se trata de una reducción.

La Figura 8 muestra un amplificador constituido por dos transistores bipolares.

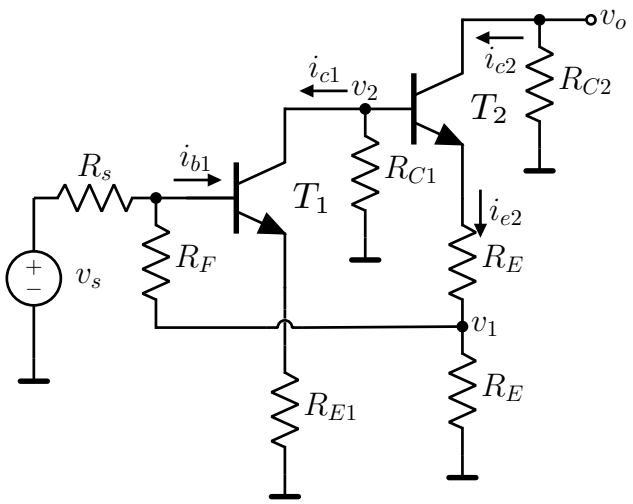


Figura 8: Amplificador con transistores BJT realimentado.

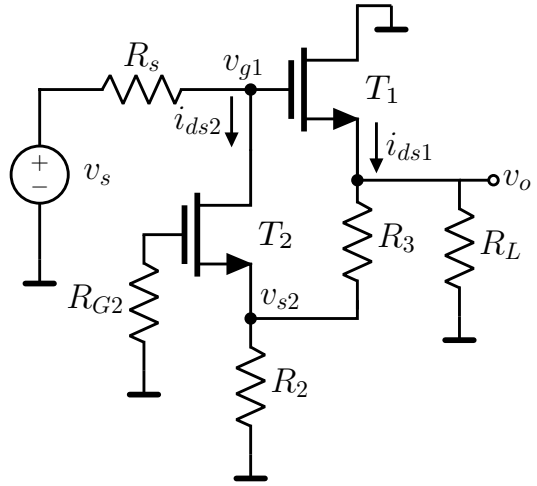


Figura 9: Amplificador con transistores NMOS realimentado.

- De acuerdo con las indicaciones del esquemático, si v_o aumenta, dicho incremento se propaga de la siguiente forma por el circuito: $v_o\uparrow \Rightarrow i_{c2}\downarrow \Rightarrow i_{e2}\downarrow \Rightarrow \Rightarrow v_1\downarrow \Rightarrow i_{b1}\downarrow \Rightarrow i_{c1}\downarrow \Rightarrow v_2\uparrow \Rightarrow i_{c2}\uparrow \Rightarrow v_o\downarrow$: la realimentación es efectiva y negativa.
- Para determinar su topología, consideraremos qué sucede si:
  - $R_{c2} = 0$ y se produce una disminución de i_{c2}. Análogamente a lo anterior y con las condiciones mencionadas: $i_{c2} \downarrow \Rightarrow i_{c2} \uparrow$, es decir, la realimentación sigue siendo efectiva, lo que indica que el muestreo es por malla.
  - $R_s = 0$, aunque aumente v_o, v_{be1} es constante e independiente de v_1, de modo que la realimentación deja de ser efectiva, mostrando así que la comparación es por nudo.

El segundo ejemplo, Figura 9, está constituido por dos transistores MOS. Procedamos de la misma forma que en el caso anterior:

- Si $v_o\uparrow \Rightarrow v_{s2}\uparrow \Rightarrow v_{gs2}\downarrow \Rightarrow i_{ds2}\downarrow \Rightarrow v_{g1}\uparrow \Rightarrow i_{ds1}\uparrow \Rightarrow v_o\uparrow$, la realimentación es positiva y efectiva.
- Para determinar su topología:
  - Si $R_L = 0$, v_{s2} será constante, así como i_{ds2}, es decir, la realimentación no es efectiva, lo que indica que el muestreo es por nudo.
  - Si $R_s = 0$, $v_o \uparrow \Rightarrow v_{s2} \uparrow \Rightarrow v_{gs2} \downarrow \Rightarrow i_{ds2} \downarrow$, pero v_{g1} se mantiene constante, rompiéndose el lazo, de modo que la comparación es por nudo.

El tercer ejemplo corresponde al uso de un amplificador operacional, tal como muestra la Figura 10.

- Si $v_o \uparrow \Rightarrow v_f \uparrow \Rightarrow v_d \downarrow \Rightarrow v_o \downarrow$. La realimentación es efectiva y negativa.
- Para determinar su topología:
  - Si $R_L = 0$, v_f será constante, no existiendo, por tanto, realimentación efectiva, luego el muestreo es por nudo.

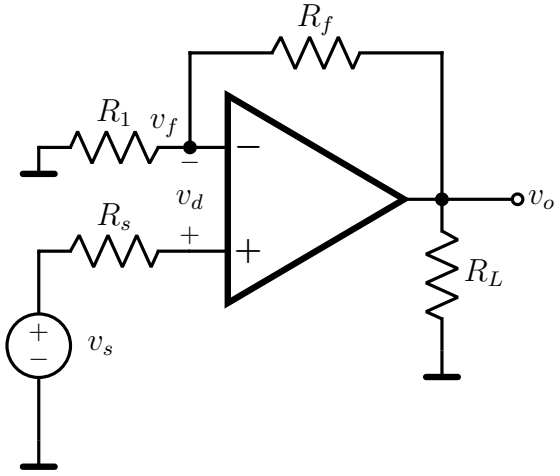


Figura 10: Amplificador operacional realimentado.

  - Si $R_s = 0$ y $v_o\uparrow$ es evidente que la realimentación sigue actuando; así pues, la comparación se realiza por malla.

Con un poco de experiencia, al establecer cómo se transmite la variación de la señal de salida a la entrada, puede también deducirse la topología del lazo.

Así, en el primer caso, es la variación de i_{c2} la que influye, muestreo por malla, produciendo en la entrada un efecto (v_{be1}), que desaparecería si R_s fuese cero, comparación por nudo.

En el segundo caso, Figura 9, es el cambio en v_o el que afecta a la entrada, muestreo por nudo, en concreto a v_{g1}, lo que no ocurriría si R_s fuese cero, comparación también por nudo.

Con el tercer amplificador, es la variación de v_o la que afecta directamente y se transmite a la entrada, muestreo por nudo, produciéndose una variación en v_f, lo que también ocurriría si R_s fuese cero, comparación por malla.

VI. Conclusiones

Determinar las características básicas del lazo de realimentación es el paso previo e imprescindible para analizar o sintetizar estos sistemas, tal como se expone en la Sección IV de este artículo. Una vez conocidas éstas, dicha configuración puede analizarse mediante un método genérico y exacto, propuesto en la Sección II de este trabajo, así como deducir alguno de los beneficios obtenidos en el rango de frecuencias medias tal como se hace en la Sección III; no obstante, a veces es conveniente utilizar técnicas aproximadas que permiten caracterizarlos con la suficiente precisión, pero de una forma más rápida y sencilla [2]–[4].

Por otra parte, algunas cuestiones como la obtención de las respuestas en frecuencia o las técnicas de compensación y estabilidad de los sistemas realimentados quedan fuera de lo abordado en este trabajo, centrado en los fundamentos de la realimentación.

Otras líneas de interés didáctico, sería modelar otros fenómenos, incluso más cotidianos, como circuitos electrónicos realimentados. El hecho de que nuestra temperatura corporal se mantenga a un nivel adecuado es un claro ejemplo de realimentación negativa, afortunadamente.

El carácter sistemático de la técnica de análisis y síntesis tiene un profundo interés docente, pues permite abordar esta temática tan problemática en ocasiones desde una perspectiva más conceptual y generalista. A partir de dicha introducción, pueden deducirse desde lo general los casos concretos, así como los tipos de realimentación. Todo ello a la par que se presentan indirectamente los procesos de identificación de malla o nudo.

Adicionalmente, la explicación podría utilizarse también para reforzar la importancia de las impedancias de entrada y salida en el diseño y conexión de etapas electrónicas, así como permitir a los alumnos adquirir experiencia en el diseño de etapas amplificadoras con independencia del tipo de elemento amplificador.

Esta formación teórica de la electrónica podría consolidarse mediante prácticas de laboratorio. En ellas podría hacerse uso de circuitos o dispositivos en las que la realimentación sea esencial, como es el caso de los amplificadores operacionales. Estos disposivos permitirían de una forma relativamente sencilla comprobar muchas de las cuestiones planteadas, tales como la estabilidad, la respuesta en frecuencia y la compensación.

Referencias

[1] J. Millman, “Microelectronics”, *Mc Graw-Hill*, 1998.

[2] A. Sedra, K. Smith, T. Carousone y V. Gaudet, “Microelectronic Circuits”, *Oxford University Press*, 2020.

[3] R. Jaeger y T. Blalock, “Microelectronic Circuit Design”, *Mc Graw-Hill*, 2008.

[4] P. R. Gray, P. J. Hurst, S. H. Lewis y R. G. Meyer, “Analysis and Design of Analog Integrated Circuits”, 5^a edición, *John Wiley and Sons*, 2009.

[5] B. Razavi, “Design of Analog CMOS Integrated Circuits”, *Mc Graw-Hill Education*, 2016.

[6] W. M. C. Sansen, “Analog Design Essentials”, *Springer*, 2006.

Píldoras Audiovisuales como Metodología Docente en Electrónica

Belén Calvo
Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
becalvo@unizar.es

Nicolás Medrano
Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
nmedrano@unizar.es

Diego Antolín Cañada
Dpto. Ingeniería Electrónica
Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia
La Almunia de Doña Godina, España
dantolin@unizar.es

Daniel Enériz
Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
eneriz@unizar.es

***Abstract*— Este trabajo presenta la elaboración de píldoras audiovisuales de corta duración como recurso educativo complementario tanto a las sesiones de teoría como de problemas en asignaturas de electrónica del Grado en Física (Técnicas Físicas II, Electrónica Física) con el fin de favorecer el aprendizaje autónomo integrado de conocimientos y aplicaciones específicas. Se amplían y complementan así recursos ya desarrollados en este formato como apoyo a las sesiones prácticas de Técnicas Físicas II, motivados por los buenos resultados obtenidos, y todo ello haciendo uso de herramientas de carácter gratuito.**

Keywords*— *Píldora audiovisual, píldora formativa, auto-aprendizaje, software libre.

I. Introducción

El uso de píldoras de formación-aprendizaje específicas, consistentes en videos de corta duración diseñados para complementar las estrategias de formación tradicionales, favorece la comprensión e integración de conocimientos en un formato digital que el estudiantado universitario consume hoy en día de forma habitual para la resolución y búsqueda de explicaciones. Constituyen, por tanto, un recurso educativo atractivo para los estudiantes, ampliamente familiarizados con este tipo de formato, que puede ser visualizado en cualquier momento incluso desde dispositivos móviles, permitiendo un aprendizaje autónomo asíncrono de conceptos y destrezas, que por su dificultad conceptual y/o por su naturaleza dinámica, pueden ser introducidos y reforzados mediante el uso de píldoras audiovisuales para un aprendizaje eficaz [1].

Este conjunto de características y ventajas formativas son especialmente interesantes en asignaturas de electrónica, por lo que en el curso 2020-21, el equipo docente de este trabajo elaboró y puso a disposición del alumnado píldoras audiovisuales como apoyo a las sesiones de laboratorio de la asignatura experimental Técnicas Físicas II [2], obligatoria del tercer curso del Grado en Física de la Universidad de Zaragoza [3], con explicaciones sobre instrumentación y herramientas/técnicas básicas de control y automatización de medidas que se usan a lo largo de las sesiones prácticas de esta asignatura [4]. Los buenos resultados obtenidos han motivado el presente trabajo, cuyo objetivo es ampliar el uso de este recurso educativo como apoyo complementario tanto a las sesiones de teoría como de problemas de la asignatura, extendiéndonos además a la asignatura Electrónica Física [5], obligatoria de cuarto curso del Grado en Física, dando así continuidad al itinerario de electrónica en el Grado en Física. Así, el objetivo final es disponer de un conjunto de videos de corta duración y que constituyan unidades auto-contenidas con información estratégica, que puedan ser (re)-visualizados de forma autónoma en cualquier momento y desde cualquier plataforma o dispositivo.

El trabajo está estructurado de la siguiente manera. La Sección II presenta brevemente el contexto en el que se enmarca esta experiencia. La Sección III muestra el diseño y realización de las píldoras formativas. La Sección IV resume los resultados obtenidos y finalmente, en la Sección V se presentan las conclusiones.

II. Contexto

El Grado en Física de la Universidad de Zaragoza consta de 240 créditos ECTS distribuidos en cuatro cursos [3]. Considerando créditos obligatorios, el Área de Electrónica tiene asignada docencia en el módulo de Técnicas Físicas (TF), que aúna contenidos de carácter fundamentalmente instrumental y comprende las asignaturas TFI (segundo curso, competencias básicas de instrumentación), TFII (tercer curso, sistemas de medida y control de instrumentación electrónica) y TFIII (cuarto curso, diseño de un sistema experimental), así como en el módulo de Estructura de la materia, en la asignatura Electrónica Física (cuarto curso, centrado en dispositivos semiconductores y aplicaciones básicas electrónicas).

En la asignatura anual de Técnicas Físicas II [2], el primer cuatrimestre consta de 4 ECTS vinculados al Área de Electrónica, con las competencias específicas de adquirir conocimiento sobre fundamentos físicos y criterio para la selección de sensores de magnitudes físicas; analizar y diseñar el acondicionamiento de señales de un sistema de medida; comprender los fundamentos del muestreo y cuantificación de señales; conocer y saber elegir entre los diferentes sistemas de adquisición de datos mediante un control automatizado de la instrumentación, y tratamiento y extracción de la información.

Este trabajo se realiza parcialmente gracias al apoyo institucional de la Convocatoria competitiva de Proyectos de Innovación de la Universidad de Zaragoza (PI_DTOST) en el año 2023 y con referencia ID 4748 con título "Ampliación de la elaboración de píldoras audiovisuales como metodología docente en las asignaturas de electrónica".

Las experiencias de laboratorio se distribuyen en cinco sesiones LAB1-LAB5 de dos horas de duración: LAB1: Amplificadores; LAB2: Filtros; LAB3: Filtros: automatización; LAB4: Muestreo y Digitalización y LAB5: Sistema completo de medida. Las dos primeras sesiones están dedicadas a conceptos básicos de acondicionado, mientras que en las tres últimas se automatizan los procesos de medida empleando SCPI para programación de instrumentos y Python como lenguaje de desarrollo y control. Concretamente, en LAB3 se automatiza la caracterización del filtro diseñado en LAB2, controlando el generador-osciloscopio DSO-X2002A de Agilent [6] via USB; mientras que en LAB4 y LAB5 se hace uso de una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) USB6008 de National Instruments, NI [7].

Es en el marco de esta asignatura donde en el curso 2020-21 se introdujeron por primera vez como recurso educativo píldoras audiovisuales [4], con el objetivo de dotar al alumno de un material con explicaciones y demostraciones sobre la instrumentación, herramientas y técnicas que se van a necesitar a lo largo de las diferentes sesiones prácticas. En concreto se elaboraron cuatro vídeos: (i) introducción al osciloscopio DSO-X 2002A; (ii) control de instrumentación (tomando como ejemplo el osciloscopio anterior) mediante el uso de comandos SCPI; (iii) introducción al control de la instrumentación a través del lenguaje de programación Python; y (iv) control de una DAQ modelo NI USB-6008.

La valoración positiva por parte del alumnado y el impacto de la introducción de estos recursos, reflejado en una mejor preparación previa en las sesiones de prácticas y una ejecución de la sesión más ágil y con una mejor asimilación de los conocimientos, pone de manifiesto que este formato de recurso de enseñanza-aprendizaje nos permite cumplir de manera satisfactoria los objetivos planteados, a la vez que adentrarnos en la transformación digital para hacer frente a las necesidades de los estudiantes actuales.

Así, este trabajo pretende extender el uso de píldoras audiovisuales como apoyo a las sesiones de teoría y de problemas en la asignatura de Técnicas Físicas II (curso 3, orientada a acondicionado de sensores, instrumentación y control), y ampliarla a Electrónica Física (curso 4, orientada a dispositivos).

III. Descripción del trabajo

A. Objetivo

El propósito de este trabajo es ampliar el material docente elaborado previamente en formato de píldoras audiovisuales de apoyo a las sesiones de prácticas presenciales de la asignatura Técnicas Físicas II, obligatoria de tercer curso del Grado en Física, extendiendo el uso de este tipo de formato a explicaciones de diferentes programas de simulación de dispositivos y circuitos discretos e integrados, para aplicarlos en las sesiones de teoría y de problemas no sólo de Técnicas Físicas II, sino también de la asignatura, también obligatoria, de Electrónica Física de cuarto curso.

En particular, en electrónica, la simulación se muestra como una herramienta de enorme importancia para la comprensión de una forma rápida y fácil del funcionamiento de dispositivos, circuitos y sistemas electrónicos, visualizando su comportamiento real frente a los estudios simplificados que se realizan de forma analítica, siendo un paso muy importante intermedio entre el análisis y la caracterización experimental, y clave en el ámbito industrial.

Así, el objetivo es mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje con diferentes problemas concretos en cada asignatura que, o bien se han estudiado de forma teórica, o bien serán validados en sesiones de laboratorio, al mismo tiempo que se introducen las propias herramientas de diseño y simulación, manteniendo una continuidad en su utilización en los últimos cursos del grado.

Para esto consideramos que es fundamental el uso de herramientas y recursos TIC open source, siguiendo la línea marcada la Universidad de Zaragoza por el uso de software y recursos libres [8], cada vez más extendida en todos los ámbitos académicos y en sus diferentes niveles, regional, nacional y europeo.

Debemos destacar asimismo que esta experiencia se encuentra alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) marcados en la Agenda 2030 de Naciones Unidas ODS-4 Educación de Calidad y ODS-8 Trabajo decente y crecimiento económico [9, 10].

B. Desarrollo

En base a las competencias de las asignaturas y a la experiencia de cursos anteriores, se elaboró el contenido que se consideró debía incluirse en estas píldoras audiovisuales, estructurando la explicación a incluir para finalmente realizar la grabación del material. Los videos han sido grabados, al igual que en la experiencia previa [4] utilizando para la grabación de la pantalla del ordenador el programa de software libre OBS Studio [11], y para el montaje final el programa OpenShot Video Editor [12], también libre.

Las herramientas libres de diseño y simulación escogidas son:

- TINA-TI [13], como herramienta de simulación analógico-mixta SPICE, que permite completar los análisis básicos en DC, AC, transitorios y ruido entre otros, a nivel esquemático, trabajando con circuitos integrados. Resulta por tanto adecuado para el diseño, simulación y verificación tanto de etapas básicas de acondicionado, (amplificadoras y filtros) basados en Amplificadores Operacionales (AO) TL082 y μA741 que se consideran en la asignatura TFII de tercer curso, como para simular curvas características I-V de dispositivos (diodo, diodo zéner, transistor BJT, transistor MOS) y sus aplicaciones básicas, que se introducen en la asignatura de Electrónica Física en cuarto curso del grado en Física.

- FilterPro-TI [14], como herramienta de diseño de filtros activos como conexión en cascada de etapas básicas de orden 1 y orden 2, que permite el diseño de cualquier filtro *Buttherworth*, *Chebyshev*, *Bessel*, *Gaussian*, *Linear Phase* tipo pasa-baja (LPF), pasa alta (HPF), pasa-banda (BPF), rechazo-banda en base a la definición de sus especificaciones, haciendo uso de dos de las arquitecturas más comúnmente utilizadas, *Sallen-Key* y realimentación múltiple (MFB) para la implementación.

Así, este curso 2023-24, se han elaborado y puesto a disposición de los estudiantes de la asignatura de TFII dos video-tutoriales de estas dos herramientas. Este material, en forma de enlace al video correspondiente alojado en un drive del equipo docente, está disponible en el Anillo Digital Docente (ADD) de la Universidad de Zaragoza [15], dentro de la asignatura, en una carpeta denominada Software de diseño electrónico (Figura 1), que incluye además un tutorial en pdf de la herramienta correspondiente y los recursos *open source* instalables necesarios.

Fig. 1. Material disponible en el ADD con detalle de enlace a videos

De esta forma todos los estudiantes pueden tener en su portátil o dispositivo habitual de trabajo y acceso a la información ambos programas disponibles.

C. Contenido

C.1 Píldora TINA-TI

En este video (Fig. 2), de 20 minutos de duración, se realiza una introducción a SPICE y se presenta el proceso de diseño y simulación tomando como referencia una etapa amplificadora inversora basada el AO µA741, considerando:

1) Editor de esquemáticos, incluyendo bloques activos, elementos pasivos, fuentes de alimentación/tierra y fuentes de excitación y su unión para configurar el esquema deseado;

2) Simulación, mostrando las diferentes opciones disponibles (verificación ERC, DC, AC TR) y las diferentes medidas que pueden realizarse en cada caso.

De esta forma se pueden parametrizar las no idealidades, como la tensión offset, caracterizar el ancho de banda y fase en la frecuencia de corte y compararlo con sus valores teóricos, o validar el rango lineal de salida, conceptos todos que se introducen en las sesiones teóricas y de problemas.

Asimismo, la sesión LAB1 está dedica a caracterización de etapas amplificadoras, pero haciendo uso del TL082, de forma que pueden completar un proceso de diseño y simulación haciendo uso de este AO, obteniendo los resultados esperados por simulación de las configuraciones que van a montar experimentalmente, de forma que pueden comparar resultados teóricos (análisis simplificado), resultados de simulación y resultados experimentales.

C.2 Píldora FilterPro

En este video (Fig. 3), también de 20 minutos de duración, se realiza una introducción al diseño de filtros centrada en Buttherworth, Chebyshev y Bessel, que son los presentados en las sesiones teóricas, tomando como referencia un primero un filtro tipo pasa-baja, y a continuación un pasa-banda, visualizando sus diferencias y compromisos entre parámetros. Se completa el proceso de diseño, introduciendo tolerancia en componentes, hasta obtener el diseño final con su esquemático completo y caracterización en base a un AO ideal, con su producto ganancia-anchura de banda (GBW) requerido para cumplir las especificaciones deseadas.

La sesión de laboratorio LAB2 precisa la realización del diseño de un filtro pasa banda en base a unas especificaciones dadas en el guión de trabajo de la sesión, que debe completarse previamente a la realización presencial de la práctica, donde se completa su caracterización experimental. La caracterización automatizada de este mismo filtro se aborda en la sesión LAB3, de forma que para el diseño del BPF realizado en FilterPro es posible comparar los resultados de simulación obtenidos con TINA-TI, los resultados de la caracterización manual de la sesión LAB2 y los resultados de la caracterización automatizad de la sesión LAB3.

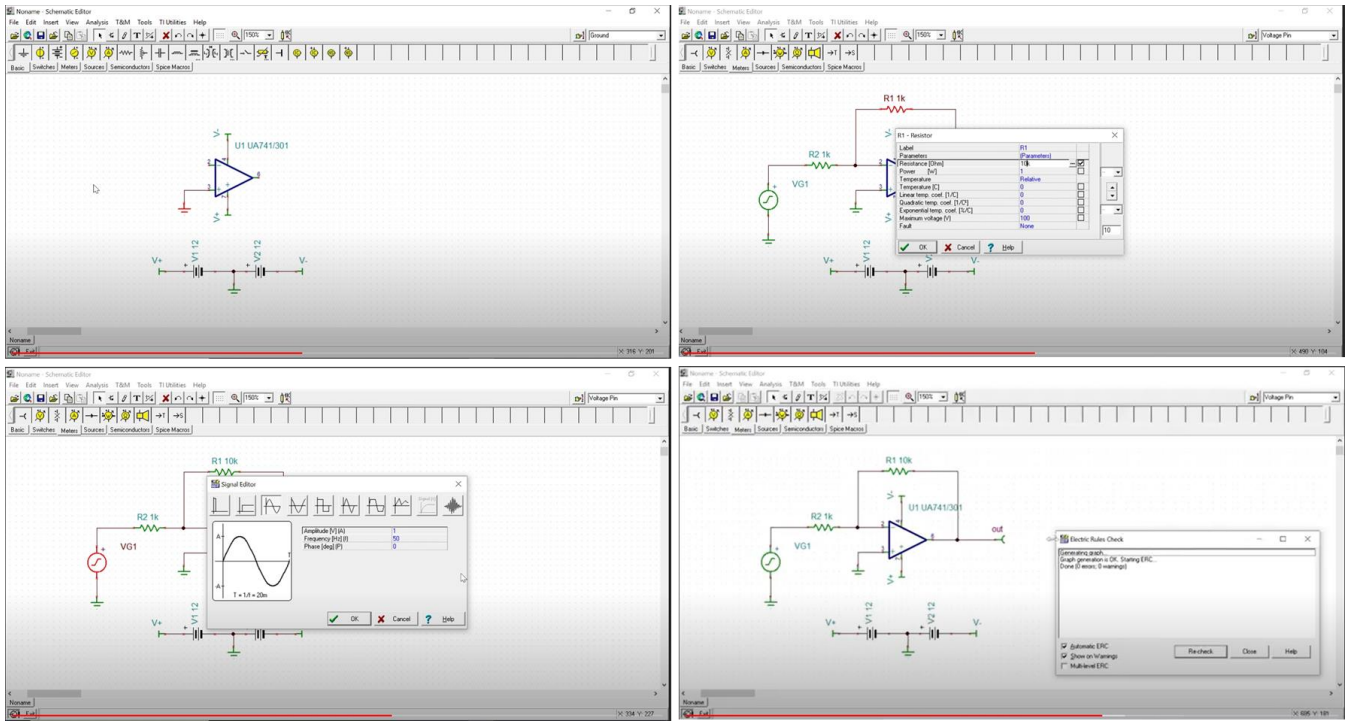
IV. Resultados

Las valoraciones preliminares de los estudiantes de la asignatura de tercer curso de Técnicas Físicas II del material elaborado en formato de píldoras audiovisuales como material de apoyo complementario han sido positivas, destacando:

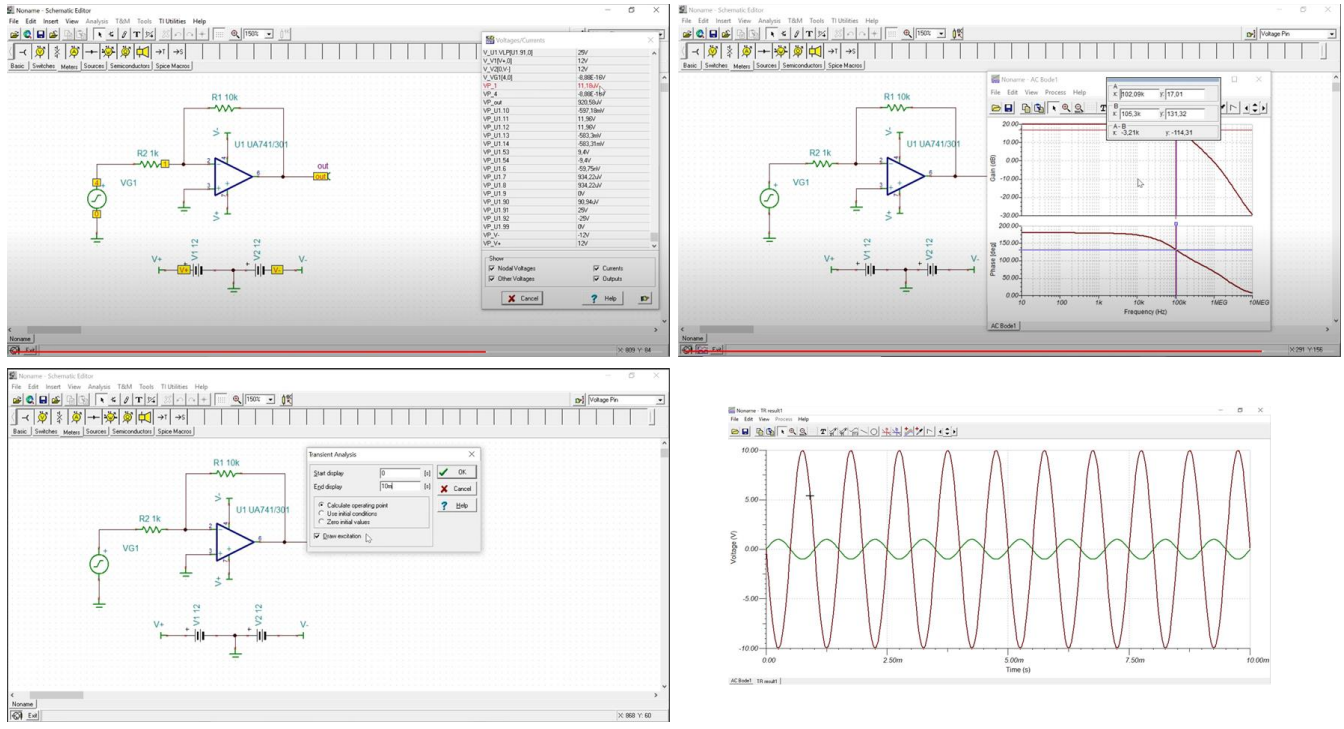
(i) el interés y potencial de las herramientas de diseño y simulación, que permiten la validación de un comportamiento más realista de los circuitos y sistemas, y la revisión de los diferentes conceptos teóricos y sus no-idealidades, facilitando su comprensión mediante la visualización directa mediante simulación y de una manera autónoma;

(ii) la utilidad en términos de aprendizaje autónomo asíncrono, permitiendo que cada estudiante visualice los contenidos en el momento de su preparación de la correspondiente sesión de laboratorio, con la posibilidad de re-visualización de únicamente los aspectos que consideran necesarios incluso en la propia sesión de laboratorio.

En esta buena aceptación por parte del alumnado consideramos que es clave el propio formato del recurso educativo, ampliamente utilizado por los estudiantes que hoy en días son audiovisuales y tecnológicos, con un uso frecuente de los móviles, tablets o portátiles para consultar y compartir información accesible en cualquier momento y en cualquier lugar, además de introducir herramientas y recursos TIC open source que tienen una proyección de futuro.



a)



b)

Fig. 2. Capturas del video de simulación de circuitos integrados con TINA: (a) Edición de esquemáticos, tomando como referencia una etapa amplificadora inversora basada en el AO μA741 y (b) simulación del esquemático: análisis DC, análisis AC y análisis transitorio, con visualización de resultados

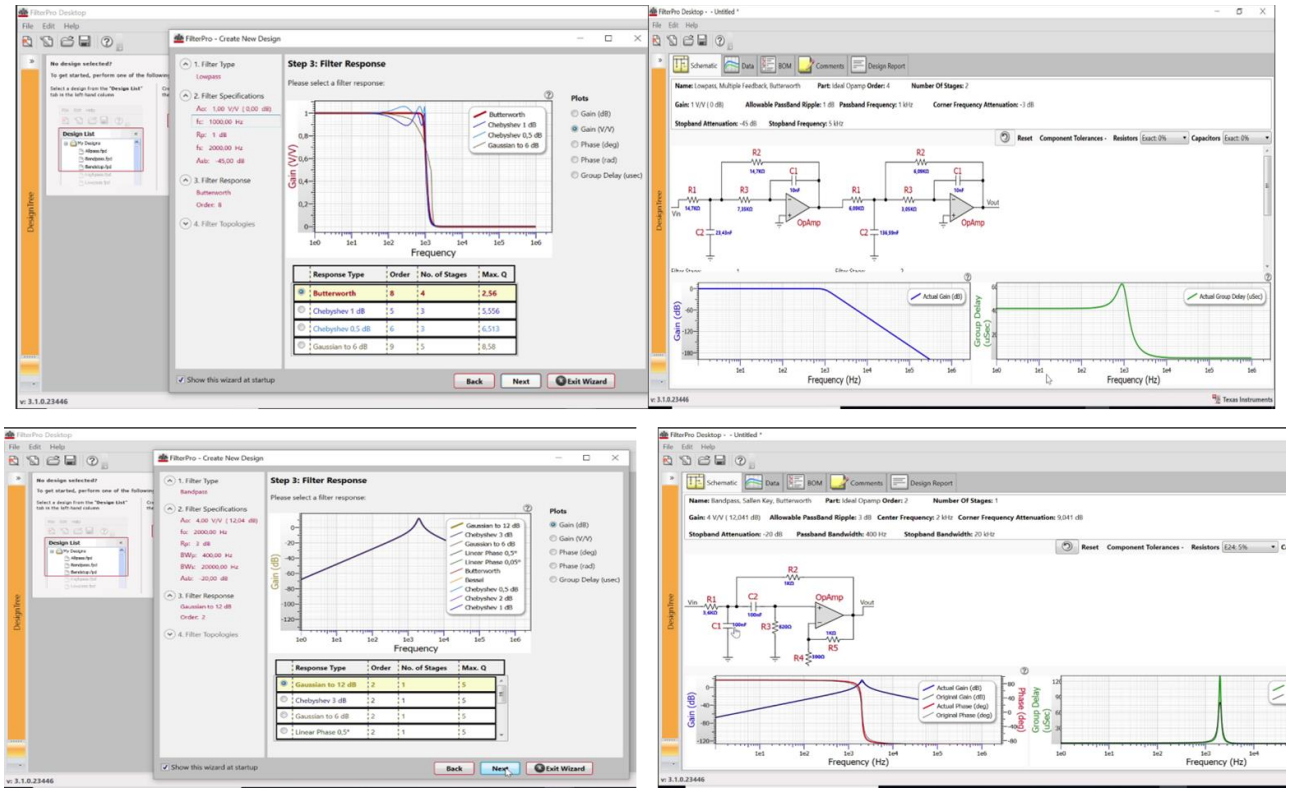


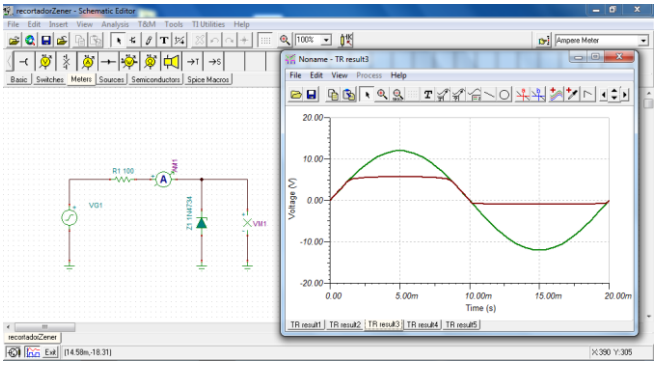
Fig. 3 Capturas del video de diseño de filtros activos con FilterPro: ejemplo de filtro pasa-baja (LPF, arriba) y ejemplo de filtro pasa-banda (BPF, abajo)

En ese sentido, actualmente para la asignatura de Electrónica Física de cuarto curso, puesto que la herramienta TINA ya se ha introducido y manejado en tercero, se está trabajando en la elaboración de un conjunto de ejemplos de simulación que incluyan aspectos fundamentales específicos de la asignatura y que serán accesibles el curso que viene igualmente a través del ADD de la Universidad de Zaragoza.

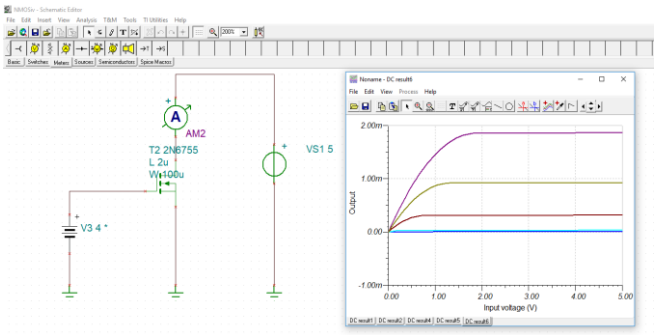
Así, inicialmente, se ha definido la implementación de los ficheros correspondientes a las curvas características de los dispositivos básicos electrónicos (diodo, diodo zéner, transistor BJT, transistor MOS) y aplicaciones básicas (rectificación, circuitos limitadores/recortadores, mono-etapas amplificadoras, puertas CMOS). Como ejemplos, se muestra en la Figura 4a la simulación de un circuito recortador de un umbral con zéner, y la Figura 4b muestra las curvas características $I_D=f(V_{DS})$ de un transistor NMOS.

En base a la experiencia del equipo docente, otro aspecto positivo derivado de la introducción de este tipo de recurso es que permite que estudiantes que en tercer curso en el año precedente han estado de Erasmus, en cuarto puedan nivelarse con sus compañeros mediante la visualización de los videos de uso del osciloscopio y TINA, que son los requeridos en la asignatura de cuarto curso, además de opcionalmente, adquirir las competencias relacionadas con automatización de medidas.

Finalmente señalar que como cuestión abierta se está valorando la posibilidad de introducir subtítulos en inglés, de forma que estos recursos sean accesibles también de una forma más inmediata para los estudiantes Erasmus, cuyo número es creciente en la Universidad y en particular en estas asignaturas de carácter más aplicado.



a)



b)

Fig. 4. (a) Simulación circuito recortador de un umbral con zener y (b) curvas características $I_D=f(V_{DS})$ de un transistor NMOS.

V. Conclusiones

La elaboración de píldoras formativas audiovisuales para abordar conceptos específicos, que se encuentren distribuidas convenientemente a lo largo de una asignatura o conjunto de asignaturas relacionadas, sin duda contribuye al aprendizaje y será uno de los recursos educativos con presencia en la futura enseñanza universitaria. En concreto, en nuestro caso consideramos nos permite abordar con éxito la integración de conocimientos teóricos y prácticos de apoyo tanto a las sesiones teóricas y de problemas como a las sesiones de prácticas presenciales, y la adquisición de procedimientos y destrezas específicos.

Asimismo, el conocimiento y manejo de las propias herramientas de simulación introducidas permiten completar un proceso de diseño completo siguiendo una metodología más parecida a la desarrollada en un entorno laboral, como paso intermedio desde la definición de especificaciones hasta el montaje y caracterización experimental, siendo éste un paso clave en los entornos industriales, contribuyendo de este modo a la formación integral de los estudiantes para desempeñarse en su futuro trabajo.

Referencias

[1] J. D. Urchaga Litago, M. J. Finez Silva, y M. C. Morán Astorga, "Innovación educativa: revisión de experiencias con píldoras educativas o formativas", *Revista INFAD de Psicología*, vol. 2, n.º 1, pp. 109–116, jul. 2022.

[2] https://estudios.unizar.es/estudio/asignatura?anyo_academico=2023&asignatura_id=26920&estudio_id=20230124&centro_id=100&plan_id_nk=447, último acceso 25/03/24

[3] Página web de la oferta de estudios del Grado en Física de la Universidad de Zaragoza. Último acceso 06/03/2022. https://estudios.unizar.es/estudio/ver?id=124

[4] J. Pérez-Bailón, B. Calvo, N. Medrano, D. Antolín, "Píldoras Audiovisuales como Apoyo a las Sesiones de Laboratorio", Actas del Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica TAEE 2022, Teruel, España, 2022.

[5] https://estudios.unizar.es/estudio/asignatura?anyo_academico=2023&asignatura_id=26928&estudio_id=20230124&centro_id=100&plan_id_nk=447, último acceso 25/03/24

[6] Datasheet del osciloscopio DSO-X2002A, último acceso 10/03/2024. https://www.keysight.com/zz/en/assets/7018-02733/data-sheets/5990-6618.pdf

[7] Guía de usuario de NI-USB6008 de National Instruments, último acceso 10/03/2024. https://www.ni.com/pdf/manuals/371303n.pdf

[8] https://add.unizar.es/add/campusvirtual/recursos-educativos-en-abierto, último acceso 09/03/24

[9] Página web Naciones Unidas, ODS 4. Educación de calidad, último acceso 10/03/24. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/education/

[10] Página web Naciones Unidas, ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico, último acceso 10/03/24. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/economic-growth/

[11] OBS Studio, último acceso 10/03/2024. https://obsproject.com/es

[12] OpenShot Video Editor, último acceso 10/03/2024. https://www.openshot.org

[13] https://www.ti.com/tool/TINA-TI, último acceso 25/03/24

[14] https://webench.ti.com/filter-design-tool/, último acceso 25/03/24

[15] https://moodle.unizar.es/add/, último acceso 25/03/24

S5A – SECONDARY EDUCATION AND VOCATIONAL TRAINING EXPERIENCES AND PROJECTS 2

Estudiantes de ingeniería enseñando electrónica y programación a niños en un curso curricular

Leandro Díaz
Instituto de Ingeniería Eléctrica
Universidad de la República
Montevideo, Uruguay
leandrod@fing.edu.uy

Federico Favaro
Instituto de Ingeniería Eléctrica
Universidad de la República
Montevideo, Uruguay
ffavaro@fing.edu.uy

Francisco Veirano
Instituto de Ingeniería Eléctrica
Universidad de la República
Montevideo, Uruguay
fveirano@fing.edu.uy

Julio Pérez Acle
Instituto de Ingeniería Eléctrica
Universidad de la República
Montevideo, Uruguay
julio@fing.edu.uy

Eduardo Boemo
Laboratorio de Sistemas Digitales
Universidad Autónoma de Madrid
Madrid, España
eduardo.boemo@uam.es

Juan P. Oliver
Instituto de Ingeniería Eléctrica
Universidad de la República
Montevideo, Uruguay
jpo@fing.edu.uy

***Resumen*—Se presenta un proyecto educativo cuyo objetivo es fomentar la vocación por las carreras técnicas en niños y adolescentes de Uruguay, enmarcado en la iniciativa Ceibal. Durante un período de 5 años se han organizado cursos donde estudiantes de Ingeniería Eléctrica y Computación aprenden a utilizar placas micro:bit y luego vuelcan sus conocimientos a niños (10 a 14 años). El curso tiene un doble formato: una primera parte en dónde se aprenden los conceptos básicos de dichas placas y posteriormente una segunda parte que consiste en realizar un trabajo en campo. Éste consiste en dar apoyo a centros educativos incluyendo: preparación de material didáctico, capacitación de maestros y profesores, dictado de talleres y colaboración en proyectos de desarrollo. La experiencia ha sido altamente exitosa para todos los involucrados: estudiantes de ingeniería, niños y centros educativos.**

***Index Terms*—STEM, niños (10 a 14 años), Micro:bit, electrónica, programación**

I. Introducción

La demanda de profesionales de STEM (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics*) crece con el impacto de la tecnología. A pesar de ser profesiones con remuneraciones altas y con tasas de desempleo nulo, hay una disminución de la cantidad de estudiantes en ciertas áreas de las ingenierías [1], [2]. Atraer estudiantes a las carreras de ciencias e ingeniería se considera un elemento fundamental para beneficiar tanto a la economía como a la sociedad [3]. Este proyecto se enmarca como una actividad más de "Ceibal" [4], una iniciativa uruguaya para implementar el modelo *"One laptop per child"* [5], [6] creada en el año 2007. A través de Ceibal cada niño que ingresa al sistema educativo público nacional accede a un ordenador personal (*laptop*) con conexión a Internet gratuita desde el centro educativo. Ceibal surgió a raíz de la brecha digital que existía en Uruguay entre las personas que no tenían acceso a la tecnología y las que sí. Planteó tres valores principales: distribuir tecnología, promover el conocimiento y generar equidad social. Ceibal abarcó además la creación de un plan de formación de docentes de educación primaria y secundaria y la inclusión activa de los mismos y de la sociedad en su conjunto como parte de la iniciativa.

Parcialmente financiado por CEIBAL

En 2018 Ceibal se propuso repartir dispositivos electrónicos con capacidad de interactuar con el mundo real para llevar esta tecnología al trabajo habitual de aula a través de juegos y ejercicios sencillos [7]. El dispositivo seleccionado fue una pequeña placa programable desarrollada por la Fundación Educativa Micro:bit de la BBC. Esta placa, denominada micro:bit [8], permite el acercamiento de estudiantes y docentes a la programación y a la creación de tecnología, sin la necesidad de tener conocimientos previos. Desde el inicio de este proyecto en Ceibal en 2018, más de 140.000 estudiantes y docentes de todo Uruguay han recibido una placa programable micro:bit y continúan formándose en su uso. Además, integran una comunidad virtual en la cual acceden a desafíos, tutoriales y retos, intercambian con pares y crean proyectos propios con la guía de un equipo de tutores [7].

Para gestionar los volúmenes de placas repartidas y de alumnos y educadores involucrados fue necesario incorporar mecanismos de formación de recursos humanos. Es ahí donde aparece la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, Uruguay (Udelar) como uno de los colaboradores, sumando estudiantes de ingeniería al proyecto. El plan para esto fue crear un curso dirigido a estudiantes de ingeniería de las carreras de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería en Computación, y capacitarlos en el uso de las placas micro:bit. Posteriormente, y como parte del curso, esos estudiantes actúan como multiplicadores difundiendo la formación adquirida entre docentes y alumnos de enseñanza primaria y media. Esta experiencia fue muy exitosa y es la que se describe en el resto del artículo.

La finalidad buscada fue múltiple: por un lado aumentar la oferta de cursos opcionales en áreas de sistemas embebidos para los estudiantes de ingeniería en las carreras involucradas, y por otro lado promover entre los alumnos de enseñanza

primaria y media experiencias atractivas como forma de fomentar la elección de carreras en las áreas STEM [9].

Esta experiencia se enmarca en la metodología denominada aprendizaje a través de servicio (Aprendizaje-Servicio o ApS). Existe una numerosa bibliografía de esta metodología que abarca desde la definición de sus conceptos básicos y las habilidades que permite desarrollar en los estudiantes [10]–[13], hasta la presentación de una gran cantidad de experiencias exitosas de las cuales citamos solamente unas pocas como ejemplo [14]–[17].

Existe un consenso en que es una actividad de ida y vuelta en donde la comunidad se beneficia por la acción de los estudiantes y a su vez éstos aprenden habilidades transversales.

En resumen, en este trabajo se reporta una experiencia de ApS con la particularidad de que la actividad principal de servicio consiste en enseñar a niños y educadores a través de talleres. El proyecto además promueve una nueva forma de adquirir conocimientos y habilidades por parte de los estudiantes de ingeniería de la Udelar.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera. En la Sección II se describen aspectos generales del proyecto educativo y se detalla la metodología de trabajo. Esto incluye una descripción de las actividades realizadas en el curso. Luego, en la Sección III se presentan los resultados obtenidos. Finalmente, en la Sección IV se presentan las conclusiones.

II. Descripción del trabajo

La actividad se enmarca dentro del plan de estudios de las carreras de Ingeniería Eléctrica [18] e Ingeniería en Computación [19] de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. A través de cursos denominados Módulo Taller o Módulo de Extensión, se ofrece a los estudiantes la posibilidad de obtener créditos en el área de prácticas de ingeniería o interacción con el entorno. El término "entorno" se refiere a cualquier entidad externa a la universidad. Incluye instituciones y personas relacionadas con la enseñanza primaria y secundaria pública en Uruguay, personal de Ceibal, educadores y niños. El curso otorga una cantidad de créditos que equivalen a 60 horas de trabajo en el semestre. Esto implica una carga promedio de 4 horas por semana. Los estudiantes tienen otras alternativas para cumplir con los créditos requeridos en esta área. En el caso de la carrera de Ingeniería Eléctrica, la mayoría de ellos realizan un taller que debe realizarse en el primer semestre de la carrera. El curso aquí presentado provee una alternativa a estudiantes que por diversos motivos no pudieron hacer ese taller en el primer semestre o que se sienten especialmente motivados por la temática. Se busca que el curso no interfiera con otras asignaturas. Por ello, dado que los participantes provienen de distintas carreras y con diversos avances, se suspenden las actividades durante los períodos de evaluación (parciales y exámenes).

Desde la perspectiva del entorno, el propósito fundamental de esta actividad es fomentar el pensamiento abstracto y lógico-matemático entre los estudiantes de primaria y secundaria, haciendo uso de la tecnología. Micro:bit permite la incorporación de hardware adicional y la programación de *firmware*. Se pueden llevar a cabo una variedad de proyectos aplicados estimulantes para niños y adolescentes.

Desde la perspectiva universitaria, esta actividad puede llevarse a cabo en diferentes etapas de la carrera, lo que implica que los objetivos de aprendizaje varíen según el estudiante.

Para aquellos en etapas más avanzadas, el enfoque principal radica en mejorar las habilidades de comunicación y trabajo en equipo. Adicionalmente, contribuye a fomentar la capacidad para interactuar con individuos ajenos al ámbito de la ingeniería sobre temas técnicos de cierta complejidad, representando un desafío en la transmisión de conocimientos.

Por otro lado, para los estudiantes en los primeros años de la carrera, donde predominan los cursos de matemáticas y física, esta actividad es una primera aproximación a la ingeniería eléctrica y computacional. Además, les proporciona conocimientos básicos sobre sistemas embebidos y el desarrollo de *firmware*. A lo largo de los años, las actividades propuestas han sido diversas, pero en todos los casos se han diseñado con el propósito de cumplir con los objetivos mencionados anteriormente. A continuación, se presentan algunas de estas actividades:

- Realización de talleres sobre el uso de la micro:bit destinados a estudiantes de educación primaria y secundaria.
- Realización de talleres sobre el uso de la micro:bit dirigidos a profesores y maestros de educación primaria y secundaria.
- Organización de talleres sobre el uso de la micro:bit dirigidos al personal del centro Ceibal.
- Elaboración de proyectos específicos, junto con la creación de material didáctico que permita su reproducción por parte de estudiantes de primaria y secundaria.
- Brindar apoyo y orientación a grupos de estudiantes de primaria y secundaria en el desarrollo de sus propios proyectos utilizando la plataforma micro:bit.
- Participación en un foro en la plataforma de Ceibal, donde niños y adolescentes tienen la oportunidad de plantear preguntas sobre el uso de la micro:bit.
- Presentación de desafíos en el foro que pueden ser resueltos utilizando la micro:bit.
- Producción de material audiovisual en forma de tutoriales sobre el uso de la micro:bit.

II-A. Metodología

La metodología de trabajo se aplica de manera consistente en todas las actividades. Al comienzo del semestre, los estudiantes inscriptos en el curso se organizan en grupos de entre 2 y 5 integrantes, a quienes se les ofrece la opción de seleccionar algunas de las tareas mencionadas anteriormente. El curso comprende una reunión semanal con los docentes encargados. Durante las primeras semanas, los docentes presentan los objetivos del curso y las tareas a realizar y proporcionan algunas clases expositivas sobre el uso de la

Tabla I
TAREAS DEL CURSO ORDENADAS CRONOLÓGICAMENTE.

Semana	Tareas
1	Introducción al curso. Introducción a la micro:bit.
2	Exploración de la micro:bit mediante desafíos propuestos.
3	Presentación de tareas, armado de grupos. Estudiantes empiezan a trabajar en la tarea elegida.
4	¿Cómo abordar los talleres y cómo interactuar con los niños? Clase dictada por personal de Ceibal.
5	Electrónica básica y periféricos.
6	Exposición de lo preparado por los estudiantes.
7 a 15	A partir de esta semana los estudiantes realizan las tareas de campo. Se tienen consultas y reuniones con los docentes.

plataforma. Posteriormente, se fomenta que los propios estudiantes exploren el uso de la plataforma de forma autónoma y compartan conocimientos dentro de sus grupos. Una vez que los grupos han seleccionado las actividades a llevar a cabo, se inicia la planificación y desarrollo de las mismas. Durante las reuniones semanales, se revisan los progresos y se discuten metodologías y herramientas didácticas con los estudiantes, dado que en todos los casos las actividades requieren transmitir conceptos o conocimientos, a veces complejos, a personas sin experiencia técnica. Por ejemplo, explicar el concepto de una variable en un programa de computadora a un niño de 10 años puede resultar desafiante. Finalmente, se coordinan las actividades con los actores externos involucrados y se llevan a cabo bajo la supervisión y acompañamiento de los docentes del curso. En la Tabla I se muestra un resumen de las tareas del curso ordenadas cronológicamente.

II-B. Actividades propuestas

Realización de talleres sobre el uso de la micro:bit destinados a estudiantes de educación primaria y secundaria.

En esta actividad los estudiantes de ingeniería dictan talleres a niños sobre el uso de la micro:bit y conceptos básicos de programación. Se llevan a cabo entre 15 y 30 talleres por semestre en distintos centros educativos, cada uno compuesto por dos sesiones remotas de una hora de duración cada una. El público es variado según la clase pero está entre 15 y 20 niños. El centro tiene la alternativa de elegir el nivel del taller según sus necesidades, pudiendo optar por un nivel básico (destinado a participantes sin conocimientos de la micro:bit), intermedio (para aquellos que han tenido algún contacto con la micro:bit) y avanzado (dirigido a aquellos que ya tienen experiencia trabajando con la micro:bit).

Los temas de los talleres son:

- Básico: introducción a la micro:bit, entorno de desarrollo Makecode, ¿cómo programar la micro:bit? y periféricos de la micro:bit.
- Intermedio: variables y lógica, condicionales.
- Avanzado: bucles y comunicación inalámbrica.

Para la preparación de este taller, los estudiantes, tras recibir capacitación sobre el uso de micro:bit en las primeras clases, comienzan a preparar el taller en grupos de dos personas. Utilizan una plantilla que consta de diapositivas utilizadas en cursos anteriores, la cual se va mejorando cada año. Los estudiantes trabajan sobre ella, realizando modificaciones según sus preferencias sin alterar el orden ni los temas establecidos. El tiempo requerido para la preparación del taller puede variar entre 3 y 5 semanas. En este período, los estudiantes tienen una charla con personal de Ceibal capacitado en pedagogía, quienes ofrecen recomendaciones sobre cómo abordar los talleres a centros y como interactuar con los niños. En la última semana de preparación los estudiantes realizan una presentación demostrativa frente a los docentes y otros compañeros. Una vez completada esa etapa, están en condiciones de dictar los talleres a los centros.

Los primeros talleres de cada grupo se llevan a cabo bajo la supervisión directa de un docente del curso universitario. Los restantes los dictan solos, pero siempre bajo la atenta supervisión de un docente del centro educativo.

Realización de talleres sobre el uso de la micro:bit dirigidos a profesores y maestros de educación primaria y secundaria.

En este actividad se ofrece un enfoque similar al anterior aunque dirigido a un público adulto. Se llevan a cabo entre 3 y 5 talleres presenciales por semestre, generalmente enmarcados dentro de jornadas de Ceibal donde se desarrollan otras actividades. La duración de esta actividad es de 3 a 4 horas, y al igual que la actividad anterior se dicta en distintos niveles: básico y avanzado.

La temática de los talleres es:

- Básico: introducción a la micro:bit, entorno de desarrollo Makecode, ¿cómo programar la micro:bit?, periféricos de la micro:bit, variables, lógica y condicionales.
- Avanzado: bucles, pines de entrada/salida, comunicación inalámbrica y componentes eléctricos.

La preparación de estos talleres no difiere sustancialmente de los anteriores, más que en la cantidad de expositores, que suele ser entre 5 y 7 estudiantes de Facultad de Ingeniería. Esto se debe a que dichos talleres tienen un enfoque práctico, con más carga horaria y una mayor audiencia (entre 30 y 40 participantes). En esta instancia los estudiantes son acompañados por los docentes.

Brindar apoyo y orientación a grupos de estudiantes de primaria y secundaria en el desarrollo de sus propios proyectos utilizando la plataforma micro:bit

A diferencia de los anteriores, en esta actividad los estudiantes de ingeniería comienzan su participación presentándose, mediante un vídeo, al grupo de alumnos del centro

Tabla II
RESULTADOS DE LA ENCUESTA (PORCENTAJES DE RESPUESTAS PARA CADA OPCIÓN)

Pregunta / Opción	1	2	3	4	5
¿Le resultó fácil la comunicación con los niños? (1 = Muy difícil | 5 = Muy fácil)	3.6	10.9	27.3	38.2	20.0
¿Se sintió motivado por trabajar en el curso micro:bit? (1 = Muy poco motivado | 5 = Muy motivado)	1.6	3.1	12.5	29.7	53.1
¿Las preguntas técnicas realizadas por los niños/docentes le resultaron desafiantes? (1 = Nada desafiantes | 5 = Muy desafiantes)	11.5	21.3	44.3	18.0	4.9
¿Recomendarías este curso a otros compañeros? (1 = No lo recomendaría | 5 = Lo recomendaría fuertemente)	0.0	6.3	7.8	32.8	53.1
¿Qué te pareció el curso micro:bit? (1 = Muy malo | 5 = Muy bueno)	1.6	1.6	9.4	32.8	54.7

educativo interesados en la actividad, que generalmente involucra entre 5 y 10 niños. Posteriormente, se coordina una primera reunión donde el centro brinda información sobre la problemática que está intentando resolver, así como su avance y los desafíos actuales que enfrenta. A esta primer reunión asisten también los docentes de Facultad de Ingeniería.

Posteriormente, los participantes del curso tienen una reunión semanal con el centro educativo, en formato presencial o virtual, para revisar el progreso, aclarar dudas y recibir sugerencias sobre el proyecto. Las reuniones presenciales se realizan en las instalaciones del mismo centro. Por lo tanto los estudiantes deben viajar hacia el lugar que, en algunos casos, está en una ciudad diferente.

Es importante destacar que, en ocasiones, pueden surgir consultas desde el centro educativo que los estudiantes del curso no pueden responder inmediatamente debido a la falta de conocimiento. Para resolver esto se realizan una o más reuniones semanales con el equipo docente. Durante estas sesiones, se plantean las dudas, que generalmente están relacionados con temas avanzados de electrónica. En esta actividad los futuros ingenieros no deben resolver la problemática del centro, sino proporcionar apoyo para que el centro pueda abordarlos por sí mismo.

II-C. Coordinación de las actividades

La coordinación de las actividades mencionadas en la sección II-B se realiza en conjunto con Ceibal. Cada taller requiere la coordinación entre un grupo de estudiantes de ingeniería y el centro educativo. Esta coordinación la realiza Ceibal de forma independiente para cada centro educativo y es, en general, un proceso trabajoso. En primer lugar, debido a que los estudiantes universitarios no siempre tienen buena disponibilidad en horario escolar. En segundo lugar, porque la comunicación con los centros educativos no es lo suficientemente fluida.

III. RESULTADOS OBTENIDOS

En los últimos 5 años han participado 107 estudiantes de ingeniería en el programa. Se han realizado casi 100 talleres para niños y 15 talleres para docentes, brindado apoyo a 11 proyectos de centros educativos y creado más de 5 proyectos replicables. En total, se estima que alrededor de 3,000 personas, entre niños y docentes, se han beneficiado de estas iniciativas. Este último aspecto subraya cómo la actividad contribuye a cumplir una de las metas de Ceibal, que es lograr insertar la enseñanza de placas micro:bit en la mayor cantidad posible de centros educativos del país. La colaboración con la Facultad de Ingeniería permite aumentar las capacidades de Ceibal, logrando abarcar una mayor cantidad de centros, que de lo contrario no tendría los recursos para hacerlo.

Desde la perspectiva académica de ingeniería la participación ha sido buena, a pesar de tratarse de una actividad no obligatoria. En general, se ha tenido un número de inscriptos adecuado para poder realizar el curso. Específicamente, 12 participantes en 2018, 48 en 2019, en 2020 no se dictó, 25 en 2021, 9 en 2022 y 13 en 2023. Es importante destacar que el curso ha logrado mantener una tasa de suspensos del 0 % y una baja deserción a lo largo de los años, lo que sugiere un alto nivel de compromiso y satisfacción por parte de los estudiantes.

Desde la perspectiva de los futuros ingenieros, los resultados han sido muy positivos. Al finalizar el curso se realiza una encuesta no obligatoria dónde se recaba la opinión sobre el curso. La Tabla II muestra alguno de los resultados de dicha encuesta. El 54.7 % de los estudiantes valoró como muy bueno el curso micro:bit y el 32.8 % como bueno. El 53.1 % se sintió muy motivado por trabajar en el curso micro:bit y el 29.7 % como motivado. También se resalta que un alto porcentaje de los participantes recomendaría el curso a otros compañeros.

Respecto a la carga horaria, el 89 % considera que el tiempo dedicado al curso es acorde a los créditos que otorga, mientras que el 5 % cree que se requiere más tiempo y el 6 % que requiere menos tiempo.

La Fig. 1 muestra las habilidades que los estudiantes declaran haber adquirido en el curso. Se destacan habilidades transversales como el trabajo en equipo (74 %) y habilidades de comunicación (71 %). Respecto a aprendizajes sobre tecnología, los porcentajes son menores. Este resultado es esperable, ya que muchos de los estudiantes ya tienen el suficiente avance en la carrera y las temáticas del curso no les representan un desafío desde lo técnico. Esta conclusión se ve reflejada en que solamente el 34 % adquirió conocimientos de *software*. Una habilidad adquirida en buena proporción es el conocimiento sobre sensores, con un 66 %. Esto es

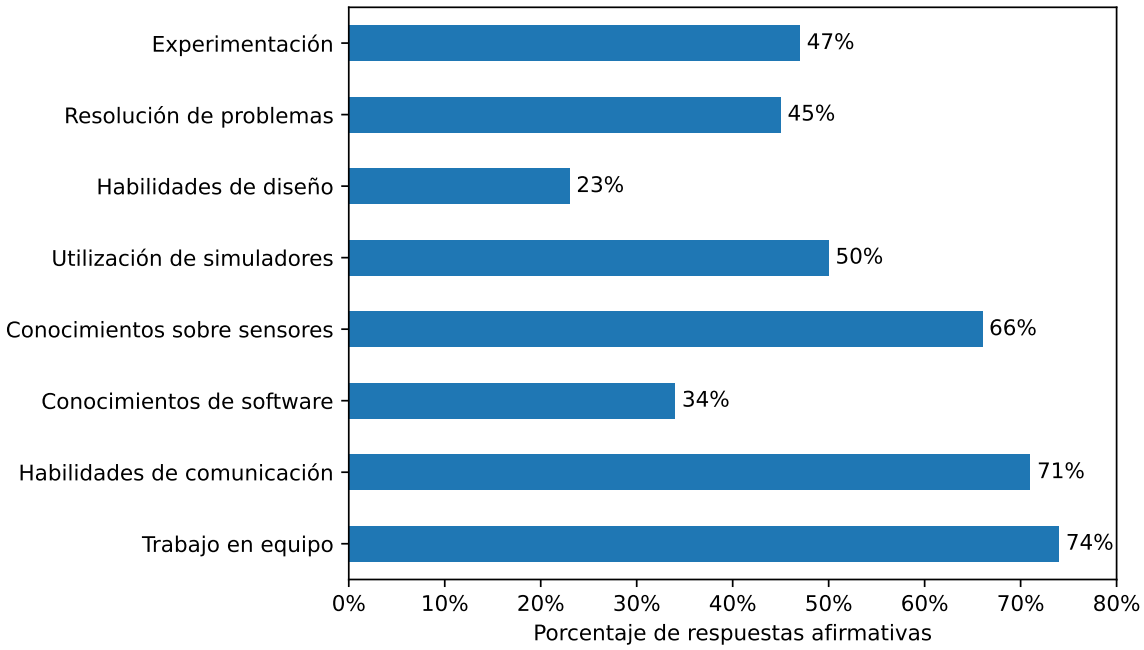


Figura 1. Conjunto de habilidades aprendidas por los estudiantes en el curso. Para cada habilidad se muestra el porcentaje de participantes que declara haberla aprendido.

esperable en estudiantes iniciales pero también en estudiantes de computación, que generalmente no tratan con cuestiones de electrónica o sensores en la carrera.

Varios de los participantes comentaron tener problemas en el dictado de talleres a centros educativos debido a la disparidad de los recursos tecnológicos disponibles en los centros. Mientras que algunos centros contaban únicamente con una PC para todo el grupo, otros disponían de una PC por alumno. Esto requirió que los estudiantes ajustaran su planificación en el momento según las circunstancias específicas de cada centro.

IV. Conclusiones

El proyecto educativo ApS presentado, que involucra a estudiantes de ingeniería enseñando electrónica y programación a niños y docentes de educación primaria y secundaria, ha demostrado ser exitoso y beneficioso para todas las partes involucradas.

Los futuros ingenieros han adquirido habilidades valiosas entre las que se destacan trabajo en equipo, comunicación y conocimientos tecnológicos. Esta adquisición se refleja en la alta satisfacción de los estudiantes de ingeniería, con un porcentaje significativo de ellos valorando positivamente la motivación y calidad del curso. El proyecto ha tenido un impacto significativo en la comunidad educativa, beneficiando a alrededor de 3,000 niños y docentes. Ha contribuido además al objetivo más amplio de la iniciativa Ceibal de promover el uso de la tecnología en la educación. De las sucesivas renovaciones del convenio para continuar con este trabajo se desprende una buena evaluación del mismo por parte de Ceibal.

En conclusión, este proyecto educativo representa un ejemplo exitoso de colaboración entre la universidad y Ceibal para promover el aprendizaje de STEM entre los niños y adolescentes, al mismo tiempo que brinda a los estudiantes universitarios una experiencia enriquecedora y formativa.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido posible gracias a la iniciativa del personal de Ceibal, y el aporte de la Fundación Julio Ricaldoni y de los docentes y estudiantes de ingeniería que participaron a lo largo de las sucesivas ediciones del curso.

Referencias

[1] S. Rocker Yoel and Y. J. Dori, “First high-school students and first graduates: Stem exposure and career choices,” *IEEE Transactions on Education*, vol. 65, no. 2, pp. 167–176, 2022.

[2] OECD, *Education at a Glance 2023: OECD Indicators*. Paris: OECD Publishing, 2023. [Online]. Available: https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/e13bef63-en

[3] J. Laut, T. Bartolini, and M. Porfiri, “Bioinspiring an interest in stem,” *IEEE Transactions on Education*, vol. 58, no. 1, pp. 48–55, 2015.

[4] Ceibal, “Ceibal,” [Accessed 15-03-2024]. [Online]. Available: https://ceibal.edu.uy/

[5] N. Negroponte, W. Bender, A. Battro, and D. Cavallo, “One laptop per child,” in *Keynote address at National Educational Computing Conference in San Diego, CA. Retrieved April*, vol. 5, 2006.

[6] I. OLPC, “OLPC,” [Accessed 2024-03-18. [Online]. Available: https://laptop.org/

[7] Ceibal, “Ceibal micro:bit,” [Accessed 15-03-2024]. [Online]. Available: https://microbit.ceibal.edu.uy/

[8] Micro:bit Educational Foundation microbit.org, “Bbc micro:bit,” [Accessed 16-02-2024]. [Online]. Available: https://microbit.org/

[9] D. Lopez, “Using service learning for improving student attraction and engagement in stem studies,” in *Annual Conference of the European Society for Engineering Education*. European Society for Engineering Education (SEFI), 09 2017, p. 1053. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/2117/113240

[10] C. Cress, P. Collier, and V. Reitenauer, *Learning Through Serving: A Student Guidebook for Service-Learning and Civic Engagement Across Academic Disciplines and Cultural Communities, Second Edition*. Stylus Publishing, 2013. [Online]. Available: https://books.google.com.uy/books?id=keFaAQAAQBAJ

[11] A. Furco, "Service-learning: A balanced approach to experiential education," in *Expanding Boundaries: Serving and Learning*, 1996. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:142729592

[12] L. M. P. Galván and A. D. l. C. O. Cervantes, "El aprendizaje-servicio (APS) como estrategia para educar en ciudadanía," *Alteridad*, vol. 12, no. 2, pp. 175–187, Jun. 2017, number: 2. [Online]. Available: https://revistas.ups.edu.ec/index.php/alteridad/article/view/2.2017.04

[13] J. M. Puig Rovira, M. Gijón Casares, X. Martín, and L. Rubio i Serrano, "Aprendizaje-servicio y Educación para la Ciudadanía," *Revista de educación*, no. 1, pp. 45–67, 2011, publisher: Centro de Publicaciones Section: Revista de educación. [Online]. Available: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3734930

[14] I. Plaza García, A. Serrano Tierz, C. Medrano Sánchez, E. Sáinz Martínez, R. Igual Catalán, M. Ubé Sanjuán, and I. Saz, "Aprendizaje-servicio como innovación estratégica en la enseñanza de la electrónica," in *Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica: TAEE : Actas del XIII Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica, Tenerife, 20-22 de junio, ISBN 978-84-09-03113-9*. Universidad de La Laguna, 2018, pp. 542–547. [Online]. Available: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6828080

[15] C. Q. Graña and J. F. Rodríguez, "Taller de Desarrollo de Sistemas Electrónicos Basados en Microcontrolador Utilizando la Metodología Aprendizaje-Servicio," in *XIV Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica: Proceedings TAEE, ISBN 978-989-54758-3-4*. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2020, pp. 395–402. [Online]. Available: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7891102

[16] O. Clua and M. Feldgen, "Experiences in service learning as capstone courses," in *2020 IEEE World Conference on Engineering Education (EDUNINE)*, 2020, pp. 1–4.

[17] L. Patterson, "Engineering students empathy development through service learning: Examining individual student experiences in a technical communication course," in *2021 IEEE International Professional Communication Conference (ProComm)*, 2021, pp. 93–100.

[18] F. de Ingeniería UDELAR, "Ingeniería eléctrica," [Accessed 2024-04-04]. [Online]. Available: https://www.fing.edu.uy/es/carreras/grado/ingenieriaelectrica/

[19] ——, "Ingeniería en computación," [Accessed 2024-04-04]. [Online]. Available: https://www.fing.edu.uy/es/carrera/grado/ingeniería-en-computación

Modelo de formación para estudiantes de secundaria con vocación STEM

Fabian Alonso Lara Vargas
*Universidad Pontificia Bolivariana Grupo ITEM.*Monteria Cordoba.
Instituto Universitario de Ingenierìa Energetica Universitat Politecnica de Valencia.
Valencia España.
ORCID 0000-0001-8246-1852

Miguel Angel Ortiz Padilla
*Universidad Pontificia Bolivariana Grupo ITEM.*Monteria.
ORCID 0009-0004-3984-6115

Natali Rocio Galeano Gaviria
Colegio La Salle Montería.
ORCID 0009-0000-7490-3972

Carlos Vargas Salgado
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universitat Politècnica de València.ITEM. Instituto Universitario de Ingenierìa Energetica Universitat Politecnica de Valencia
Valencia España.
ORCID 0000-0002-9259-8374

***Abstract*— Este estudio aborda la creciente necesidad de fomentar el interés en las carreras tecnológicas entre los jóvenes, mediante la implementación de un modelo innovador basado en la enseñanza de la robótica. Mediante sesiones teórico practicas dirigidas por estudiantes de ingeniería bajo la supervisión de un docente, se promovió la tutoría entre pares, el aprendizaje colaborativo y basado en proyectos, para un caso de estudio en una institución educativa de bachillerato. La evaluación de conocimiento realizada seis meses después del finalizado programa indicó una asimilación conceptual del 70% y que luego de un año de finalizado este el 66% de los participantes mostraron que el modelo propuesto influyo en la decisión de carrera. Los resultados sugieren que el modelo propuesto basado en robótica educativa es una herramienta valiosa para inspirar a los jóvenes hacia las disciplinas STEM**

Keywords—Educational Robotics, Project learning, innovation, Collaborative Work

I. INTRODUCTION

La integración de la innovación tecnológica ha impactado significativamente la evolución de la educación en los últimos años[1]. La tecnología ha revolucionado las metodologías de enseñanza, haciendo que el aprendizaje sea más atractivo y efectivo para los estudiantes [1]. La introducción está dividida en las siguientes secciones:

A. Avances tecnologicos en la educación.

El rápido avance de la tecnología está impulsado por diversos modelos que incorporan iniciativas educativas, desarrollo profesional y participación comunitaria [2]. De manera similar, enfoques multifacéticos hacia el desarrollo profesional y de carrera, como los implementados por la oficina de Servicios de Carreras en Salud Pública de una universidad Estadounidense, aprovechan competencias fundamentales y asociaciones comunitarias para aumentar la confianza de los estudiantes y su preparación profesional [3]. Los enfoques multifacéticos en la educación al combinar métodos prácticos, interdisciplinarios y tecnológicos han demostrado ser efectivos en la mejora tanto de la confianza como de la preparación profesional de los estudiantes. Mediante proyectos reales, prácticas en empresas, y la incorporación de tecnología avanzada en el aprendizaje, los estudiantes no solo adquieren conocimientos teóricos, sino que también desarrollan habilidades prácticas críticas para el entorno laboral [3].

En la India, se resalta la necesidad de que los sistemas educativos se adapten a los rápidos cambios tecnológicos y culturales, mediante tecnologías disruptivas y el desarrollo de habilidades [4]. Además, el desarrollo de indicadores de equidad e inclusión en la industria tecnológica resalta la importancia de garantizar que el progreso tecnológico beneficie a todos los segmentos de la sociedad [5]. En resumen, los avances tecnológicos han impactado significativamente la relevancia de la educación STEM al ofrecer nuevas vías para el aprendizaje y el desarrollo de habilidades.

La literatura sugiere que los enfoques educativos multifacéticos suelen mejorar los resultados del aprendizaje en comparación con las metodologías tradicionales [6]. Sin embargo, la eficacia de estos enfoques puede variar en función de la materia, los métodos didácticos específicos empleados y el contexto en el que se aplican [7]. También se ha demostrado que la integración de la tecnología mediante el aprendizaje combinado y las herramientas TIC apoya y mejora las prácticas pedagógicas [8].

B. La importancia de la educacion STEM.

La promoción de la educación STEM (*Science, Technology, Engineering, Mathematics*) y el estímulo a los estudiantes para que sigan carreras técnicas son fundamentales para satisfacer las demandas de una fuerza laboral impulsada por la tecnología y mantener la competitividad global [9]. Estudios han demostrado que diversos factores, incluyendo influencias ambientales como el asesoramiento, las expectativas familiares y los recursos, impactan significativamente en los intereses y experiencias de

los estudiantes al seguir carreras STEM [10] . Además, programas especializados que ofrecen mentoría y oportunidades de investigación han tenido éxito en inspirar a grupos subrepresentados, como las estudiantes mujeres, a graduarse con títulos en STEM [11].

C. *Desafios de la educacion STEM.*

Investigaciones recientes han demostrado los beneficios de la educación STEM para mejorar las competencias y habilidades de los estudiantes, así como para abordar la brecha de género en tecnología. Los beneficios multifacéticos de la educación STEM no solo mejoran el pensamiento crítico de los estudiantes y habilidades del siglo XXI [12], sino que también desempeña un papel crucial en abordar las disparidades de género dentro del campo [13].

La literatura indica que, aunque la educación STEM es crucial para la competitividad económica y la prosperidad nacional [14], aún persiste una disparidad en el número de estudiantes, especialmente en grupos que siguen carreras técnicas [15]. Esta brecha se atribuye a varios factores, como la necesidad de esfuerzos comunitarios para apoyar e inspirar a estudiantes de diversos orígenes [14].

Dada la importancia de la educación STEM para la prosperidad de un país, la robótica educativa se destaca como una solución eficaz. Dada su capacidad para inspirar y preparar a estudiantes de todos los orígenes promete abordar estos desafíos, según muestran estudios sobre su implementación en escuelas primarias[14].

La robótica educativa puede influir positivamente en el interés y la preparación de los estudiantes para carreras en STEM (ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas). Los estudios indican que la implementación de currículos co-creativos de robótica en la educación primaria mejora la percepción de los estudiantes sobre las carreras STEM [16]. Además, intervenciones basadas en robótica en escuelas elementales, como sesiones de construcción y codificación con Lego WeDo, han demostrado incrementar el interés de los estudiantes en materias y carreras STEM [17].

Estos retos llevan a la necesidad de buscar métodos educativos innovadores que sean atractivos para los estudiantes. Es aquí donde el potencial de la robótica educativa como herramienta para fomentar un interés activo por las carreras STEM.

D. *Objetivos del estudio.*

El objetivo principal de esta investigación es determinar el impacto de un modelo formativo centrado en robótica educativa para fomentar el interés en carreras STEM entre estudiantes de secundaria. Con ello, se pretende, no sólo aumentar el interés general por las carreras STEM, sino abordar algunos vacíos específicos identificados, como evaluar el impacto de la mentoría estudiantil y el uso de enfoques multifacéticos.

Se desarrolla la hipótesis en la que participar en un programa de educación en robótica aumentará el interés de los estudiantes de secundaria en las carreras STEM. Lo anterior conlleva consecuentemente a la pregunta ¿cómo influye un programa de robótica educativa en el interés de los estudiantes de secundaria para continuar en carreras STEM?

E. *El modelo propuesto.*

El modelo propuesto se enfoca en el trabajo colaborativo, el aprendizaje basado en proyectos y la mentoría, transformado la robótica educativa en una herramienta pedagógica para el desarrollo de experiencias significativas. La mentoría, como parte de un enfoque de aprendizaje basado en proyectos, puede facilitar una comprensión más profunda y la retención del conocimiento al involucrar a los estudiantes en la enseñanza y evaluación mutua, como lo demuestran las mejoras en las habilidades de resolución de problemas y el rendimiento académico de un grupo de estudiantes de secundaria [18].

El trabajo en equipo es otro componente esencial, con el aprendizaje basado en proyectos, proporcionando una plataforma para que los estudiantes desarrollen competencias en trabajo colaborativo, como la gestión de proyectos y habilidades de comunicación [19], que son vitales para la empleabilidad y el éxito profesional [20]. El uso de tecnologías educativas dentro del aprendizaje basado en proyectos puede ofrecer rutas de aprendizaje personalizadas, retroalimentación en tiempo real y simulaciones avanzadas, enriqueciendo así la experiencia de aprendizaje y apoyando el desarrollo del pensamiento crítico y el aprendizaje interdisciplinario [21].

F. *Estructura del documento.*

Este trabajo está organizado en varias secciones, la primera sección describe, los principios del modelo propuesto, luego la segunda sección trata de la implementación del modelo propuesto, seguidamente se explica cómo se desarrolla la recolección de datos, la cuarta sección muestra el análisis y las conclusiones del estudio y finalmente la quinta sección expone las consideraciones éticas del estudio.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo de este estudio se llevó a cabo siguiendo una metodología que abarcó diferentes etapas y actividades que involucraron el desarrollo de una propuesta de formación hacia una institución educativa con el fin de validar el modelo, como se observa en la Fig. 1. A continuación, se detallan las etapas del proceso:

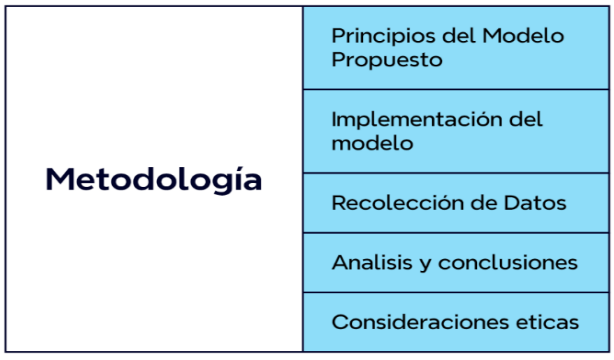


Fig. 1. Flujo de trabajo de la metodología.

A. *Principios del Modelo Propuesto*

El modelo propuesto se centra en el trabajo colaborativo, el aprendizaje basado en proyectos y la mentoría y tiene a la

robótica educativa como eje transversal para el desarrollo de la formación de los estudiantes. La Fig. 2 muestra los componentes del modelo.

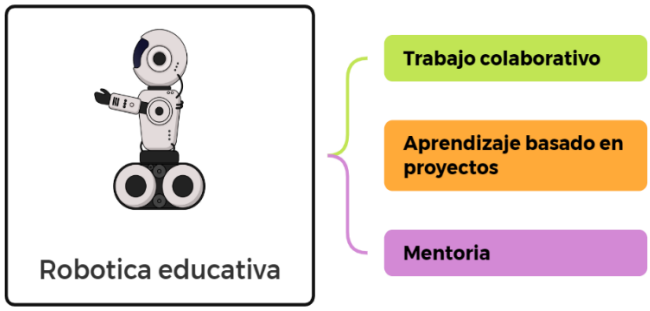


Fig. 2. Componentes del modelo propuesto.

B. Implementacion del modelo.

Para la implementación del modelo propuesto, se desarrolló un programa de formación en robótica educativa para una institución educativa de secundaria en Colombia. El programa fue ajustado al proyecto educativo de la institución y a las necesidades del contexto. La población de estudiantes que participaron en el programa estuvo conformada por 20 jóvenes entre los 15 y 17 años, entre los grados 10 (diecinueve estudiantes) y 11 (un estudiante). Con una representación de género de 50% de hombres y 50% de mujeres. El desarrollo del programa se compuso de las siguientes etapas:

Inicio del programa de formación en robótica y asignación de roles: una vez definido el programa a partir de la firma de un convenio entre las instituciones, se procedió al inicio de dicho programa. Se asignaron los roles de mentor a estudiantes universitarios entre cuarto y octavo semestre del programa de ingeniería electrónica. Los docentes (tanto de la universidad como de la institución educativa) desarrollaron el rol de supervisores.

Desarrollo de sesiones teórico-prácticas: Se desarrollaron 3 sesiones teóricas en la institución educativa en las que los estudiantes aprendieron temas relacionados con la energía, seguridad eléctrica, ley de Ohm y configuración de resistencias, así como el funcionamiento de sensores y actuadores y algunos conceptos básicos de programación en Arduino. Para reforzar estos conceptos, se llevaron a cabo dinámicas grupales que permitieron a los estudiantes representar los temas de manera práctica. Por ejemplo, se realizaron configuraciones de "resistencias" humanas para entender mejor la conexión de los elementos en un circuito eléctrico, se llevó a cabo un juego de transmitir mensajes con los sentidos restringidos para comprender el funcionamiento de los sensores y actuadores en un sistema, y se desarrolló un juego de traducción de mensajes a partir de acciones para explorar la lógica de la programación.

Con relación a las sesiones prácticas, se llevaron a cabo 8 de estas en los laboratorios de la universidad, donde los estudiantes tuvieron la oportunidad de trabajar con equipos básicos de electrónica como el multímetro, la fuente DC, el osciloscopio y el generador de señales, con los cuales realizaron pruebas y mediciones. Aprendieron a conectar y utilizar elementos como resistencias, LEDs, sensores y pequeños motores mediante circuitos análogos sencillos en protoboard, y posteriormente implementando Arduino Uno para su control. Se dedicó una sesión para explicar el proceso de modelado e impresión 3D y las últimas del programa se enfocaron en ensamblar los robots educativos, cuyos materiales fueron suministrados completamente por el equipo de trabajo. Las sesiones teóricas y prácticas se desarrollaron de manera intercalada de forma semanal en encuentros de 2 horas.

Seguimiento de corto plazo: se programó una visita de seguimiento al colegio seis meses después de la conclusión del programa de formación. El objetivo de esta visita fue evaluar la retención de los conceptos aprendidos por parte de los estudiantes y recopilar retroalimentación sobre su experiencia en el programa. Para ello se diseñó una encuesta tipo prueba con 10 preguntas de opción múltiple con única respuesta y tiempo límite utilizando la plataforma Quizz. La plataforma permitió presentar las preguntas de forma interactivas en tiempo real a los estudiantes a través de sus dispositivos móviles. Se facilitó la participación de los estudiantes a través de una encuesta y se recopilaron los resultados para su posterior análisis.

La encuesta se centró en conceptos y herramientas básicas relacionadas con la electrónica y la robótica. Los problemas abarcaban corrientes eléctricas (corriente alterna y corriente continua), métodos de medición e instrumentos, componentes de equipos de control de carga automatizados, los sensores y mecanismos que ayuden a construir y dar movilidad a un robot.

Seguimiento de largo plazo: un año después de haber finalizado el programa de formación, se realizó una encuesta a los estudiantes de la institución educativa que se graduaron después de haber participado en el programa de formación para indagar sobre el nivel de satisfacción del programa y si este había incidido en su toma de decisión en la escogencia de carrera. Las preguntas del cuestionario están orientadas a valorar la calidad e idoneidad de los contenidos impartidos, la satisfacción con los encuentros, el impacto de esta experiencia en las decisiones en la elección de una carrera profesional.

Selección de los recursos: en cuanto a los recursos principales utilizados, se destacan los espacios físicos de la universidad (laboratorios) y la institución educativa (sala de informática). La universidad también puso a su disposición el uso de los siguientes equipos y herramientas: fuentes de tensión, generadores de señales, osciloscopios, multímetros digitales, computadores e impresora 3D. Los materiales suministrados por la universidad incluyeron kits de electrónica. Adicionalmente se aportaron los componentes para la impresión y el ensamble de cuatro robots open-source OTTO DIY, ver Fig. 3.

Fig. 3. Robot Otto.

Los estudiantes, que participaron en este proyecto no presentaron un perfil de ingreso o de referencia previa, el interés de los estudiantes al principio se enmarco en aprender en sobre tecnologías y divertirse al participar en las distintas dinámicas de trabajo.

C. Recolección de Datos:

Durante el desarrollo del programa de formación se realizó seguimiento de asistencia por parte de la docente encargada de la institución educativa. Debido a que los estudiantes eran menores de edad, no se llevó registro de datos personales más allá de las edades y género de los participantes sin la asociación de nombres u otro dato de identificación.

En el seguimiento a corto plazo participaron dieciséis estudiantes a través de la plataforma Quizz. Los estudiantes respondieron la prueba utilizando dispositivos móviles personales. La prueba registró las respuestas dadas como Correcta, Incorrecta y No Intentado. El indicador de retención utilizado consiste en la razón entre respuestas correctas sobre el número de preguntas.

En el seguimiento de largo plazo sobre la influencia del programa de formación sobre la elección de carrera, en esta participaron nueve estudiantes (cuatro niñas y cinco niños) que habían participado en el programa de formación. Las respuestas de la encuesta fueron registradas a través de un formulario en línea de Microsoft Forms.

D. Analisis de datos:

Para el análisis de los datos se utilizó Microsoft Excel, desarrollando los siguientes componentes:

Análisis cuantitativo: Se crearon tablas comparativas para visualizar la relación de entre el género y a la decisión de carrera, el porcentaje de influencia del modelo propuesto sobre la decisión de carrera y el rango de notas.

Análisis Cualitativo: Este análisis subrayó la contribución del modelo propuesto en la decisión de carrera.

E. Consideraciones eticas:

El estudio contó con la aprobación institucional y el consentimiento de todos los participantes, respetando su derecho a la confidencialidad y la posibilidad de retirarse de la investigación en cualquiera de sus fases en cualquier momento.

III. Resultados

Los resultados del estudio son descritos a continuación, estos deben comprenderse como tendencias de los datos estadísticos desarrollados:

Hallazgos del estudio a corto plazo: Los resultados del estudio mostraron que la implementación de este modelo propuesto produjo altos niveles de comprensión de los participantes sobre electrónica básica, programación y robótica. Obtuvieron notas entre 3/5 y 4/5 el 43.7% de los participantes, 43,7% de los participantes superiores a 4/5 y solo un 12,5% inferiores a 3/5, como se observa en la Fig. 4. El 95% de los participantes aseguraron que los contenidos fueron adecuados e inspiradores.

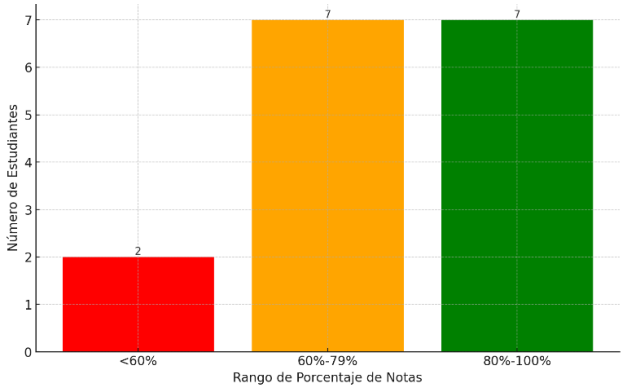


Fig. 4.Grafica de rangos de notas vs número de estudiantes.

Hallazgos del estudio a largo plazo: El programa de formación resultó en un cambio positivo en las actitudes de los participantes hacia las carreras tecnológicas, especialmente las ingenierías, con un 66.6% de los participantes graduados indicando que la experiencia influyó en su elección de carrera. Las carreras que decidieron estudiar fueron: Ingeniería Civil (2), Ingeniería Electrónica (2), Ingeniería Mecánica (1) e Ingeniería Mecatrónica (1), cómo se observa en la Fig. 5.

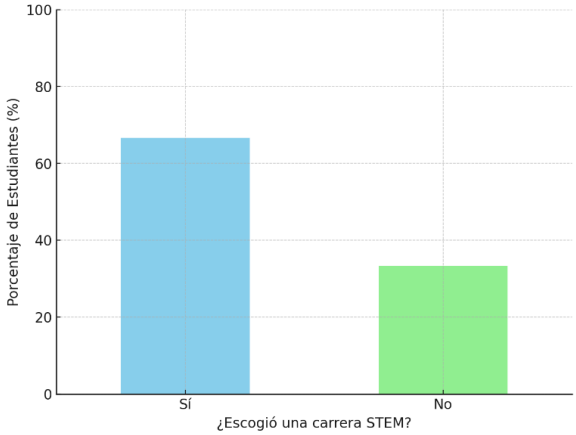


Fig. 5.Grafica de escogencia de carrera vs porcentaje de estudiantes.

El programa de formación influjo a un 50% de las niñas participantes y a un 80% de los niños cómo se observa en la Fig. 6.

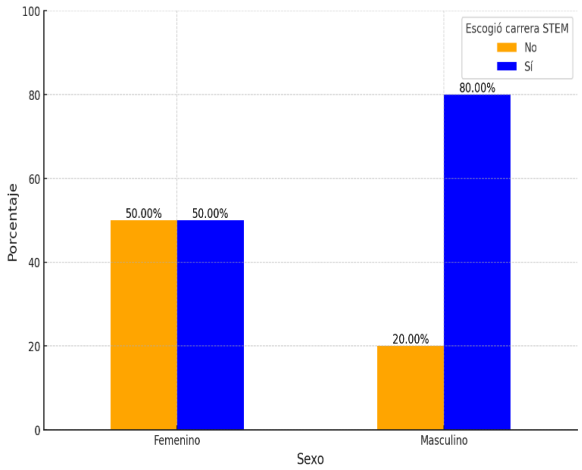


Fig. 6. Comparacion de genero que escogerieron carreras STEM vs genero que no escogieron carreras STEM.

Este enfoque educativo basado en el aprendizaje colaborativo basado en proyectos y mentoría demostró ser efectivo en mejorar la retención del conocimiento e influir positivamente en la elección de carreras relacionadas con las ingenierías en estudiantes de bachillerato.

IV. Conclusiones

Este estudio ha demostrado que el modelo propuesto centrado en la robótica educativa tiene un impacto significativo en el interés por las carreras STEM por parte de los estudiantes de bachillerato. A partir de la implementación de sesiones teórico-prácticas conjuntas de electrónica básica, programación y robótica por parte de los estudiantes de la institución educativa y estudiantes y profesores de la universidad, se observó una asimilación de conceptos superior al 79% por parte del 43,7% de los participantes, después de 6 meses de terminado el programa y una inclinación del 66% de los participantes luego de un año de finalizado este, hacia una carrera STEM.

Asimismo, la robótica educativa no solo fue un instrumento para la mejora de la retención de contenidos, sino también una fuente de inspiración para los estudiantes hacia las disciplinas STEM, mostrando el modo en que el enfoque práctico e interactivo añade valor a la educación convencional en estos campos. La tutoría entre iguales (estudiantes de la institución y estudiantes de ingeniería electrónica) y el trabajo colaborativo, fueron algunos de los aspectos más destacados que contribuyeron sustancialmente a las experiencias positivas del aprendizaje basado en proyectos, proporcionando a los estudiantes un entorno atractivo y motivador capaz de captar y suscitar su interés y voluntad de participación.

El modelo propuesto ha sido una forma eficaz de intervención ante algunos de los retos actuales dentro de la educación STEM, incluida la necesidad de métodos educativos más novedosos e innovadores que atraigan y se adapten a los estudiantes. Los resultados parecen apuntar a que este enfoque podría ser particularmente eficaz para inspirar tanto a niños como a niñas hacia carreras técnicas y científicas y, por tanto, permitir cerrar la brecha de género en estos campos. Así pues, este estudio recomienda que la robótica educativa se integre en los programas escolares como una valiosa herramienta pedagógica.

El estudio desarrollado podría mejorarse al incluir análisis de las variables socioculturales y económicas de los participantes y desarrollarse en distintos contextos de inclusión educativa. Asimismo, se podría aumentar la muestra de participantes en los periodos de corto y largo plazo, así como medir el desempeño en las carreras STEM escogidas.

Futuras investigaciones podrían abordar la evaluación a largo plazo del modelo propuesto, examinando su impacto en las carreras educativas y profesionales de los participantes. Es necesario seguir investigando sobre la adaptabilidad y eficacia de este modelo propuesto en diferentes entornos educativos y culturales para extender los posibles beneficios a un sector más amplio.

Este estudio aporta al conocimiento existente evidencias empíricas del valor que la robótica educativa, junto con un enfoque pedagógico colaborativo y basado en proyectos, puede despertar el interés entre los estudiantes de secundaria por profundizar en estudios relacionados con las STEM.

Consideraciones

Se obtuvo el consentimiento informado de todos los estudiantes, asegurando su comprensión y voluntad para participar. La confidencialidad y el anonimato se mantuvieron en todo momento para proteger la privacidad de los participantes, a quienes les fue garantizado el derecho de retirarse del estudio sin consecuencias.

Agradecimientos

Extendemos nuestro sincero agradecimiento a la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería, al Colegio La Salle Montería y a la Secretaría de Educación Municipal del Municipio de Montería por su invaluable apoyo y colaboración en la realización de este proyecto.

References

[1] M. K. Grabarski, M. Mouratidou, and I. Fellows, “The Evolution of Learning and Technological Innovation: Preparing Students for Successful Careers,” in *Handbook of Research on Sustainable Career Ecosystems for University Students and Graduates*, 2023. doi: 10.4018/978-1-6684-7442-6.ch004.

[2] C. Bozic and D. D. Dunlap, “ The Role of Innovation Education in Student Learning, Economic Development, and University Engagement ,” *Journal of Technology Studies*, vol. 39, no. 2, 2013, doi: 10.21061/jots.v39i2.a.4.

[3] K. J. Sherrer and M. L. Prelip, "A Multifaceted Approach to Public Health Career and Professional Development Training," *Health Promot Pract*, vol. 20, no. 6, 2019, doi: 10.1177/1524839918783744.

[4] T. P. Surekha, S. Shankar, and B. Sadashive Gowda, "Enhancing the quality of engineering learning through skill development for feasible progress," in *Procedia Computer Science*, 2020. doi: 10.1016/j.procs.2020.05.019.

[5] R. Kumar and K. Sinha, "Science, Technology and Innovation Equity and Inclusion in Electric Vehicle Sector," *Integrated Journal for Research in Arts and Humanities*, vol. 3, no. 5, 2023, doi: 10.55544/ijrah.3.5.2.

[6] Z. Ahmad, M. Ammar, A. Sellami, and N. J. Al-Thani, "Effective Pedagogical Approaches Used in High School Chemistry Education: A Systematic Review and Meta-Analysis," *J Chem Educ*, vol. 100, no. 5, 2023, doi: 10.1021/acs.jchemed.2c00739.

[7] M. S. Ramírez-Montoya, M. I. Loaiza-Aguirre, A. Zúñiga-Ojeda, and M. Portuguez-Castro, "Characterization of the teaching profile within the framework of education 4.0," *Future Internet*, vol. 13, no. 4, 2021, doi: 10.3390/fi13040091.

[8] N. Dahal, B. C. Luitel, B. P. Pant, I. M. Shrestha, and N. K. Manandhar, "Emerging ICT Tools, Techniques and Methodologies for Online Collaborative Teaching and Learning Mathematics," *Mathematics Education Forum Chitwan*, vol. 5, no. 5, 2020, doi: 10.3126/mefc.v5i5.34753.

[9] H. Kanematsu and D. M. Barry, "The importance of stem for modern education," *Intelligent Systems Reference Library*, vol. 91, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-19234-5_4.

[10] N. Stipanovic and H. Woo, "Understanding African American Students' Experiences in STEM Education: An Ecological Systems Approach," *Career Development Quarterly*, vol. 65, no. 3, 2017, doi: 10.1002/cdq.12092.

[11] "ISEC 2016 - Proceedings of the 6th IEEE Integrated STEM Education Conference," *ISEC 2016 - Proceedings of the 6th IEEE Integrated STEM Education Conference*. 2016.

[12] Y. Elfrida Yanty Siregar, R. Rachmadtullah, N. Pohan, Rasmitadila, and M. S. Zulela, "The impacts of science, technology, engineering, and mathematics (STEM) on critical thinking in elementary school," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019. doi: 10.1088/1742-6596/1175/1/012156.

[13] E. López-Iñesta, C. Botella, S. Rueda, A. Forte, and P. Marzal, "Towards Breaking the Gender Gap in Science, Technology, Engineering and Mathematics," *Revista Iberoamericana de Tecnologias del Aprendizaje*, vol. 15, no. 3, 2020, doi: 10.1109/RITA.2020.3008114.

[14] I. K. Dabipi, B. J. Dingwall, and J. O. Arumala, "Creating collaborative developmental communities: A pipeline to science, technology, engineering and mathematics (STEM) education," in *Proceedings - Frontiers in Education Conference, FIE*, 2007. doi: 10.1109/FIE.2007.4418023.

[15] C. Dunn, K. S. Rabren, S. L. Taylor, and C. K. Dotson, "Assisting Students With High-Incidence Disabilities to Pursue Careers in Science, Technology, Engineering, and Mathematics," *Interv Sch Clin*, vol. 48, no. 1, 2012, doi: 10.1177/1053451212443151.

[16] S. Siouli, I. Dratsiou, P. E. Antoniou, and P. D. Bamidis, "Learning with Educational Robotics through Co-Creative Methodologies," *Interaction Design and Architecture(s)*, vol. 42, 2019, doi: 10.55612/s-5002-042-002.

[17] M. A. Hudson, Y. Baek, Y. hui Ching, and K. Rice, "Using a Multifaceted Robotics-Based Intervention to Increase Student Interest in STEM Subjects and Careers," *J STEM Educ Res*, vol. 3, no. 3, 2020, doi: 10.1007/s41979-020-00032-0.

[18] D. Zhang and G. J. Hwang, "Effects of Interaction between Peer Assessment and Problem-Solving Tendencies on Students' Learning Achievements and Collaboration in Mobile Technology-Supported Project-Based Learning," *Journal of Educational Computing Research*, vol. 61, no. 1, 2023, doi: 10.1177/07356331221094250.

[19] E. De Graaff and G. Saunders-Smits, "Peer evaluation and Peer review to support PBL teamwork," in *2011 2nd International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace and Electronic Systems Technology, Wireless VITAE 2011*, 2011. doi: 10.1109/WIRELESSVITAE.2011.5940815.

[20] P. Parrado-Martínez and S. Sánchez-Andújar, "Development of competences in postgraduate studies of finance: A project-based learning (PBL) case study," *International Review of Economics Education*, vol. 35, 2020, doi: 10.1016/j.iree.2020.100192.

[21] M. Abu-Ghuwaleh and R. Saffaf, "Integrating AI and NLP with Project-Based Learning in STREAM Education," *Preprints.org*, no. June, 2023.

Salinas Fotovoltaica: un proyecto de innovación educativa sobre aprovechamiento solar

V. Raya-Narváez
Departamento de Tecnología
IES Las Salinas
Fuengirola (Málaga)

J.D. Aguilar-Peña
Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática.
Escuela Politécnica Superior de Jaén Universidad de Jaén
Jaén (España)
jaguilar@ujaen.es

L. Hontoria
Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática.
Escuela Politécnica Superior de Jaén Universidad de Jaén
Jaén (España)
hontoria@ujaen.es

C. Rus-Casas
Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática.
Escuela Politécnica Superior de Jaén Universidad de Jaén
Jaén(España)
crus@ujaen.es

***Abstract*— Este trabajo presenta el proyecto de innovación educativa de un centro de enseñanza secundaria, que, a través de la implantación de un sistema fotovoltaico, persigue un doble objetivo: por una parte, concienciar a la comunidad educativa sobre los beneficios de las energías renovables y, por otro, proporcionar al alumnado un aprendizaje significativo e interdisciplinar. Para ello, se potencia el aprendizaje basado en proyectos desde varias materias, cuyos saberes básicos se organizan en situaciones de aprendizaje.**

Keywords — Energía solar fotovoltaica, educación ambiental, aprendizaje significativo, interdisciplinariedad, colaboración intercentros, metodologías didácticas innovadoras.

I. ANTECEDENTES

El cambio climático se ha consolidado como uno de los mayores desafíos de la humanidad en el siglo actual. Las sociedades, a lo largo de su evolución, han progresado a expensas de los recursos energéticos ofrecidos por el medio en que se desarrollaban, lo que ha provocado con frecuencia un considerable impacto sobre el mismo. Los informes científicos, como los del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), han subrayado la influencia directa de las actividades antropogénicas en el aumento de las temperaturas globales, el derretimiento de los casquetes polares, el aumento del nivel del mar y la acidificación de los océanos, entre otros efectos devastadores [1]. Si bien hasta ahora el cuidado del medio ambiente ha ocupado un lugar secundario entre los factores que han conformado este desarrollo, en las últimas décadas, el creciente reconocimiento del cambio climático y sus repercusiones globales han impulsado la necesidad de una acción colectiva y educativa.

Este fenómeno ha generado un llamamiento urgente a la concienciación y la adopción de prácticas sostenibles en todos los niveles de la sociedad [2]. En este sentido, la comunidad internacional ha articulado una serie de iniciativas, entre las cuales destaca la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y sus Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [3]. Entre los diecisiete objetivos de desarrollo sostenible, se encuentra el Objetivo 4, que busca garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad, promoviendo oportunidades de aprendizaje para todos y la educación para el desarrollo sostenible.

Siguiendo lo establecido por la normativa educativa vigente (Ley Orgánica 3/2020, LOMLOE [4]), a los centros escolares les corresponde la tarea fundamental de formar y concienciar a la ciudadanía. El compromiso de los centros escolares con estas iniciativas ha sido tradicionalmente amplio. Encontramos muestras, por ejemplo, en el Anuario de Estadísticas de la Enseñanza no Universitaria de 2022 [5], según el cual, el 78% de los centros educativos participaban en algún programa de educación ambiental; o en el informe Hacia una educación para la sostenibilidad [6], que cifra en 936 (24%) los centros educativos que, ya en el curso 2016/2017 participaban en el programa medioambiental Aldea. En esta línea de trabajo se encuentra el proyecto descrito en este artículo, denominado "Salinas Fotovoltaica". Se trata de un proyecto educativo innovador que busca concienciar sobre las energías renovables y proporcionar aprendizaje significativo en ingeniería a estudiantes preuniversitarios. Integra de manera interdisciplinar los saberes básicos de tres materias, Matemáticas, Física y Química y Tecnología e Ingeniería, a un nivel educativo de primer curso de

bachillerato en la especialidad científico-matemática. Su finalidad es mejorar las competencias claves relacionadas con el conocimiento y la interacción con el mundo físico, la competencia matemática y competencias básicas en ciencia y tecnología, la competencia digital y la competencia social y ciudadana.

II. Contexto.

Este trabajo se desarrolla en un instituto de enseñanza secundaria de Andalucía, IES Las Salinas, situado en la localidad de Fuengirola (Málaga). Es un centro escolar público donde se imparte docencia a unos cuatrocientos alumnos y alumnas. Desde su creación en el año 2002, se ha caracterizado por la profunda implicación del profesorado del área científico matemática en diversos programas y proyectos escolares de carácter autonómico, relacionados con proyectos medioambientales (como Aulas verdes, Aldea, Ecoescuelas, Profundiza, etc) y de tecnologías de la información y la comunicación (TIC). La estrategia general del centro aplicada a las políticas de agenda 2030 y ODS, recogida en su Plan de Centro, ha consistido en la formación del alumnado mediante el planteamiento de situaciones de su entorno relacionadas con el ahorro energético, la concienciación ambiental y las energías renovables a través de proyectos integrales.

En el curso 2022/2023, se puso en marcha el proyecto integral Salinas Fotovoltaica, descrito en este artículo. Se orientó al alumnado de bachillerato, por la mayor proximidad de su currículo a las características del proyecto y por crear un perfil de alumnado formador para los niveles inferiores, a medida que estos se incorporen al proyecto. Su objetivo principal es formar al alumnado en valores de uso responsable de la energía. Como objetivos secundarios se definen, a lo largo del proyecto:

- El desarrollo de líneas de innovación sobre ahorro energético, aplicación y uso de IoT.
- La creación de material y aplicaciones didácticas.
- La participación en programas académicos de nivel superior.
- La mejora de las calificaciones del alumnado.
- El cuidado del medio ambiente.

Tanto a la consecución del objetivo principal como de los secundarios contribuye el profesorado del Departamento de Electrónica e Ingeniería Automática de la Universidad de Jaén, con tareas de dirección, asesoramiento en el diseño de las fases y aportación de aplicaciones informáticas.

La implantación del proyecto se ha basado en tres de los pilares que dan soporte pedagógico al sistema educativo actual, que son el aprendizaje significativo, la interdisciplinariedad y la educación ambiental. El primero de ellos se fundamenta en la teoría del constructivismo de Ausubel [7], según la cual el aprendizaje se produce cuando la nueva información se relaciona con los conocimientos previos del alumno, creando así una estructura de conocimiento más rica y compleja. Las aportaciones prácticas de esta significatividad al proyecto se alinean con lo expuesto por Pozuelos Estrada [8]. La participación en Salinas Fotovoltaica supone una mayor motivación e interés del alumnado por las tareas que realiza, al conectar la información que recibe con la realidad que le rodea; una mejor comprensión y retención de los saberes básicos incluidos en el currículum; el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico de los mismos y la aplicabilidad en situaciones y contextos similares a los propuestos en las actividades. La LOMLOE establece una serie de principios y directrices que fomentan este tipo de aprendizaje. Así, es destacable la importancia de la motivación del alumnado y del aprendizaje activo, el establecimiento flexible, abierto y adaptable del currículum; el enfoque competencial del aprendizaje y la utilización de recursos educativos diversos, así como el aprendizaje en competencias claves. El otro pilar, el aprendizaje interdisciplinar, establece que el conocimiento no se divide en compartimentos estancos, sino que está interconectado [9]. Este enfoque permite al alumno comprender mejor la realidad, al percibirla desde diferentes perspectivas. Esto le permite, de nuevo en el contexto de este proyecto, comprender las relaciones entre las diferentes disciplinas científicas y matemáticas y utilizar distintas herramientas y conceptos para resolver problemas complejos. La LOMLOE sí menciona explícitamente la estrategia del aprendizaje interdisciplinar en cuanto a su fomento, al uso de metodologías que favorezcan el aprendizaje interdisciplinar y la promoción del trabajo por proyectos y el aprendizaje basado en problemas. En este aspecto, también establece que la evaluación del aprendizaje debe valorar la capacidad del alumnado para aplicar sus conocimientos en diferentes contextos. Este carácter interdisciplinar de las materias se articula en las programaciones didácticas por medio de grupos de trabajo del profesorado, en este caso, de los departamentos de Matemáticas, Física y Química y Tecnología.

Finalmente, la educación en valores medioambientales del alumnado también es contemplada en la LOMLOE, en diversos artículos y principios, como el de equidad e inclusión, que establece la "necesidad de promover la educación ambiental para la sostenibilidad como elemento fundamental para la construcción de una sociedad justa y equitativa". En cuanto a su implantación en el aula, ya Martínez Huerta [10] sostiene que "La Educación Ambiental ha de participar en la resolución y prevención de los problemas ambientales junto a otros instrumentos de carácter legislativo, corrector, económico, etc. Por ello, resulta esencial integrar realmente la educación y la gestión ambiental", respaldando con ello el trabajo de los grupos de profesoras y profesores de este centro.

III. Metodología

Con estas premisas, el profesorado del área científico-matemática del centro de enseñanza secundaria ha organizado el aprendizaje del alumnado de primer curso

bachillerato en la rama científico-matemática, según unas estrategias metodológicas complementarias entre sí. Por un lado, encontramos dos de ellas de carácter general, Aprendizaje basado en proyectos (ABP) y Docencia semipresencial o blended learning (B-Learning) y, por otro, una específica, ajustada al currículo del alumnado y basada en situaciones de aprendizaje (SdA), como se ilustra en el diagrama de la figura 1. Siguiendo las directrices psicopedagógicas de diversos autores [9], éstas han sido diseñadas por los docentes como escenarios para que el alumnado desarrolle las competencias claves y los objetivos de aprendizaje de una manera significativa e interdisciplinar.

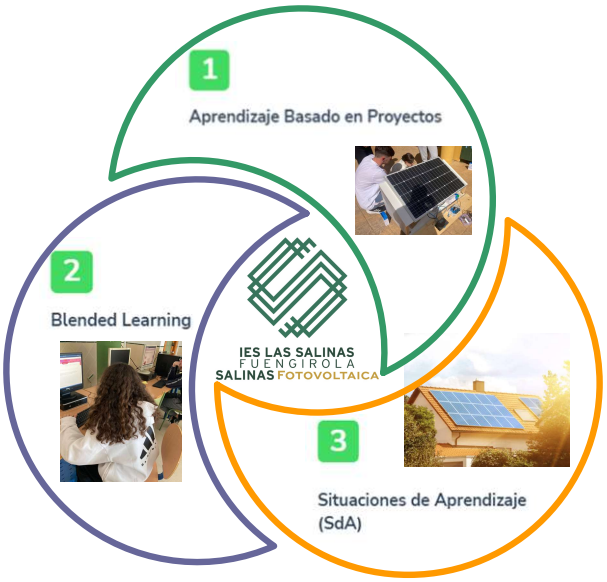


Fig.1. Interrelación de las estrategias metodológicas adoptadas en el proyecto.

Se ha definido una SdA por cada trimestre para vincular los saberes básicos de cada materia con el resto. La estructura de una SdA plantea inicialmente una contextualización de la situación de interés propuesta al alumnado. A continuación, establece los objetivos específicos del aprendizaje que se pretenden alcanzar, detalla los contenidos que se abordarán en este contexto y define las actividades de aprendizaje que los estudiantes realizarán para alcanzar los objetivos planteados. En este bloque de actividades se sitúa el proyecto Salinas Fotovoltaica, donde el alumnado avanzará en la resolución interdisciplinar de una situación de interés planteada en común por el profesorado. El eje conductor de estas actividades será el planteamiento y resolución de un proyecto técnico de construcción, donde se empleará una metodología ABP. El alumnado se organizará en equipos, a los que se habrá asignado la tarea de diseñar e implementar los distintos sistemas que conforman un producto final. En cuanto al uso del aprendizaje semipresencial (blended learning), de entre las ventajas que aporta su implantación [11], se pretende facilitar el acceso a multiplicidad de fuentes y datos diferentes de los ofrecidos por el profesor en cualquier momento y desde cualquier lugar. Para ello, se han complementado las sesiones presenciales con actividades en línea en plataformas de aprendizaje, como Classroom, con contenido multimedia, tutoriales y evaluaciones, que han ampliado las actividades presenciales. El desarrollo de esta metodología en clase supone, en primer lugar, exponer el alumnado la situación de aprendizaje a resolver. A continuación se muestra

IV. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

El proyecto Salinas Fotovoltaica se encuentra totalmente integrado en la dinámica de trabajo aprobada en las programaciones didácticas de los departamentos implicados en el mismo. Siguiendo las directrices LOMLOE en materia de planificación de las enseñanzas, se propone al alumnado una situación de aprendizaje (SdA) por trimestre, tal y como se definen a continuación:

Primer trimestre. SdA: Diseñar una vivienda con energía sostenible.

Este trimestre se enfoca en la planificación y diseño de una vivienda que utilice fuentes de energía renovable. Se tratan saberes básicos sobre gestión y desarrollo de proyectos (con metodologías diversas, como "Waterfall" y "Agile"), la elaboración de documentación técnica de este tipo de proyectos y se realizan trabajos de investigación sobre proyectos en las viviendas actuales.

Tecnología e Ingeniería I.	Se estudian las diferentes fuentes de energía renovable y su aplicación a la vivienda, con especial atención a la energía solar fotovoltaica.
Matemáticas: arquitectura e ingeniería.	Se trabajan conceptos de arquitectura e ingeniería, aplicando el conocimiento matemático a la resolución de problemas relacionados con el diseño de una casa sostenible.
Física y Química:	Se estudian los conceptos de trabajo y energía en el contexto del diseño de una casa sostenible.

Segundo trimestre. SdA: Aprendo sobre materiales técnicos con programas de simulación.

Este trimestre se centra en el estudio del comportamiento de los materiales semiconductores presentes en los paneles y su tecnología de fabricación. Cuando el alumnado dispone de las competencias suficientes, se utilizan programas de simulación de producción energética y se comparan resultados entre distintas tecnologías para comparar sus posibilidades.

Tecnología e Ingeniería I.	Se estudian los materiales utilizados en la construcción de paneles solares, como el silicio (Si), el arseniuro de galio (GaAs) y el óxido de grafeno (GO). [8].
Matemáticas.	Se utilizan modelos matemáticos para analizar el comportamiento de los dispositivos semiconductores en sistemas fotovoltaicos.

Física y Química.	Se estudian las propiedades de los materiales utilizados en la construcción de paneles solares.

Tercer trimestre. SdA: Impacto de las energías renovables en la facturación eléctrica del hogar.

Este trimestre se dedica a analizar en qué medida las energías renovables suponen un ahorro económico en una vivienda. Se lleva a cabo un análisis exhaustivo del consumo eléctrico de una vivienda, identificando los dispositivos y sistemas eléctricos principales y cuantificando su demanda energética. Luego, se procede a estudiar diversas fuentes de energía renovable disponibles, principalmente solar fotovoltaica, evaluando sus características técnicas y su viabilidad en función de la ubicación y del clima. Con esta información, se determina el tamaño y la capacidad del sistema de energía renovable necesario para cubrir parcial o totalmente las necesidades energéticas del hogar, calculando la potencia y la energía generada por las tecnologías seleccionadas. Posteriormente, se realiza un análisis económico detallado que compara los costes de instalación y operativos del sistema renovable con el ahorro económico a lo largo del tiempo, calculando el período de retorno de la inversión y estimando los ahorros anuales. Finalmente, se lleva a cabo una comparativa con fuentes de energía convencionales, considerando aspectos como los costes de generación, las emisiones de gases de efecto invernadero y otros impactos ambientales, para determinar la mejor opción para el hogar en términos económicos y ambientales.

Tecnología e Ingeniería I.	Se aprende a programar sistemas electrónicos y robóticos para su aplicación en la producción de energía fotovoltaica.
Matemáticas.	Se realiza un análisis numérico y tabular de resultados para estudiar la factura eléctrica.
Física y Química.	Se profundiza en la física de los dispositivos captadores de energía solar y en las leyes físicas utilizadas en la producción de energía eléctrica.

Para la consecución de las competencias claves planteadas en las situaciones de aprendizaje se hará uso de la metodología ABP. Esta estrategia metodológica se adapta a las características del tipo de aprendizaje propuesto para este proyecto, por favorecer el aprendizaje significativo y la autonomía del alumnado [9]. Para ello, se plantea al alumnado la problemática de sustituir las fuentes de energías tradicionales, de carácter no renovable, por otras fuentes renovables, con los consiguientes beneficios que supone. El proyecto de construcción propuesto al alumnado, que se ajusta adecuadamente a su nivel académico, consiste en el diseño y puesta en marcha de una estación de carga de vehículos eléctricos de uso personal, con baja demanda de energía, como patines eléctricos. Con ello se da respuesta a los objetivos planteados al inicio; por un lado, el alumnado experimenta cómo el aprovechamiento de la energía solar como recurso renovable para producir energía eléctrica respeta las condiciones ambientales en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero. Asimismo, el alumnado participa en el diseño de sistemas de producción de energía novedosos, de los que solamente ha tenido noticia a través de los sistemas de placas solares instalados en las viviendas, que son un producto ya terminado y funcional, al que no tiene acceso. Por otra parte, a medida que el alumnado progresa en el proyecto de construcción, el docente le propone trabajos de investigación y actividades que le permiten generar un material didáctico valioso. Este material, en forma de presentaciones, aplicaciones informáticas y ejercicios de resolución de problemas, entre otros, una vez publicado en las plataformas educativas, queda accesible al resto de la comunidad educativa. El proyecto de construcción de la estación de carga de vehículos eléctricos, concebido y ejecutado por el alumnado participante en el proyecto "Salinas Fotovoltaica", proporciona una plataforma interactiva que facilita la colaboración entre estudiantes de distintos niveles académicos. Este entorno permite la integración y el uso conjunto de recursos y conocimientos generados por alumnos de niveles académicos superiores, en consonancia con los objetivos del proyecto. Este enfoque pedagógico promueve la aplicación práctica de los conocimientos adquiridos en un contexto real. Sirve además para fomentar el desarrollo de habilidades de resolución de problemas y la comprensión integral de conceptos teóricos relacionados con la ingeniería y la sostenibilidad energética.

V. Resultados obtenidos

Los resultados del aprendizaje se obtienen al término de cada una de las situaciones de aprendizaje propuestas. Así, en la primera de ellas el alumnado ha trabajado en el estudio del consumo de energía en la vivienda. Con el fin de simular el comportamiento de una instalación, ha diseñado y construido la estación de carga de vehículos eléctricos (Fig. 2).

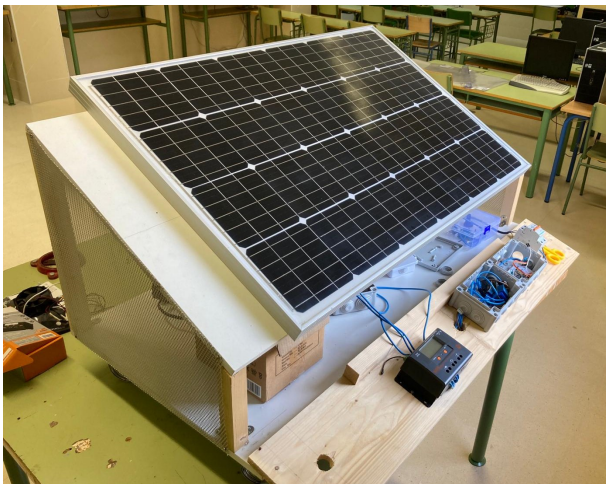


Fig 2. Estación de carga en fase constructiva.

Para ello, ha realizado una serie de actividades en grupo que le han permitido dimensionar su instalación. Así, en primer lugar, ha considerado la premisa de optimizar el ángulo de incidencia para obtener la máxima radiación posible, empleando para ello el programa Orientsol [13]; ha generado como producto entregable una maqueta de voltamperímetro para estudiar la potencia máxima de la estación mediante la curva I-V del generador fotovoltaico (Fig. 3) y lo ha relacionado con una estimación de la carga de vehículos eléctricos conectados prevista durante la jornada escolar, que coincide con el período de funcionamiento de la instalación.

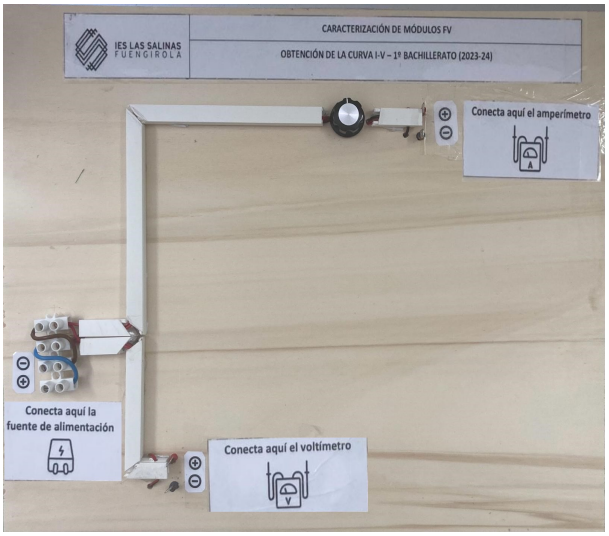


Fig 3. Maqueta para la medición de la curva I-V.

En la siguiente situación de aprendizaje, que trata sobre el estudio de los materiales de uso técnico, el alumnado ha abordado con profundidad conceptos relacionados con las propiedades de los materiales que se utilizan en las instalaciones fotovoltaicas, principalmente semiconductores. Una vez que ha analizado sus características eléctricas, ha trasladado estos conceptos a la producción de energía de la placa solar instalada en la estación de carga. En esta parte del proyecto, ha realizado un estudio teórico sobre la influencia de la geografía en la captación del recurso solar con el programa Orientsol (Fig. 4), los tipos de materiales disponibles en el mercado para la fabricación de paneles, sus características y, desde el punto de vista eléctrico, cómo se produce, se controla y se distribuye esta energía.

Uno de los productos finales ha sido la construcción de la maqueta con los componentes de la estación de carga (Fig. 5). Como captador de los niveles de irradiación solar se ha colocado una sonda de radiación, modelo SUF268J001 [14], junto a una sonda de temperatura y humedad, modelo DHT11 [15], distribuidos por Mouser Electronics, que envían datos en tiempo real a la controladora Arduino ESP8266.

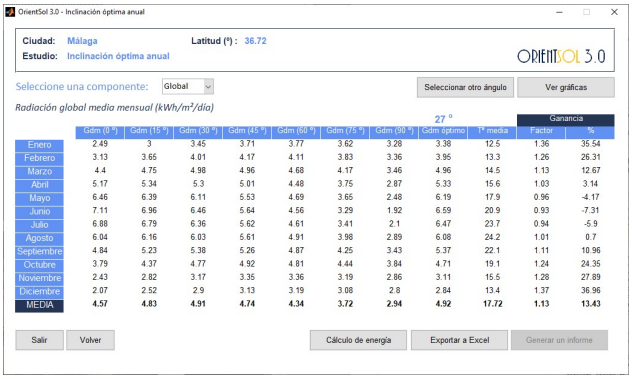


Fig. 4. Utilización de Orientsol para determinar parámetros solares en el área geográfica de implantación de la estación de carga.

El producto final de esta parte del proyecto ha sido la configuración de una aplicación basada en Arduino que envía a una hoja de cálculo en Google Sheets información periódica sobre radiación, temperatura y humedad (Fig. 6). Estos datos servirán al alumnado de la asignatura de Tecnología e Ingeniería para comprender la producción de energía en diversas condiciones atmosféricas. Además, el alumnado de otras materias, como Matemáticas, podrá utilizarlos para realizar estudios de gráficas, cálculos estadísticos y probabilísticos, etc.

Fig. 5. Estación de carga finalizada (se observan en la esquina inferior las sondas de radiación y temperatura/humedad).

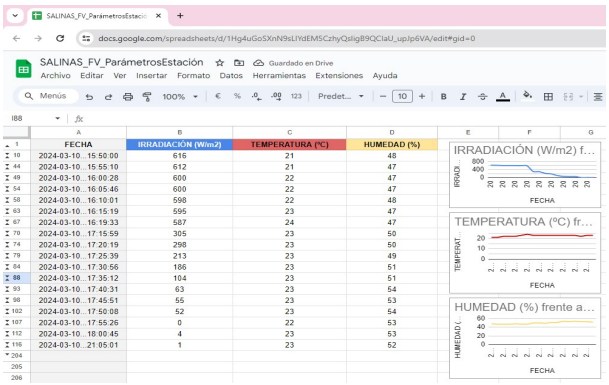


Fig. 6. Tabla de datos y graficación de un muestreo de radiación, temperatura y humedad obtenido de la estación de carga.

VI. Resultados académicos esperados

Uno de los objetivos planteados con este programa se centra en la mejora de los resultados académicos del alumnado de la modalidad científico-matemática, durante el proceso de aplicación de las agrupaciones interdisciplinares y las estrategias metodológicas propuestas. Para su estimación, se han tomado como referencia las calificaciones medias obtenidas por el alumnado de la modalidad científico-matemática que participa en el programa (6 alumnos), comparadas con el resto del grupo (29 alumnos), que, si bien pertenecen a esa modalidad, no cursan Tecnología e Ingeniería. Si comparamos las calificaciones del alumnado en las tres materias cuyos contenidos están integrados en el proyecto, se observa que, en Matemáticas, la media del alumnado participante en el proyecto es de 8 y 8,2 en la primera y segunda evaluación, respectivamente, mientras que el resto obtiene una media de 6,34 y 6,7. Las diferencias en Física y Química son considerables: 9 y 8,4 para el alumnado del proyecto y 6,24 y 6,33 para el resto, en cada una de las dos evaluaciones completadas. Por tanto, se estima una mejora en las calificaciones de aproximadamente un 30% del alumnado del proyecto con respecto al resto.

Por otra parte, se espera que el planteamiento de las metodologías didácticas descritas se asiente progresivamente en los cursos de bachillerato y, posteriormente, de enseñanza secundaria en los que se desarrolle el proyecto. Esto supondrá una referencia de prácticas educativas en cuanto a la aplicación de la LOMLOE sobre interdisciplinariedad. Las estrategias metodológicas aplicadas no han supuesto una alteración relevante en las rutinas de trabajo de este alumnado. Por el contrario, el alumnado ha demandado este tipo de metodología, que prefiere a una enseñanza tradicional. No obstante, se ha comprobado que la interdisciplinariedad requiere una coordinación curricular estrecha entre las asignaturas que forman parte del proyecto en el grupo de trabajo. En cuanto al método de evaluación del proceso de enseñanza-aprendizaje, el alumnado ha cumplimentado una serie de encuestas en las que se han medido, mediante escalas de satisfacción de 0 a 10, diversos factores, como el grado de aprovechamiento de las situaciones y la metodología de aprendizaje, de la coordinación de las asignaturas interdisciplinares y la relación con sus saberes básicos y de la complejidad y dificultad de los mismos.

VII. Conclusiones

El proyecto interdisciplinar Salinas Fotovoltaica busca concienciar al alumnado sobre las energías renovables y brindar un aprendizaje significativo en ingeniería a estudiantes preuniversitarios. Puesto que se trata de un proyecto a realizar durante un curso completo, aún se deben recoger los resultados de la experimentación la tercera situación de aprendizaje y posteriores ampliaciones en la funcionalidad de la estación. No obstante, los efectos de las metodologías didácticas aplicadas hasta la fecha, ABP y Blended Learning han resultado beneficiosos sobre el grado de adquisición de competencias del alumnado en las asignaturas donde han participado. Además, se ha fomentado la formación integral del alumnado en competencias claves como el pensamiento crítico, la resolución de problemas y la conciencia ambiental. Sus futuras líneas de innovación se centran en evaluar el impacto del proyecto en el alumnado, expandir el proyecto a otros centros educativos, investigar nuevas tecnologías y metodologías educativas y ampliar las actividades de concienciación ambiental. Del análisis de los resultados de las calificaciones obtenidas por el alumnado del proyecto se deduce que el desarrollo del aprendizaje en entornos que les permiten aplicar de manera directa sus conocimientos a la resolución de problemas en Tecnología e Ingeniería, como cuestiones energéticas, de diseño y de optimización, le permite alcanzar una comprensión más amplia e interdisciplinar de la situación de aprendizaje propuesta.

Lo expuesto en este artículo permite a los autores considerar que Salinas Fotovoltaica es un proyecto con un gran potencial para transformar la educación y preparar a los estudiantes para los retos del siglo XXI.

VIII. Referencias

[1] Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Cambio climático 2021: Base física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekci, R. Yu y B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, EE. UU. 2021

[2] UNESCO. Education for Sustainable Development Goals: Learning objectives. [https://www.researchgate.net/publication/314871233_Education_for_Sustainable_Development_Goals_Learning_Objectives/link/58c6c0fb458515895d298634/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19] Asamblea General de las Naciones Unidas. (2015, septiembre 25). La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. [Comunicado de prensa]. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/ 2017

[3] Asamblea General de las Naciones Unidas. La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. [Comunicado de prensa].https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/ 25 septiembre 2015.

[4] Ministerio de Educación y Formación Profesional. Ley Orgánica 3/2020, de 29 de diciembre, por la que se modifica la Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación (LOMLOE). Boletín Oficial del Estado. Recuperado de https://www.boe.es/eli/es/lo/2020/12/29/3 2020

[5] Ministerio de Educación y Formación Profesional. Anuario de Estadísticas de la Enseñanza no Universitaria de 2022 [Archivo PDF]. Recuperado de https://www.educacionyfp.gob.es/servicios-al-ciudadano/estadisticas/indicadores/cifras-educacion-espana/2021-2022.html 2022

[6] Ministerio para la Transición Ecológica. Hacia una educación para la sostenibilidad (2ª ed.). https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/ceneam/recursos/materiales/hacia-educacion-sostenibilidad_tcm30-496569.pdf 2019

[7] D. Ausubel. "Adquisición y retención del conocimiento. Una perspectiva cognitiva". 2002 Barcelona: Paidós Ibérica. (Originalmente publicado en 2000).

[8] S. Fernández, A. Boscá, J. Pedrós, A. Inés, M. Fernández, I. Arnedo, J.P. González, M. de la Cruz, D. Sanz, A. Molinero, R.S. Fandan, M.Á. Pampillón, F. Calle, J.J. Gandía, J. Cárabe, J. Martínez. "Advanced Graphene-Based Transparent Conductive Electrodes for Photovoltaic Applications". ACS Applied Energy Materials. 2023

[9] F.J. Pozuelos-Estrada, "Trabajo por proyectos en el aula: Descripción, investigación y experiencias". Sevilla: Cooperación Educativa. 2007.

[10] F. Majó, M. Baqueró. "8 ideas clave. Los proyectos interdisciplinarios". Barcelona: Graó. 2014.

[11] J. Martínez-Huerta. "El reto de la educación ambiental". Revista de psicodidáctica, 7, 99-110. https://ojs.ehu.eus/index.php/psicodidactica/article/download/100/96/161. 1999

[12] J. Adell, M. Area, J. De Pablos (Coord.). "eLearning: Enseñar y aprender en espacios virtuales". Tecnología Educativa. La formación del profesorado en la era de Internet (pp. 391-424). Aljibe. http://bit.ly/3vMN30N. 2009

[13] Programa de simulación solar Orientsol. https://revistaselectronicas.ujaen.es/index.php/inin v/article/view/519

[14] Sonda de radiación solar. https://eu.mouser.com/datasheet/2/18/Amphenol_08192016_SUF268J001-1156937.pdf

[15] Sonda de temperatura y humedad DHT11. https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf

Experiencia Educativa Basada en Blockchain

David Félix Hernández Formento
Dpto. de Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
davherfor@alum.us.es

M. Ángeles Serrano Ochoa
Dpto. de Derecho Procesal
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
mserrano13@us.es

Federico Barrero García
Dpto. de Ing. Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
fbarrero@us.es

Alfredo Pérez Vega-Leal
Dpto. de Ing. Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
alperez@us.es

Manuel A. Perales Esteve
Dpto. de Ing. Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
mperales@us.es

***Abstract*— La tecnología blockchain ha introducido nuevos sistemas de confianza e intercambio en los que los usuarios pueden enviar valor directamente de una parte a otra sin necesidad de intermediarios. Su éxito inicial proviene del desarrollo de activos financieros externos al sistema fiduciario, controlado por los diferentes gobiernos. Se trata, sin embargo, de una nueva tecnología que pone el acento en la descentralización y la seguridad, y que puede emplearse en multitud de ámbitos diferentes al financiero. Este es el caso del entorno educativo, en el que la tecnología blockchain puede mejorar la transparencia y rendición de cuentas, ofreciendo un registro inmutable de datos educativos, incluidos expedientes académicos, títulos y certificaciones, que sea verificable y a prueba de manipulaciones. Este trabajo muestra el desarrollo de un sistema de aplicación al ámbito educativo basado en la tecnología blockchain que complementa el método de evaluación de una asignatura. El sistema desarrollado es versátil y se puede ampliar para evaluar un curso, un grado o extenderse hasta el desarrollo de un curriculum vitae transparente, verificable y seguro.**

Keywords*— *Blockchain, Education, Internet of things, Credential verification

I. Introducción

La tecnología blockchain inicia oficialmente su desarrollo en el año 2009, cuando Satoshi Nakamoto lanza el activo financiero descentralizado denominado Bitcoin (BTC), que pretendía utilizar como medio de intercambio y alternativa viable al sistema monetario fiduciario controlado por los diferentes gobiernos y bancos centrales [1]. El 12 de enero de 2009 se produce la primera transacción de 10 BTC entre Satoshi Nakamoto y Hal Finney, aunque la primera transacción económica en el mundo se realiza el 22 de mayo de 2010, fecha en la que Laszlo Hanyecz compra dos pizzas en Jacksonville, Florida, por 10.000 BTC [2]. Como comentario indicativo de lo que ha supuesto esta nueva tecnología, destacar que el precio pagado por aquellas pizas equivale en 2023 a unos 500 millones de US$ si se tiene en cuenta el valor de cotización del BTC en los mercados internacionales actuales.

Blockchain es una tecnología revolucionaria de naturaleza descentralizada, segura y transparente que ha tenido el potencial de revolucionar las finanzas y que puede afectar de igual manera a la industria, la gestión de la cadena de suministro, la atención sanitaria o la educación. La integración de la tecnología blockchain en el sistema educativo tiene el potencial de mejorar en gran medida la eficiencia, seguridad y credibilidad del proceso educativo, creando plataformas seguras y transparentes para rastrear y verificar los logros académicos de los estudiantes [3]. La tecnología blockchain puede ayudar a crear un entorno más accesible y confiable del sistema educativo, que facilite que los estudiantes muestren sus habilidades y conocimientos a posibles empleadores.

Sin embargo, la tecnología blockchain ha tenido un desarrollo que podríamos denominar escaso en el ámbito educativo, bastante menor al alcanzado en otros ámbitos y, sinceramente, aún no podemos decir que se haya implantado de una manera eficaz. Uno de los principales beneficios que puede aportar esta nueva tecnología en el ámbito educativo es la creación y almacenamiento a prueba de manipulaciones y descentralizado de una transcripción digital del historial académico del estudiante, incluidas calificaciones, certificaciones y otros. Esto eliminaría la necesidad de transcripciones tradicionales en papel, que pueden perderse, dañarse o manipularse con relativa facilidad [4]. Otro beneficio potencial de blockchain en educación es la creación de una plataforma descentralizada para la emisión y verificación de documentos digitales y credenciales, lo que puede simplificar enormemente el proceso de obtención y verificación de las credenciales académicas al eliminar la necesidad de intermediarios. La propia naturaleza de la blockchain ayuda a prevenir el fraude, proporcionando una base confiable y un registro a prueba de manipulaciones de los logros de los estudiantes [5]. Así, existen interesantes aproximaciones relacionadas con el sistema Universitario [6], centradas en la mejora de los procedimientos para verificar la autenticidad de los títulos y diplomas. La educación y cursos on-line ofrecen un nicho de especial interés a la blockchain, al incorporar una plataforma segura y confiable para impartir y realizar un seguimiento y la certificación de los cursos, lo que puede ayudar a mejorar su credibilidad y reconocimiento por parte de los estudiantes y empleadores [7].

Blockchain representa una revolución tecnológica con potencial para modificar el proceso educativo, mejorando su eficiencia y credibilidad y creando plataformas seguras y transparentes para el seguimiento y verificación de los logros académicos de los estudiantes. Sin embargo, es necesario abordar numerosos desafíos para lograr el potencial pleno de esta tecnología en el sector educativo. Entre estos desafíos se encuentran la adopción propia de la tecnología, lo que requiere de un conocimiento técnico importante, la interoperabilidad y regulación del sistema que se desarrolle, su costo, escalabilidad y accesibilidad, o la imprescindible privacidad y seguridad de los datos almacenados. No se trata de retos sencillos de abordar. Así, el aspecto jurídico relacionado con una tecnología se caracteriza por la existencia de bloques que son registros de información y por la transparencia en la información que contienen. Los usuarios pueden acceder a la información de forma libre [8], lo que puede llegar a suponer un conflicto con el derecho a la protección de datos de carácter

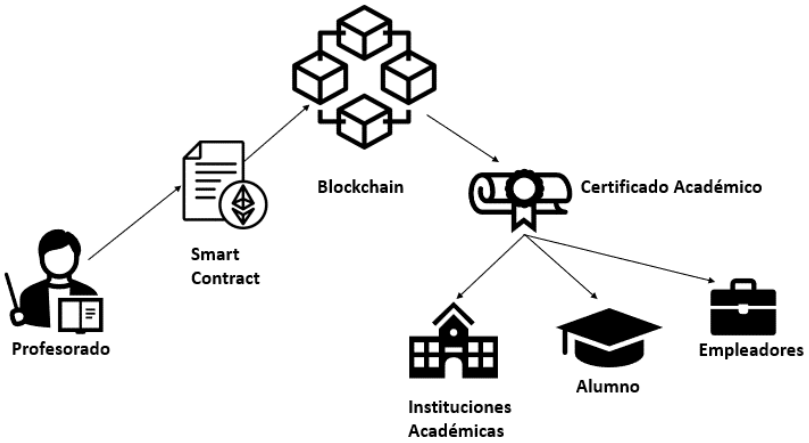


Fig. 1. Entorno demostrativo desarrollado para la certificación educativa basado en la blockchain.

personal [9]. Otro conflicto jurídico que puede suscitarse aparece entre el principio de transparencia que caracteriza a la Blockchain y la confidencialidad o derecho a la privacidad del titular de los datos registrados mediante esta tecnología, para cuya convivencia pacífica la doctrina ha propuesto la seudonimización [10]. Del mismo modo, los datos almacenados son por lo general inmutables, lo que constituye un mecanismo de garantía de que nadie podrá alterarlos sin que el resto de verificadores y titulares de los datos tengan conocimiento de ello. Sin embargo, la inmutabilidad de los datos, y su existencia perpetua en la red, entra en conflicto con el conocido "derecho al olvido" que ostentan los titulares sobre sus datos registrados en Internet e indexados en los motores de búsqueda [11].

El trabajo que se presenta en este documento diverge respecto a los trabajos de investigación habitualmente desarrollados en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla [12]-[16]. Por el contrario, se trata de un ejercicio práctico de implementación de un entorno basado en la blockchain para la evaluación y certificación académica relacionada con una asignatura. Se trata de un trabajo de fin de grado (TFG) desarrollado por un alumno del Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación de la Universidad de Sevilla, que le ha permitido profundizar en los conocimientos de programación y seguridad adquiridos a lo largo de su trayectoria académica en la ETSI de la Universidad de Sevilla. En la sección II se describe el sistema desarrollado, detallando las herramientas empleadas. Posteriormente, se describen las elecciones realizadas para la implementación del sistema, así como los resultados obtenidos en las secciones III y IV y las conclusiones alcanzadas en la sección V.

II. Descripción general del trabajo desarrollado

El sistema de certificación académica planteado utiliza la tecnología blockchain con NFT como solución innovadora diseñada para mejorar la gestión y verificación de credenciales académicas en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, aprovechando las fortalezas de la tecnología blockchain para garantizar la seguridad, transparencia e integridad de los registros académicos, y permitiendo a los estudiantes demostrar sus logros de manera confiable.

El sistema evalúa, mediante un contrato inteligente y de manera automatizada, los diferentes factores que intervienen en la calificación del alumno, limitando la intervención del profesorado a las acciones estrictamente necesarias (evaluaciones de tipo cualitativo que requieran de cuantificación). Este enfoque no solo simplifica la gestión de evaluaciones, sino que empodera a los alumnos al proporcionarles un entorno predefinido e inalterable de evaluación, así como certificados digitales sólidos y verificables de las asignaturas que han cursado. Se garantiza la transparencia, rapidez e inmutabilidad de las calificaciones y se consigue eliminar barreras burocráticas para la obtención de certificaciones académicas, fortaleciéndose la credibilidad del curriculum vitae de los estudiantes.

Se emplea la red Ethereum, una plataforma de blockchain pública y descentralizada, ampliamente conocida por su soporte de contratos inteligentes. Se han elegido herramientas como Remix e IDE para el desarrollo de los contratos inteligentes, así como el lenguaje de programación Solidity para la implementación de éstos. Además, se utiliza un servicio de almacenamiento IPFS para asegurar la integridad y disponibilidad de los datos fuera de la cadena.

A continuación, se enumeran los pasos seguidos en el proceso de acreditación realizado:

1. Creación del contrato inteligente. Un profesor crea un contrato inteligente en la blockchain que define las reglas y condiciones para la emisión de calificaciones a los estudiantes. Este contrato inteligente actúa como un intermediario confiable que garantiza la ejecución de las condiciones acordadas de manera automatizada y segura.
2. Generación del token para el estudiante. Cuando el profesor califica a un estudiante en una asignatura, genera un archivo JSON que contiene información relevante como la nota y el nombre del alumno, la asignatura o cualquier otro detalle que se considere pertinente. Este archivo JSON actúa como el certificado digital de la calificación que se propone.
3. Subida del archivo JSON a IPFS (sistema de archivos interplanetario). El archivo JSON generado se sube a IPFS, un sistema de archivos descentralizado que utiliza la tecnología de la cadena de bloques para almacenar y distribuir contenido de manera descentralizada. IPFS asigna un identificador único al archivo, conocido como CID (*Content IDentifier*), que puede utilizarse para acceder al archivo desde cualquier lugar de la red IPFS.

4. Almacenamiento del CID en Pinata. Pinata es un servicio que permite almacenar y gestionar archivos en IPFS de manera conveniente. El profesor utiliza Pinata para subir el archivo JSON a IPFS y obtiene un token único de Pinata que representa el archivo subido.
5. Entrega del CID al estudiante. Una vez que el archivo JSON está almacenado en IPFS y se ha obtenido el token de Pinata, el profesor entrega este token al estudiante. El token actúa como prueba criptográfica de la existencia e integridad del certificado de calificación del estudiante en IPFS.
6. Reclamación del certificado por parte del estudiante. El estudiante puede reclamar su certificado de calificación utilizando el token recibido del profesor. Al presentar este token, el estudiante puede acceder al archivo JSON almacenado en IPFS y verificar la autenticidad de su calificación.

III. Elecciones Tecnológicas

El auge de la tecnología blockchain en los últimos años ha generado un gran interés en la creación de redes descentralizadas y seguras. Esta tecnología ha dado lugar a una variedad de enfoques y plataformas para construir y gestionar redes blockchain, cada una con sus propias características, ventajas y desafíos. Desde la popularidad de Ethereum y Hyperledger Fabric hasta la emergencia de nuevas cadenas de bloques como Polkadot y Solana, el panorama de las tecnologías blockchain ha experimentado una rápida evolución. Este constante progreso se debe en gran medida a la demanda de soluciones innovadoras para problemas de confianza, seguridad y eficiencia en diversas industrias. La investigación y el desarrollo continuos en el campo de la tecnología blockchain están impulsando nuevas mejoras y funcionalidades, lo que garantiza que esta tecnología siga siendo una fuerza disruptiva y en constante evolución en los próximos años.

Para la elección de la red blockchain a utilizar en la propuesta presentada en este trabajo, se estudiaron como posibilidades Ethereum (ETH), Hyperledger Fabric (FABRIC), Solana (SOL) y Polkadot (DOT), ofreciendo cada red una serie de ventajas e inconvenientes que se ilustran en la Tabla 1. Se ha optado por la red Ethereum por las diferentes herramientas que ofrece, la versatilidad en ejecución de los contratos inteligentes, así como la importante comunidad y madurez en el sector que aporta (ampliamente adoptada y sólido ecosistema de desarrollo). Además, Ethereum ofrece la capacidad de crear contratos inteligentes utilizando su propia criptomoneda, lo que permite proporcionar un incentivo económico a los participantes en el sistema.

Tabla 1. Ventajas e inconvenientes en la implantación de un sistema de certificación curricular.

Red	Ventajas	Inconvenientes
ETH	Versatilidad en la ejecución de los contratos inteligentes. Gran comunidad y ecosistema de desarrollo. Seguridad robada con Prueba de Trabajo (PoW).	Escalabilidad limitada con congestión de red. Privacidad estándar, menos adecuada para casos sensibles.
FABRIC	Enfoque empresarial con características avanzadas. Privacidad granular y control de acceso. Escalabilidad y eficiencia para entornos empresariales.	Mayor complejidad de configuración. Comunidad más pequeña en comparación con Ethereum.
SOL	Alta velocidad y escalabilidad hasta 65,000 TPS. Tarifas de transacción bajas y rendimiento elevado. Completo soporte Turing, adecuado para aplicaciones complejas.	Menor madurez y riesgo potencial. Comunidad y ecosistema en crecimiento, pero aún menor.
DOT	Interoperabilidad entre múltiples cadenas de bloques. Escalabilidad mediante conexión de cadenas paralelas.	Menor adopción y madurez en comparación con Ethereum. Mayor complejidad técnica para desarrolladores.

Para seleccionar el entorno de desarrollo también se estudiaron tres opciones de IDE (*Integrated Development Environment*): Remix, Truffle y VS Code con extensiones para Ethereum. El resumen de las ventajas e inconvenientes de los IDE analizados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Ventajas e inconvenientes de diferentes IDE analizados.

IDE	Ventajas	Inconvenientes
Remix	Fácil de usar y accesible en línea. Soporte para el desarrollo y despliegue de contratos inteligentes en Ethereum. Amplia comunidad y documentación.	Limitaciones en funcionalidades avanzadas en comparación con IDE locales. Dependencia de conexión a internet.
Truffle	Potente suite de desarrollo para Ethereum. Soporte para desarrollo local y pruebas Herramientas avanzadas para testing, migraciones y despliegue de contratos.	Curva de aprendizaje más pronunciada para principiantes. Requiere configuración local y dependencias adicionales. Menos accesible para desarrolladores novatos.
VS Code	Integración con el popular editor de código Visual Studio Code. Personalización y soporte de la comunidad.	Requiere configuración adicional y descarga de extensiones. Menor soporte específico para Ethereum en comparación con Remix.

Finalmente se escogió Remix debido a su facilidad de uso y su integración directa con la red Ethereum, lo que facilita el desarrollo y la depuración de contratos inteligentes. Además, está basado en la web y permite escribir, probar y desplegar contratos inteligentes en la red Ethereum de manera muy sencilla.

En el caso del lenguaje de programación empleado para el desarrollo de los contratos inteligentes, se han contemplado las alternativas de Solidity y Vyper, cuyas ventajas e inconvenientes se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Ventajas e inconvenientes de los diferentes lenguajes de programación para el desarrollo de los contratos inteligentes analizados.

Lenguaje	Ventajas	Inconvenientes
Solidity	Diseñado específicamente para contratos inteligentes en Ethereum. Amplia adopción y comunidad activa. Integración con herramientas de desarrollo como Remix y Truffle.	Posibles vulnerabilidades y errores de seguridad debido a su complejidad. Limitaciones en comparación con lenguajes más maduros.
Vyper	Lenguaje más seguro y fácil de entender que Solidity. Enfoque en la simplicidad y la seguridad. Menos propenso a errores y vulnerabilidades de seguridad.	Menor adopción y comunidad en comparación con Solidity. Limitaciones en funcionalidades avanzadas. Menos herramientas de desarrollo y soporte disponible.

La opción de Vyper se descartó debido a su menor adopción y por sus limitaciones frente a Solidity. Además, Solidity se utiliza de manera bastante habitual en el ecosistema Ethereum y se integra de manera directa con Remix, estando diseñado específicamente para la creación de contratos inteligentes, lo que lo hace adecuado para este caso de uso.

Finalmente, para la elección del servicio de almacenamiento IPFS (*InterPlanetary File System*) se barajaron como opciones Pinata, Infura o Textile. En este caso, las ventajas e inconvenientes que planteaban para el desarrollo del sistema a desarrollar se han descrito en la Tabla 4, optando por el uso de Pinata gracias a su fácil configuración y creación de usuario, además de su intuitiva interfaz de usuario. Por otro lado, Pinata ofrece un plan gratuito que cumple todas las necesidades del proyecto dado que el sistema planteado es un ejemplo de implementación a nivel de asignatura que no va a necesitar de grandes volúmenes de almacenamiento de datos.

Tabla 4. Ventajas e inconvenientes de los diferentes servicios de almacenamiento IPFS analizados.

Servicio IPFS	**Ventajas**	**Inconvenientes**
Pinata	Fácil de usar y configurar para almacenamiento IPFS. Interfaz de usuario intuitiva y documentación detallada. Características adicionales como análisis de archivos y gestión de tokens.	Planes de precios costosos para grandes volúmenes de almacenamiento.
Infura	Amplia red de nodos IPFS para una mayor disponibilidad y redundancia.	Limitaciones en el plan gratuito, como cuotas de uso y acceso restringido a algunas características.
Textile	Herramientas y bibliotecas adicionales para desarrolladores, incluyendo Textile Buckets y Threads.	Curva de aprendizaje para principiantes en el uso de herramientas y bibliotecas Textile. Menor alcance y adopción en comparación con alternativas más establecidas.

En definitiva y a modo de resumen de las elecciones tecnológicas que afectan al desarrollo que se plantea en este trabajo, podemos indicar que los principales componentes del sistema son:

1. Contratos Inteligentes desarrollados en Ethereum mediante Solidity, que se emplearán para gestionar la emisión, verificación y consulta de certificados académicos y calificaciones de los estudiantes. Estos contratos están diseñados para ser transparentes, inmutables y ejecutados de manera descentralizada en la red Ethereum.
2. IDE basado en Remix, que se utiliza como entorno de desarrollo integrado para escribir, compilar y desplegar los contratos inteligentes en la red Ethereum. Proporciona una interfaz intuitiva que facilita el desarrollo y la prueba de los contratos.
3. Uso de tokens no fungibles o NFT (*Non Fungible Tokens*) para representar de manera única y no transferible los certificados académicos y las calificaciones de los estudiantes. Inicialmente se consideró el uso de tokens Soul-bound para la emisión de certificados académicos, aunque, debido a su indisponibilidad en el momento del desarrollo del estudio, se optó finalmente por utilizar NFT como alternativa.
4. Se utiliza un servicio de almacenamiento IPFS para almacenar los certificados académicos y las calificaciones de los estudiantes de manera descentralizada, de manera que cada archivo se almacena en IPFS y genera un CID (*Content IDentifier*) único, que se utiliza como referencia en los contratos inteligentes desarrollados en Ethereum.

IV. Resultados Obtenidos

El uso de la tecnología blockchain en el ámbito educativo universitario no es nuevo, si bien aún se trata de una tecnología que no se encuentra ampliamente difundida. Existen diferentes universidades que han adoptado la tecnología blockchain en sus programas educativos. Así, la Universidad de Nicosia (Chipre) ofrece un programa de maestría en Blockchain y Criptomonedas, permitiendo pagos en Bitcoin. El MIT (Instituto de Tecnología de Massachusetts, en EEUU) emite certificados de finalización de cursos a través de una plataforma basada en blockchain llamada Blockcerts. El College of London (UK) mejora la transparencia y la trazabilidad de la cadena de suministro de la universidad, garantizando el abastecimiento ético y sostenible de bienes y servicios, empleando VeChain. La Universidad de Melbourne (Australia) ha explorado el uso de la blockchain para gestionar y proteger los datos de investigación, proporcionando un registro inmutable y transparente de las contribuciones de los investigadores. La Universidad de Stanford (EEUU) ha lanzado varios proyectos relacionados con la blockchain, incluyendo el Centro de Investigación Blockchain de Stanford, que se centra en la investigación y el desarrollo de tecnologías blockchain.

La propuesta pretende servir de ejemplo para la implementación y utilidad de la tecnología en la certificación educativa, con idea de extraer consecuencias sobre los beneficios acarreados para la institución educativa y para los estudiantes. Es esperable que la transparencia e integridad de los registros académicos mejorarán considerablemente, puesto que la naturaleza inmutable de la tecnología garantizará que las credenciales académicas emitidas (certificados y calificaciones) son auténticas y seguras, sin posibilidad de alteración o falsificación. En principio, esta característica debe proporcionar una mayor confianza a cualquier entidad interesada en la verificación de las credenciales de los estudiantes. Las transacciones se almacenan en una red descentralizada, lo que significa que no existe un punto aislado de los demás que los hackers puedan utilizar para modificar la red. Cada transacción está protegida con criptografía, lo que dificulta alterar o borrar registros. Esto hace que blockchain sea perfecta para mantener seguros los registros de los estudiantes, que contienen información personal y confidencial relacionada con los logros académicos.

Por otro lado, la eficiencia en la gestión de registros académicos aumentaría notablemente. Con un sistema basado en blockchain, el proceso de emisión, almacenamiento y verificación de certificados y notas se simplificaría y agilizaría significativamente. Los estudiantes podrían acceder a sus registros académicos de manera instantánea y segura, eliminando la necesidad de solicitar documentos físicos a las instituciones educativas. Esto no solo reduciría la burocracia y los costos administrativos asociados, sino que también proporcionaría un acceso más rápido y conveniente a la información académica. Además, la verificación se puede realizar en tiempo real con blockchain, proporcionando eficiencia y rapidez al procedimiento.

Otro beneficio que puede considerarse clave de la tecnología blockchain en educación es la creación de identidades digitales para estudiantes, si bien debe solventar antes el derecho a la privacidad mencionado en la introducción de este trabajo. La identidad digital de un estudiante puede incluir información como su nombre, fecha de nacimiento y

nivel académico, que se puede utilizar para seguir el progreso a lo largo de la carrera educativa e incluso profesional. Al disponer una identidad digital segura y descentralizada, los estudiantes pueden controlar quién tiene acceso a su información personal y es posible asegurar que los registros ni se pierden ni se alteran.

Finalmente, el uso de la tecnología blockchain en educación también puede ayudar con la distribución de recursos educativos, como pueden ser las becas y subvenciones. Al tener un libro de transacciones seguro, las instituciones educativas pueden realizar un seguimiento de la distribución de los recursos, garantizando que se utilicen para el fin previsto. El uso de contratos inteligentes puede automatizar la distribución de recursos, reduciendo el riesgo de error humano y aumentando la eficiencia del proceso. Nuevamente, será necesario solventar antes el derecho a la privacidad y al olvido digital de las personas que intervengan en el sistema que se desarrolle.

En nuestro caso, se trata de implementar un prototipo de aplicación basada en la tecnología blockchain para la evaluación y certificación académica relacionada con una asignatura que se imparte en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. El funcionamiento de la aplicación desarrollada se ilustra en las Figs. 2 a 6. Mediante un contrato inteligente, el profesor de la asignatura emite un token a un alumno de la misma, para lo que crea un JSON con los datos del alumno y lo almacena en Pinata, Figs. 2 y 3. Posteriormente, en el contrato inteligente se usa la opción issueDegree con la dirección del alumno, Fig. 4. Usando la herramienta EtherScan, Fig. 5, se puede observar el contrato inteligente en la red de pruebas utilizada, en este caso Sepolia, y ver las distintas transacciones y el bloque donde se encuentra situado el contrato.

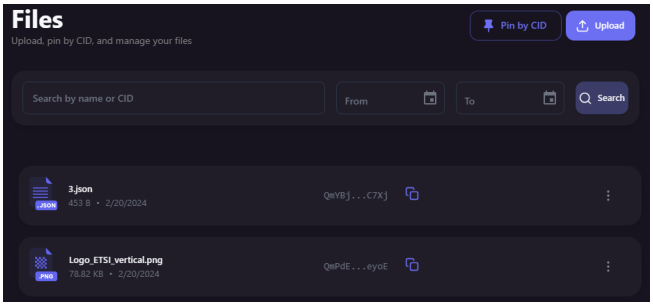


Fig. 2. Archivo JSON en la plataforma de IPFS Pinata con su respectivo CID. En nuestro caso, el profesor de la asignatura es identificado con la dirección 0x231e329b7074a3cb72D165A7000CE7b0279B1C63, mientras que la dirección 0x8Ad8d454cA5F983699c42c725e73e6A5d8042Dc2 identifica al alumno.

```
{
    "image":"https://ipfs.io/ipfs/QmPdE1ngwZuDSvxf7pbqj6VruDD5c7Nw9GpDayZgNeyoEs",
    "description": "´Nota obtenida en la asignatura X del Grado Y de la Universidad d
    "attributes":    [
        {
            "trait_type": "Nota",
            "value": 7,
            "max-Value": 10
        },
        {
            "trait_type": "Grado",
            "value": "Grado en Ingeniería de Y"
        },
        {
            "trait_type": "Nombre Alumno",
            "value": "Fulanito Perez"
        }
    ]
}
```

Fig. 3. Estructura del archivo JSON.

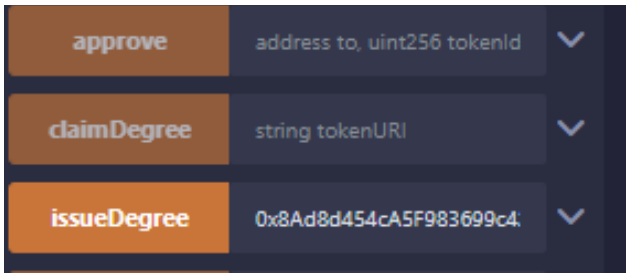


Fig. 4. Opción IssueDegree en el contrato inteligente con la dirección del alumno.

Fig. 5. Transacciones monitorizadas usando EtherSca.

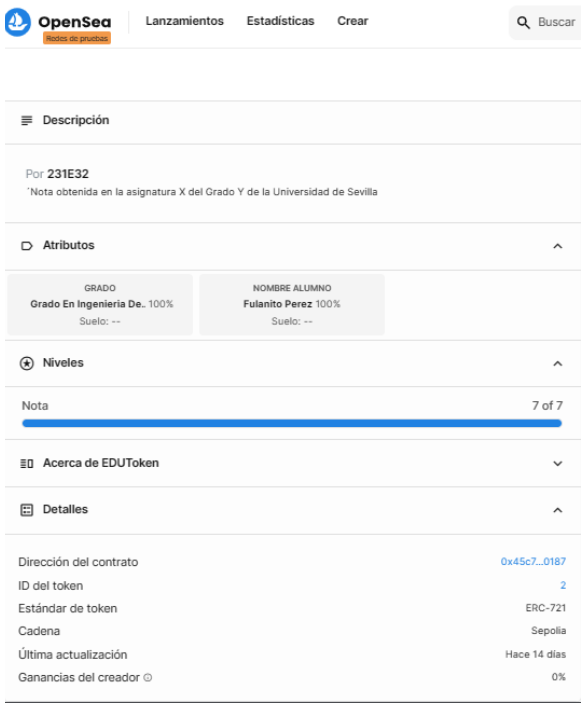


Fig. 6. Certificado educativo en forma de NFT visualizado desde OpenSea.

Una vez realizado el proceso anterior, el alumno puede emplear el CID que le es proporcionado por su profesor y, utilizando la opción claimDegree, puede reclamar su título y monitorizar su certificado académico en páginas como openSea (Fig. 6) y enviar este link a otras instituciones para acreditar el certificado previa verificación de la dirección de la cuenta del alumno.

V. Conclusiones

La tecnología blockchain se encuentra apenas en sus primeras etapas de desarrollo. Este desarrollo no es sencillo puesto que la infraestructura que necesita para su implantación no se encuentra disponible y requiere de una disrupción total

del modelo económico y tecnológico existente. La situación descrita es perfectamente extrapolable al ámbito académico, en el que podemos concluir de los estudios y primeros casos de uso publicados que ya se han puesto los primeros bloques para la construcción y desarrollo de la tecnología. En este trabajo se ha discutido y explorado el impacto que puede tener la tecnología blockchain en el sector educativo, presentándose un ejemplo de implementación que permite certificar notas de alumnos de una asignatura impartida en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. Se han analizado las capacidades y limitaciones actuales de la tecnología, así como las posibilidades que ésta ofrece de cara a un futuro cercano, discutiéndose los principales desafíos que se han de abordar, sobre todo relacionados con la privacidad, seguridad, confianza y confiabilidad, verificación y validación de los datos, así como con la gestión, adopción, conocimiento técnico, regulación y coste de la tecnología. El trabajo forma parte del trabajo de fin de grado (TFG) desarrollado por un alumno del Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación de la Universidad de Sevilla.

REFERENCES

[1] M. Belotti, N. Božić, G. Pujolle, S. Secci, "A Vademecum on Blockchain Technologies: When, Which, and How," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 4, pp. 3796-3838, 2019.

[2] Anjee Gorkhali , Ling Li, Asim Shrestha, "Blockchain: a literature review," Journal of Management Analytics, vol. 7, no. 3, pp. 321-343, 2020.

[3] A. El Koshiry, E. Eliwa, T.A. El-Hafeez, M.Y. Shams, "Unlocking the power of blockchain in education: An overview of innovations and outcomes," Blockchain: Research and Applications, vol. 4, Iss. 4, pp. 1-19, 2023.

[4] M.A. Haque, S. Haque, S. Zeba, et al., "Sustainable and efficient E-learning internet of things system through blockchain technology," E-Learning and Digital Media, pp. 1-20, 2023.

[5] R. Bhatia, N.K. Bhasin, "A study of the new role of blockchain in the Indian education system," Int. J. e-Collaboration, vol. 19, Iss. 1, pp. 1-19, 2023.

[6] F. Vidal, F. Gouveia and C. Soares, "Analysis of Blockchain Technology for Higher Education," 2019 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC), Guilin, China, pp. 28-33, 2019.

[7] S.P. Dash, "An Introduction to Blockchain Technology: Recent Trends," Panda, S.K., Mishra, V., Dash, S.P., Pani, A.K. (eds) Recent Advances in Blockchain Technology. Intelligent Systems Reference Library, vol. 237, Springer, Cham, 2023.

[8] Sirus Mashouf Mohsenin, "Blockchain: contratación y jurisdicción," Revista Aranzadi de Derecho y Nuevas Tecnologías, Nº. 60/2022 (BIB 2022\3537).

[9] Ley Orgánica 3/2018, de 5 de diciembre, de Protección de Datos Personales y garantía de los derechos digitales.

[10] Agencia Española de Protección de Datos (AEPD), "Introducción al HASH como técnica de seudonimización de datos personales," https://www.aepd.es/documento/estudio-hash-anonimidad.pdf, 2019.

[11] M. Costeja González, STJUE (GS) de 13 de mayo de 2014, Asunto C.131/12, Google vs. Agencia Española de Protección de Datos.

[12] F. Colodro, J.L. Mora, F. Barrero, M.R. Arahal, J.M. Martinez-Heredia, "Analysis and simulation of a novel speed estimation method based on oversampling and noise shaping techniques," Results in Engineering, Vol. 21, 2024.

[13] D. Soto-Marchena, F. Barrero, F. Colodro, M.R. Arahal, J.L. Mora, "On-Site Calibration of an Electric Drive: A Case Study Using a Multiphase System," Sensors, Vol. 23, Iss. 17, 2023.

[14] M.R. Arahal, F. Barrero, M.G. Satué, M. Bermúdez, "Fast Finite-State Predictive Current Control of Electric Drives," IEEE Access, Vol. 11, pp. 12821-12828, 2023.

[15] M.G. Satue, M.R. Arahal, D.R. Ramirez, F. Barrero, "Multi-phase predictive control using two virtual-voltage-vector Constellations," Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Vol. 20, Iss. 4, 2023.

[16] M.R. Arahal, F. Barrero, M. Bermúdez, M.G. Satué, "Predictive Stator Current Control of a Five-phase Motor using a Hybrid Control Set," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 11, Iss. 2, pp. 1444-1453, 2023.

Ilumina: aprendizagem baseada em projetos na educação profissional e tecnológica

Danyelle Mousinho Medeiros Santana
Coordenadoria de Eletrônica
Instituto Federal de Sergipe
Aracaju, Brasil
danyelle.santana@academico.ifs.edu.br

Renan Oliveira Silva
Coordenadoria de Eletrônica
Instituto Federal de Sergipe
Aracaju, Brasil
renan.silva@ifs.edu.br

Maria Carolina Aragão de Andrade
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Sergipe
São Cristóvão, Brasil
aragao.carol@academico.ufs.br

***Abstract*—This work addresses the project of dimmable luminaires developed by students finishing a technician course in electronics, also known as Project Ilumina. Using a project-based learning methodology, students are challenged to transform their proposals into manually fabricated devices that can be used safely, according to the following steps: product development with safety and aesthetic criteria and requirements; electronic circuit design, simulation and prototyping; cost assessment, assembly and performance testing; final report and presentation of results at the end of the academic year, during a Technical Project Exhibition.**

Keywords—Project-based learning, Power Electronic, Dimmer, Design, Luminaires

I. INTRODUÇÃO

Escolas e institutos de formação profissional vem, ao longos dos últimos anos, alterando sua forma de ensino, transformando uma abordagem centrada puramente na transmissão de conteúdo do professor para os alunos, que absorvem de forma passiva, para o uso de metodologias ativas de ensino, onde os alunos participam ativamente da formação de seu conhecimento [1]. As metodologias ativas são estratégias que dão ênfase ao papel protagonista do aluno, ao seu envolvimento direto, participativo e reflexivo em todas as etapas do processo, experimentando, desenhando, criando, com orientação do professor, articulando teoria e prática no desenvolvimento de projetos [2]. Essas abordagens inovativas estão mais relacionadas com o desenvolvimento das habilidades requeridas atualmente, como por exemplo, trabalhar com eficiência em equipes, autonomia, uso eficiente de ferramentas, capacidade de comunicar de forma eficaz, possibilitando a formação de um indivíduo melhor preparado para as demandas que o mercado de trabalho e a sociedade buscam.

Entre outras, uma das abordagens mais conhecidas é a aprendizagem baseada em projetos (ABP). Ela é uma metodologia de ensino que proporciona aos alunos a busca pela solução de problemas encontrados por eles em seu dia a dia. Além disso, a partir da identificação desses problemas, eles devem ser capazes de trabalhar cooperativamente para sugerir, planejar e executar medidas para mitigá-los [3]. Aliado a essa metodologia, o movimento *Maker* traz uma abordagem lúdica, onde os estudantes desenvolvem soluções através do uso de tecnologias unidas à criatividade e atividades práticas. Ressaltam-se ainda que as atividades *maker*, alicerçadas na abordagem de aprendizagem baseada em projetos, permitem a experimentação e a criação de produtos através da aplicação de conceitos e teorias aprendidos em sala de aula [4].

A eletrônica de potência é um campo da engenharia elétrica que une três dos principais ramos, sendo eles a potência, eletrônica e controle. Através da aplicação de dispositivos semicondutores de potência, como tiristores e transistores, a eletrônica de potência permite a conversão e controle da energia elétrica em níveis altos de potência. Seus conceitos são aplicados em diversos campos que necessitem desta conversão e controle de potência, desde eletrodomésticos (motores pequenos com menos de 1 *horsepower* - HP) até equipamentos industriais com centenas de HP. Suas principais aplicações são retificadores, *choppers*, controladores de tensão alternada (CA), inversores e conversores cíclicos [5].

Nesse contexto, como uma das atividades da disciplina de eletrônica de potência do Curso Técnico de nível médio em Eletrônica, foram desenvolvidos projetos de controle de potência em corrente alternada aplicando-se a ABP e cultura *maker* na confecção de luminárias dimerizáveis. Esse projeto vem sendo realizado desde 2017, já realizado em seis turmas e veio a ser chamado de Projeto Ilumina.

A disciplina faz parte da grade curricular do último ano do Curso Técnico de Nível Médio em Eletrônica com carga horária de 66 h, na qual são abordados assuntos como tiristores, conversores CA/CC (corrente contínua), CC/CA, CA/CA e CC/CC, além de aplicações de controle de potência. Nessa disciplina, os alunos realizam atividades que envolvem a análise e simulação de circuitos eletrônicos de potência, além de experimentos práticos, elaboração de relatórios, avaliações individuais e em grupo ao longo do ano letivo.

Sendo assim, é apresentado neste artigo a metodologia e os resultados obtidos no desenvolvimento do projeto Ilumina, ao longo das suas edições. Apesar de ser requerido no projeto a fabricação de um produto final, deve-se ter em mente que o mais importante é o aprendizado construído ao longo das etapas que permitirá chegar ao dispositivo almejado, ou seja, o que mais importa é o processo [1]. A análise dos resultados permite verificar que a realização destes projetos proporcionou aos estudantes o desenvolvimento de diversas competências técnicas, comportamentais e interpessoais, além de habilidades e conhecimentos de extrema relevância para a sua atuação profissional.

II. DESCRIÇÃO DE UM CIRCUITO DIMMER USANDO TRIAC E DIAC

Com relação ao desenvolvimento do circuito eletrônico, o projeto se baseia na confecção do *dimmer*, que é um circuito eletrônico que, em uma das suas configurações, utiliza o TRIAC (*Triode for Alternating Current*) para regulação da potência CA através do controle de fase, sendo empregado em aplicações de ajuste da intensidade luminosa em lâmpadas

incandescentes e lâmpadas dimerizáveis, bem como no controle da geração de calor em resistências, por exemplo.

Apesar de ser um circuito comumente encontrado na literatura, a sua utilização permite que o aluno obtenha e exercite diversos conhecimentos em eletrônica, desde a utilização de componentes eletrônicos de potência, rede defasadora RC, dimensionamento de componentes de proteção como fusíveis, bem como projeto e confecção de placas de circuito impresso.

A dimerização é capaz de criar espaços mais aconchegantes e propícios ao relaxamento em projetos luminotécnicos residenciais. Em edifícios comerciais e condomínios, é possível modificar e controlar a intensidade luminosa de acordo com a circulação de pessoas, além de também ser admissível o desenvolvimento de sistemas de automação para o controle de luminosidade em ambientes providos de iluminação natural, como escritórios e fábricas, por exemplo, regulando a potência da luz artificial de acordo com a necessidade de compensação da diminuição da luz natural, através da utilização de sensores, o que torna os projetos de luminotécnicos mais sustentáveis e eficientes [6].

O circuito representado na Fig. 1 é uma das configurações utilizadas para um *dimmer*. O circuito de disparo é constituído pelo potenciômetro P, associado ao resistor R1 e o capacitor C, que através dessa rede defasadora, controlam o ângulo de disparo (α) obtido quando o capacitor atinge a tensão de disparo do DIAC (*Diode for Alternating Current*) (VBo) que, por sua vez, envia o pulso de corrente para o terminal *gate* do TRIAC, fazendo-o entrar em condução, e permitindo o fornecimento de potência para carga. Nesse circuito, a potência fornecida à carga é controlada através do ângulo de disparo do TRIAC que depende dos valores de P, R1 e C, bem como da tensão de disparo do DIAC. Assim, a potência CA fornecida à carga é controlada e, no caso de a carga ser uma lâmpada, como é proposto no projeto, é produzido um controle de luminosidade.

III. METODOLOGIA DO PROJETO

Com relação à metodologia, o projeto Ilumina consiste no desenvolvimento de uma luminária baseada no circuito eletrônico *dimmer*, exposto na seção II, por alunos do terceiro ano, que estão em fase de conclusão do curso técnico em eletrônica, na disciplina de Eletrônica de Potência. O projeto tem sido desenvolvido, geralmente, no terceiro bimestre e, em todas as suas etapas, sendo acompanhadas e avaliadas com cronogramas e objetivos específicos, até a apresentação da solução final, a luminária dimerizável.

Sobre a disciplina, as aulas são realizadas uma vez por semana, durante 40 semanas, com duração total de 66 horas. Entre outros temas abordados, os alunos aprendem durante as aulas acerca do funcionamento dos componentes eletrônicos de potência a serem utilizados na atividade, além de circuitos para controle dos mesmos, obtendo conhecimento necessário para desenvolvimento dos diversos tipos de conversores abordados na matéria.

Nesse projeto, os estudantes não devem simplesmente criar o circuito eletrônico, como são propostos em projetos, na maioria das vezes, ou apenas criação de protótipos, mas sim produzir um produto final, um equipamento eletrônico, a partir de critérios e requisitos de segurança e estética, além de realizar a escolha de materiais e processo de fabricação. Dessa forma, faz-se necessário seguir uma série de passos elencados na seção IV-A para o correto desenvolvimento da luminária de acordo com a metodologia proposta.

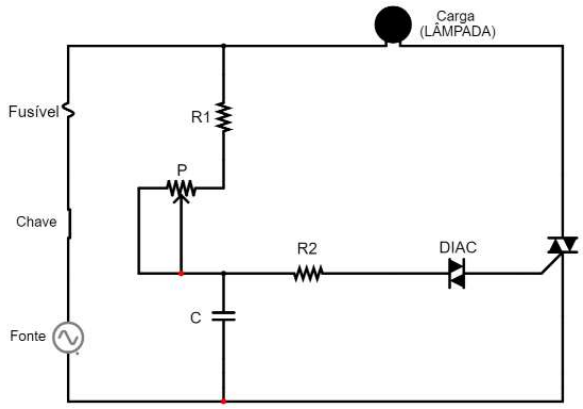


Fig. 1. Exemplo de configuração do circuito *dimmer*

Os projetos são avaliados de acordo com o cumprimento dos objetivos de cada etapa, verificando também o engajamento da equipe e o cumprimento de prazos. Os resultados obtidos serão analisados com base no número de participações ao longo dos anos de aplicação do projeto, bem como na análise dos desempenhos relacionados ao aprimoramento das habilidades visadas como principais objetivos da aplicação da metodologia.

A. *Modelagem do projeto utilizando Aprendizagem baseada em projetos*

Como primeiro passo, faz-se necessário modelar o desenvolvimento do projeto através da metodologia de aprendizagem baseada em projetos. Sobre o seu uso, devem ser seguidas uma sequência de passos que tornam possível a aplicação da metodologia na resolução do problema-base, de acordo com o fluxograma presente na Fig.2.

Como pode ser observado no fluxograma, o ponto de partida do projeto ocorre com a reunião inicial para motivar e engajar os estudantes, onde a base teórica e o problema em questão são expostos com detalhes pelo professor e qual objeto é requisitado como entrega. Exceto para a primeira turma que realizou o projeto, as demais são motivadas também pelos exemplos e casos de sucesso das luminárias desenvolvidas pela turma anterior que foram expostas na mostra final de projetos. Em seguida, é feita a separação da turma em pequenos grupos, sendo dois ou três alunos por grupo para o desenvolvimento das atividades necessárias.

Após este passo, os estudantes têm à disposição os laboratórios do curso para realizar as simulações, montagens e testes necessários para o desenvolvimento dos protótipos e versão final do projeto, com a supervisão do professor e técnico de laboratório. Durante o período do projeto, reuniões são feitas para verificar o planejamento e a implementação e, caso sejam identificados problemas no planejamento ou nas atividades desenvolvidas, sugestões e ajustes são fornecidos para que os membros adequem os projetos e obtenham uma maior probabilidade de finalização do trabalho.

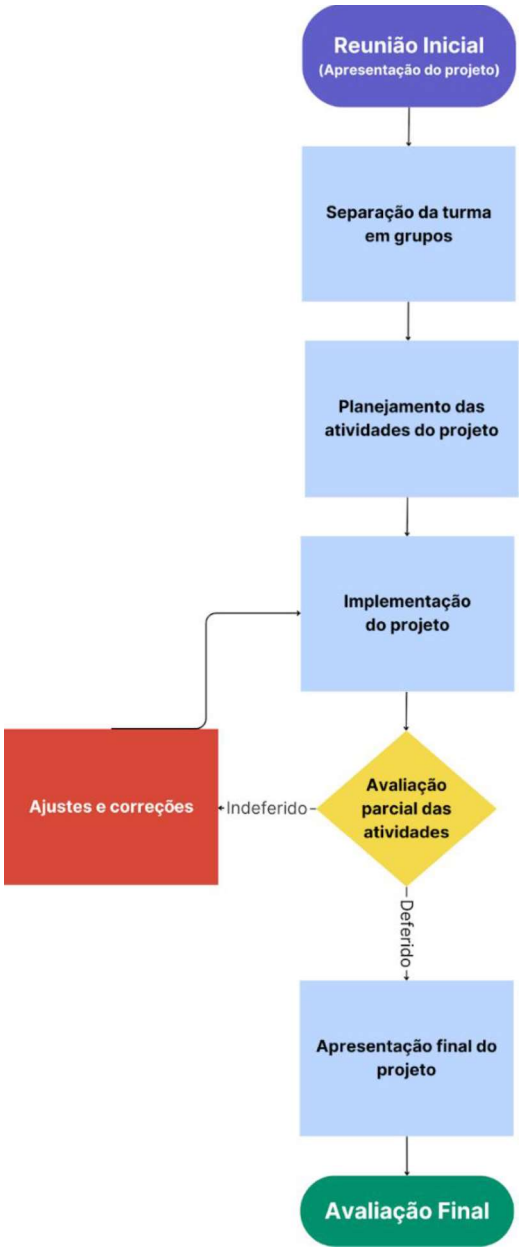


Fig. 2. Fluxograma indicando os passos utilizados da metodologia de aprendizagem baseada em projetos no projeto Ilumina.

B. Desenvolvimento do projeto das luminárias

Sobre o planejamento e implementação das luminárias, faz-se necessárias as seguintes etapas: projeto e simulação do circuito eletrônico; avaliação de custo, orçamento e aquisição dos materiais; design e fabricação de placa de circuito impresso (PCB), montagem e testes de desempenho e acabamentos. Também é requisitado que sejam desenvolvidos manuais e especificações técnicas, além de relatório. Por fim, o protótipo final é apresentado em uma mostra de projetos ao final do ano letivo, para toda a comunidade acadêmica. A seguir, são listadas de forma mais detalhada as etapas elencadas e na Tabela 1, uma relação entre essas etapas e as competências trabalhadas:

- Projeto e simulação do circuito eletrônico:

  Inicialmente, faz-se necessário que os alunos realizem o devido cálculo para o dimensionamento dos componentes a serem utilizados, a fim de que o funcionamento do circuito se dê da forma como foi projetado. Além disso, é fundamental ainda realizar o dimensionamento de um fusível que servirá como proteção em caso de possíveis sobrecargas ou curtos-circuitos. O próximo passo é a realização da simulação do circuito, para que o seu funcionamento seja comparado ao que era esperado no projeto. Por fim, eventuais correções são realizadas e, quando a simulação demonstra o comportamento semelhante ao projetado, é possível passar para a próxima etapa do desenvolvimento.

- Avaliação de custo, orçamento e aquisição dos materiais:

  Nessa etapa, os alunos devem fazer o levantamento dos componentes que serão utilizados e, além disso, é nesse momento que eles precisam definir o design e a estrutura da luminária, pensando em requisitos de segurança e estética, escolhendo os materiais adequados e lâmpadas que podem ser utilizadas. A partir disso, a lista de materiais será feita, e é possível realizar o orçamento do projeto e aquisição dos materiais necessários para a execução do mesmo.

- Design e fabricação de placa de circuito impresso (PCB):

  Como o intuito do projeto é a confecção de uma luminária, pensando em um produto final, uma placa de circuito impresso deve ser desenvolvida, levando em conta a melhor forma de disposição dos componentes. Sendo assim, após a elaboração do layout do circuito, a produção da placa é realizada, sendo recomendado que os alunos utilizem a técnica de transferência térmica para passar o desenho do circuito para a placa. Posteriormente, é realizada a corrosão e, após isso, a montagem e soldagem dos componentes. Na Fig. 3 é possível verificar em detalhe a placa instalada na luminária.

- Montagem da estrutura física:

  Após a confecção da placa, é realizada a montagem da estrutura física da luminária. Nessa etapa, os alunos precisam explorar a criatividade e habilidades relacionadas a áreas da marcenaria, mecânica, impressão 3D, colagens, pinturas, cortes a laser, dependendo do design e material escolhido para a confecção da estrutura. Na Fig. 4 é possível observar etapas de confecção e montagem de uma luminária em MDF.

- Testes de desempenho:

  São realizados, ainda, testes de desempenho da luminária, a fim de atestar seu pleno funcionamento e segurança, bem como as suas especificações elétricas como carga máxima recomendável, ângulo mínimo e máximo de disparo, potência mínima e máxima, obtenção de formas de onda de tensão na carga com o auxílio do osciloscópio para a apresentação dos resultados no relatório e manual. Nas Fig. 5 (a) e (b), pode-se observar fotos tiradas durante a realização de

testes de desempenho, nesse caso, realizado antes da confecção da PCB.

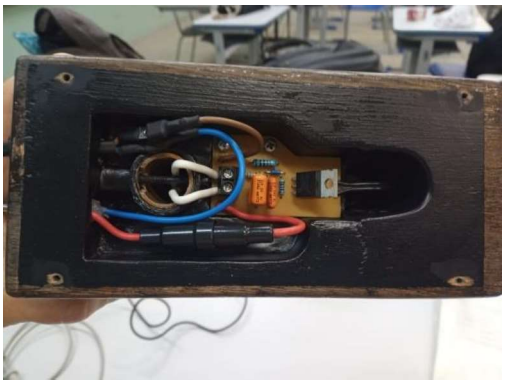
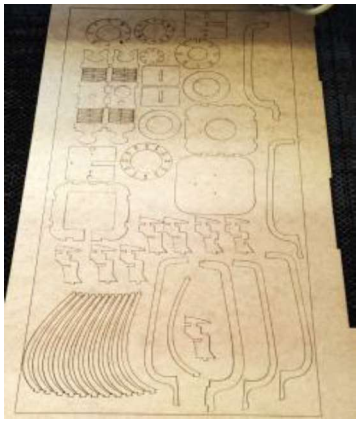


Fig. 3. Detalhe da placa instalada na luminária.



(a)

(b)

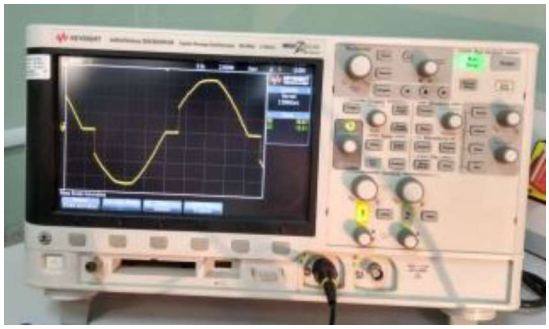
Fig. 4. Montagem da estrutura física de uma luminária. (a) Impressão de folha para recorte a laser do MDF; (b) Luminária montada.

- Desenvolvimento de manuais e especificações técnicas:

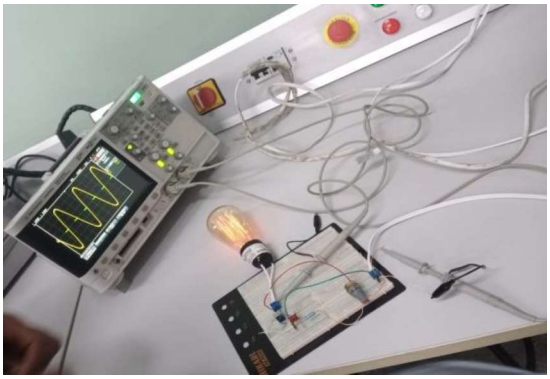
  Com o projeto físico finalizado, devem ser desenvolvidos manuais, juntamente com as especificações técnicas, tanto do circuito existente na luminária, quanto dos seus aspectos estruturais.

- Apresentação e relatório final:

Como desfecho do projeto, é realizada uma apresentação final durante a aula para que os alunos expliquem todo o processo de elaboração, bem como as dificuldades encontradas e quais foram as estratégias utilizadas para contornar os problemas. Além disso, é realizada a demonstração do funcionamento da luminária, bem como a entrega de um relatório final que descreve todo o processo de construção. A finalização do projeto realizando as devidas documentações é de suma importância, uma vez que é nessa etapa que a professora pode avaliar os pontos fortes e quais aspectos podem ser aprimorados na metodologia.



(a)



(b)

Fig. 5. Testes de desempenho. (a) Visualização da forma de onda da tensão na carga no osciloscópio; (b) Teste do funcionamento em bancada.

TABELA I. ETAPAS PARA DESENVOLVIMENTO DAS LUMINÁRIAS

Etapa	Atividade desenvolvida	Competências trabalhadas
01	Projeto e simulação do circuito eletrônico	Trabalho em equipe; Identificar e resolver problemas; Conhecimento técnico de Eletrônica; Uso de ferramentas técnicas
02	Avaliação de custo, orçamento e aquisição dos materiais	Trabalho em equipe; Identificar e resolver problemas
03	Design e fabricação de placa de circuito impresso (PCB)	Trabalho em equipe; Identificar e resolver problemas; Design de produto; Uso de ferramentas técnicas
04	Montagem da estrutura física	Trabalho em equipe; Design de produto; Trabalhos artísticos e manuais; Identificar e resolver problemas
05	Testes de desempenho	Conhecimento técnico de Eletrônica; Uso de equipamentos de medição

Etapa	Atividade desenvolvida	Competências trabalhadas
06	Desenvolvimento de manuais e especificações técnicas	Desenvolver comunicação técnica efetiva
07	Apresentação e relatório final	Trabalho em equipe; Desenvolver comunicação técnica efetiva

IV. Resultados

Ao longo das seis edições realizadas, diversas luminárias foram produzidas, através da metodologia idealizada e descrita na seção III. Os resultados obtidos estão resumidos na Tabela II, identificando o número de projetos e alunos envolvidos, que totalizam 42 projetos e 123 alunos.

Na Fig. 6 (a) é possível observar o design criativo de algumas luminárias desenvolvidas e expostas durante a mostra de projetos de 2019 e (b) expostas na mostra no final de 2023.

TABELA II. Etapas para Desenvolvimento das Luminárias

Ano	Quantidade de projetos	Quantidade de alunos envolvidos
2017	7	23
2018	6	20
2019	8	19
2020[a]	-	-
2021	7	22
2022	6	17
2023	8	22
Total	42	123

a. Não ocorreu devido a pandemia

(a)

(b)

Fig. 6. Exemplos de luminárias: (a) expostas na mostra de 2019; (b) expostas na mostra de 2023.

De maneira geral, ao longo das edições, os estudantes fazem uso do circuito básico apresentado inicialmente, com poucas variações, utilizando mais a criatividade para a parte estrutural e estética. Nesse sentido, foi possível notar o uso de diversos tipos de materiais (madeira, plástico, PVC, etc), sejam eles comprados para esse fim ou reutilizados/reciclados, despertando a preocupação com a sustentabilidade nos estudantes. Porém, alguns projetos também trouxeram inovações, como por exemplo a utilização de placas microcontroladas para interface entre computador e o circuito, assim como a utilização de aplicativos para celular para controle das funcionalidades do circuito.

Foi possível observar que durante o projeto, os estudantes mudaram sua atitude passiva de aprendizado, onde apenas escutavam os conceitos passados em aula, com alguns possíveis questionamento, para uma atitude proativa, buscando o conhecimento em diversos meios (livros, internet, colegas de curso, família), experimentando ou discutindo com outros colegas, sempre em busca da solução ou ainda, se frustrando em alguns momentos e tendo que replanejar e refazer alguns trabalhos até que o resultado atendesse aos requisitos mínimos. Além disso, de forma qualitativa, conseguiu-se identificar a motivação e interesse da maior parte dos alunos, que ao se deparar com um problema real, buscavam soluções e, dessa forma, o processo de aprendizagem tornou-se mais significativo e desafiador.

Algumas turmas apresentaram dificuldades durante as atividades do projeto, a exemplo das que passaram boa parte do curso em ensino remoto durante os anos da pandemia do Covid 19, e não puderam desenvolver significativamente as habilidades práticas, como montagem de circuitos, utilização de instrumentos de medição eletrônica e confecção de placas. Nesse caso, foi necessário adaptar o cronograma e entregas combinadas. Por exemplo, foi ministrado um curso de confecção de PCB utilizando o software Eagle durante o ensino remoto, porém, por falta de prática os alunos não se sentiram seguros em desenvolver o procedimento e solicitaram a utilização de placas universais perfuradas (evitando a necessidade do processo de desenho e corrosão da placa), o que foi acatado e flexibilizado, possibilitando que as equipes utilizassem tais placas, como pode ser observado na Fig. 7. Essa permissão foi dada para não dificultar a continuidade dos projetos, visto que o retorno presencial das aulas ainda não tinha acontecido na instituição, tendo apenas ocorrido duas aulas presenciais, em caráter de exceção, para a realização da montagem dos componentes na placa e testes de desempenho no laboratório para a finalização dos projetos. Com a turma que concluiu o ano letivo de 2020, não foi possível realizar esse projeto, pois a pandemia estava em pleno processo.

Diante dos procedimentos para a elaboração do projeto descritos anteriormente, um problema percebido ao longo das edições foi a tentativa de alguns grupos de copiarem o *layout* do circuito desenvolvido por outra equipe. Porém, devido às particularidades das estruturas físicas, muitas vezes eram necessárias adaptações para melhorar a fixação e o acesso aos componentes, o que demandava entendimento do circuito e a capacidade de adaptação. Além disso, os estudantes precisavam trazer os conhecimentos obtidos nas etapas anteriores para a de apresentação final e relatório, impossibilitando a apresentação de dois projetos idênticos e assim, minimizando o impacto de um possível plágio entre os

grupos, que prejudicaria o desenvolvimento das competências já elencadas.

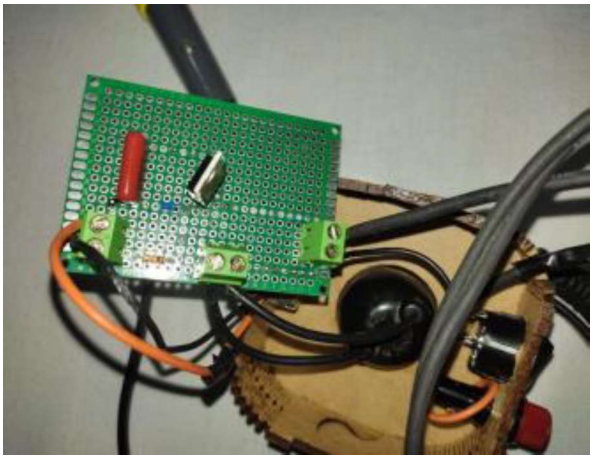


Fig. 7. Projeto desenvolvido com placa universal.

V. Conclusões

O desenvolvimento de projetos fundamentados na metodologia ativa de ensino denominada Aprendizagem Baseada em Projetos possibilitou a ressignificação dos conhecimentos dos estudantes, que atuaram como protagonistas no processo de ensino-aprendizagem, aplicando conhecimentos não apenas técnicos, mas criatividade e diversas outras habilidades, desenvolvendo, sobretudo, suas competências interpessoais e comportamentais como, por exemplo, trabalhar com eficiência em equipes, autonomia, uso eficiente de ferramentas, capacidade de comunicar de forma eficaz, possibilitando a formação de um indivíduo melhor preparado para as demandas que o mercado de trabalho e a sociedade buscam. Além disso, permite que o professor assuma um papel de orientador na construção do saber do aluno.

O desafio de entregar como produto final uma luminária dimerizável possibilitou a aquisição de conhecimentos muito além dos comumente ensinados em aulas tradicionais, pois, além do conhecimento técnico da disciplina eletrônica de potência, que tem seu objeto de estudo principal os tiristores e o controle de potência nas cargas em AC e DC, todas as demais etapas envolvidas como o processo de fabricação de produto, que vão do design da luminária, escolha de materiais, orçamento e processo de manufatura, aliados a requisitos estéticos, requisitos de segurança e usabilidade, fazem com que o desenvolvimento dessa atividade se torne uma experiência única e inesquecível na formação dos futuros técnicos em eletrônica.

Após seis edições de aplicação dessa metodologia de Aprendizagem Baseada em Projetos como caso de sucesso no Projeto Ilumina, ao todo foram 42 projetos orientados. Percebe-se que a cada ano surgem novos desafios e necessidades de adequação e replanejamento, a fim de atender e equilibrar expectativas do docente e o público alvo, com suas especificidades, tornando-se um processo dinâmico, que se fortalece a cada experiência com novas turmas, consolidando o método e promovendo melhorias nos processos de acompanhamento e avaliação do desenvolvimento do projeto e dos estudantes.

Referências

[1] Roy Chaoming Hsu and Wen-Chung Liu, "Project based learning as a pedagogical tool for embedded system education," ITRE 2005. 3rd International Conference on Information Technology: Research and Education, 2005., Hsinchu, Taiwan, 2005, pp. 362-366, doi: 10.1109/ITRE.2005.1503143.

[2] L. Bacich and J. Moran, “Metodologias ativas para uma educação inovadora: uma abordagem teórico-prática”, Penso Editora, 2017.

[3] W. N. Bender, “Aprendizagem baseada em projetos: educação diferenciada para o século XXI”, Penso Editora, 2015.

[4] S. D. V. Lemos e J. A. Valente, "Estudo da Cultura Maker na Escola", Revista e-curriculum, vol. 21, 2023.

[5] A. Ahmed, “Eletrônica de Potência”, Pearson Education do Brasil, 2008, pp.. 14 - 15, 27.

[6] J. Smith, J. Speakes and M. H. Rashid, "An overview of the modern light dimmer: design, operation, and application," Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium, 2005., Ames, IA, USA, 2005, pp. 299-303, doi: 10.1109/NAPS.2005.1560542

Experiencias colaborativas y de gamificación en el aprendizaje de Diseño Microelectrónico

Ángel Diéguez
Electronic and Biomedical Engineering Department
University of Barcelona
Barcelona, Spain
angel.dieguez@ub.edu

Joan Canals
Electronic and Biomedical Engineering Department
University of Barcelona
Barcelona, Spain line
canals@ub.edu

Sergio Moreno
Electronic and Biomedical Engineering Department
University of Barcelona
Barcelona, Spain 1
sergiomoreno@ub.edu

Victor Moro
Electronic and Biomedical Engineering Department
University of Barcelona
Barcelona, Spain
vmoro@ub.edu

Oscar Alonso
Electronic and Biomedical Engineering Department
University of Barcelona
Barcelona, Spain
oalonso@ub.edu

Anna Vilà
Electronic and Biomedical Engineering Department
University of Barcelona
Barcelona, Spain
anna.vila@ub.edu

***Abstract*— Uno de los mayores problemas en nuestras aulas universitarias es el absentismo. Cuando la asignatura es de carácter técnico, como el diseño de chips en los grados de Ingeniería Electrónica o similares, al alumno le impide mantener al día la asignatura, lo que de nuevo conlleva una pérdida de motivación y un mayor absentismo. Una forma de minimizar esta espiral interminable es motivar al alumno con actividades que inviten inadvertidamente a trabajar el tema. Aquí se detallan varias experiencias colaborativas y de gamificación utilizadas en la asignatura de Diseño Microelectrónico (DM) con estudiantes del grado de Ingeniería Electrónica y Telecomunicación (IET) de la Universidad de Barcelona (UB) y los resultados obtenidos tanto en la atención en clase como en el proceso de aprendizaje.**

Keywords—colaborativo, gamificación, LEGO, cartas, diseño microelectrónico

I. INTRODUCCIÓN

En general, los estudiantes motivados no tienen problemas en la mayoría de las asignaturas en la universidad. Pero hay asignaturas obligatorias que el alumno debe cursar y no todos los alumnos están suficientemente animados a ello. Estos estudiantes pierden rápidamente el interés en el curso, se desvinculan de él y, finalmente, terminan por no ir a clase [1]. Incluso en asignaturas dinámicas y con contenidos interesantes, como el diseño microelectrónico en la formación de un ingeniero electrónico, no hay nada más frustrante para un profesor que ver a sus alumnos desmotivarse y faltar a clase.

Las herramientas que el docente tiene a su disposición son diversas. Los académicos utilizan clases magistrales, laboratorios, resolución de problemas individuales o colaborativos, métodos de aprendizaje remoto, aula invertida, gamificación aplicada a la enseñanza, etc. El propósito de este artículo es describir cómo utilizamos la resolución colaborativa de problemas (RCP) y la gamificación (GA) en la asignatura de Diseño Microelectrónico (DM) del grado de Ingeniería Electrónica y Telecomunicación (IET) de la Universidad de Barcelona (UB) para fomentar la participación en clase y reforzar el aprendizaje.

En RCP hay un objetivo grupal que debe lograrse a través de la resolución de un problema. Los estudiantes están en el centro del proceso de aprendizaje y pueden enfrentar problemas que son difíciles de resolver por un solo individuo, porque están preparados de manera diferente. La RCP ha sido ampliamente utilizada en la práctica docente del pensamiento crítico. Este es un concepto importante en la educación porque los estudiantes con pensamiento crítico no solo pueden comprender el significado del conocimiento, sino también resolver de manera efectiva problemas prácticos en la vida real, incluso después de que se les olvida el conocimiento [2], [3]. De hecho, la RCP fue seleccionada por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) como el dominio innovador para el Programa para la Evaluación Internacional de Estudiantes (PISA) en la encuesta internacional de habilidades y conocimientos de los estudiantes en 2015 [4].

Por otro lado, la GA es una de las tendencias más significativas e interesantes que han llegado recientemente a la educación. Es un enfoque educativo que busca motivar a los estudiantes mediante el uso del juego en entornos de aprendizaje y está motivado por el hecho de que el juego es una práctica humana fundamental que puede provocar curiosidad y facilitar las competencias. Puede lograr aumentar la concentración, la motivación, el compromiso, la dinámica de la clase y otras experiencias positivas de los estudiantes [5].

En este trabajo se examinan en primer lugar en la Sección II los temas del curso, cómo se distribuye por actividades y el marco educativo general de IET en relación a la temática. A continuación, a través de las Secciones III y IV, se explican las experiencias con RPC y algunas de las experiencias innovadoras de la GA para esta asignatura. Finalmente, en la sección V se recogen las reflexiones sobre las experiencias y se presentan las conclusiones finales.

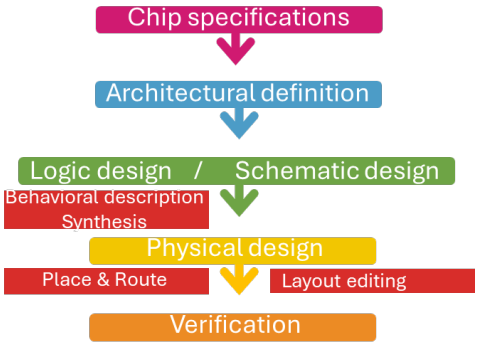


Figura 1: Proceso de diseño VLSI simplificado. La verificación por medio de simulaciones se realiza en todos los niveles.

II. La materia de diseño microelectrónico

El proceso de creación de un circuito integrado (CI) se denomina diseño VLSI (integración a muy gran escala) y consiste en integrar miles, millones o miles de millones de transistores y otros componentes en un solo chip. El proceso se compone de varias etapas que requieren especialistas en diseño para completarse. De forma muy esquemática, el proceso de diseño VLSI incluye (Fig. 1):

1. definición de los requisitos,
2. captura de diseño mediante edición esquemática o descripción en lenguajes de descripción de hardware,
3. verificación funcional,
4. síntesis para la parte digital,
5. edición de layout para las partes analógicas del diseño y place-and-route para las partes digitales,
6. y los pasos finales de verificación.

A continuación, los chips se fabrican mediante procesos de fabricación especializados y se empaquetan. La asignatura DM forma parte de la formación de VLSI en la UB y consta de los siguientes temas:

- T1: Fabricación de circuitos integrados y reglas de diseño
- T2: MOSFET, funcionamiento, modelo y componentes parásitos
- T3: Inversor CMOS: características estáticas y dinámicas
- T4: Lógica combinacional CMOS
- T5: Lógica de transistor de paso y de puerta de paso
- T6: Lógica dinámica: PE, dominó, NP, NORA
- T7: Lógica secuencial CMOS: latches y flip-flops
- T8: Estrategias de sincronización: skew del reloj, redes de distribución del reloj
- T9: Diseño estructurado: Memorias y datapaths

donde CMOS es el proceso de fabricación de circuitos integrados más utilizado. Este proceso utiliza pares complementarios y simétricos de MOSFET (transistor de efecto de campo de semiconductores de óxido metálico) de tipo p y tipo n para funciones lógicas. Estas clases magistrales se imparten con diapositivas, disponibles para el alumno de antemano.

Los temas tratados anteriormente se acompañan de clases de laboratorio, donde el alumno pone en práctica en un entorno profesional el diseño de puertas CMOS sencillas. Las clases corresponden a 6 ECTS (Sistema Europeo de Transferencia de Créditos) y se distribuyen y evalúan como un 60% de teoría y un 40% de laboratorio. Las clases en una semana se distribuyen en 3 horas y los laboratorios en 2 horas (seguidas). El número medio de alumnos matriculados en clase es de 40.

Los laboratorios se llevan a cabo en una sala bien equipada con Linux en computadoras y software Cadence y consisten en:

- L1: Configuración del entorno e introducción a las herramientas EDA (1 sesión)
- L2: Creación de una puerta CMOS (1 sesión)
- L3: Simulación del comportamiento dinámico de un inversor CMOS (2 sesiones)
- L4: Introducción al layout (1 sesión)
- L5: Diseño de un Inversor CMOS (1 sesión)
- L6: Uso de células parametrizables (1 sesión)
- L7: Diseño de una puerta NAND o NOR (2 sesiones)
- L8: Diseño de una puerta booleana compleja (2 sesiones)
- L9: Verificación de un diseño (1 sesión)
- L10: Análisis de un flip-flop D (1 sesión)

Los laboratorios se realizan de forma individual. Sin embargo, en el laboratorio 7, los estudiantes con diferentes puertas NAND o NOR están emparejados. Estos estudiantes intercambian la puerta diseñada para construir la compleja función booleana del laboratorio 8. En Lab7 los estudiantes siguen el diseño completo de una puerta NAND o NOR con 3 entradas. Es decir, edición del esquemático, simulación, edición de layout, verificación de reglas de diseño (DRC), comparación de layout y esquemático (LVS), extracción (ERC) y simulación posterior al layout. Los laboratorios 9 y 10 no son obligatorios y, por lo general, solo los realizan los estudiantes interesados en VLSI. En estos laboratorios el alumno no recibe ninguna ayuda por parte del profesor. En el Laboratorio 9, el estudiante se enfrenta a un sistema desconocido con errores que deben verificarse a nivel de esquema, banco de pruebas y layout. En el Laboratorio 10, el estudiante aborda la simulación de un flip-flop D.

El grado IET consta de 8 trimestres. Las asignaturas relacionadas con DM se presentan en la Tabla I. Las clases de 'Diseño Microelectrónico' se imparten en el 5º semestre después de que el estudiante haya cursado 'Diseño Básico Digital' en el 1º, 'Componentes y Circuitos Electrónicos' en el 2º, 'Análisis de Circuitos Electrónicos', y 'Sistemas Digitales y Arquitectura de Computadores' en el 3º, y 'Electrónica Física' en el 4º trimestre. Por lo tanto, el estudiante debe tener un buen conocimiento del análisis básico de circuitos, dispositivos electrónicos como el MOSFET y diseño digital. En los planes de estudio, el estudiante cursará dos asignaturas adicionales relacionadas con el diseño de VLSI. Por un lado, 'Diseño y Síntesis de Sistemas Digitales' relacionaba la generación

TABLA I. ASIGNATURAS RELACIONADAS CON CIRCUITOS Y VLSI EN IET

Semestre	Materia IET	Materia VLSI
1	Diseño digital básico	
2	Componentes y circuitos electrónicos	
3	Analisis de circuitos electrónicos	
3	Sistemas digitales y arquitectura de computadores	
4	Electrónica física	
5	Microcontroladores y sistemas embebidos	
5		*Diseño microelectronico*
6		Diseño y síntesis de sistemas digitales
8		Diseño analógico integrado

automática de circuitos digitales a partir de descripciones de alto nivel. Por otro lado, 'Diseño Analógico Integrado', curso introductorio a la microelectrónica analógica. Por lo tanto, DM es el punto de partida para el diseño de VLSI, donde los estudiantes aprenden sobre transistores MOS y tecnologías microelectrónicas, cómo se construyen las puertas digitales, los componentes parásitos del MOSFET, calculan los retrasos en las puertas, construyen puertas más complejas, como flip-flops, y estudian cómo los retrasos afectan la distribución de señales en el chip.

III. EXPERIENCIAS DE RESOLUCION DE PROBLEMAS COLABORATIVOS

Después de muchos años de experiencia académica se ha observado sobre el proceso de aprendizaje que:

- Algunos conceptos básicos tomados en cursos anteriores no se han aprendido. Esto provoca agobio en el alumno.
- Los estudiantes no se esfuerzan lo suficiente para aprender. Asumen que no es necesario el estudio independiente fuera de la clase.
- El alumno en general no participa en la clase, aunque el profesor haga preguntas directamente.
- Estar frente al profesor día tras día parece muy molesto, sobre todo si la participación del alumno es nula.
- Algunos estudiantes llegan continuamente tarde a clase por razones desconocidas.

Debido al contenido descriptivo y gráfico de la asignatura, las clases magistrales se imparten mediante el uso de diapositivas electrónicas, que se entregan a los estudiantes con antelación. Vienen acompañadas de un conjunto de problemas resueltos. En general, para la mayoría de los estudiantes el laboratorio de DM es bastante divertido y motivador. Sin embargo, hay algunos problemas relacionados con el ausentismo en las clases que impiden progresar a ciertos alumnos como se esperaría.

Para que las lecciones sean más participativas, cambiamos la metodología docente del curso. La idea principal era reducir el contenido teórico al mínimo, dedicándole solo 1 de las 3 horas disponibles. Las 2 horas restantes se centran en RPC. El

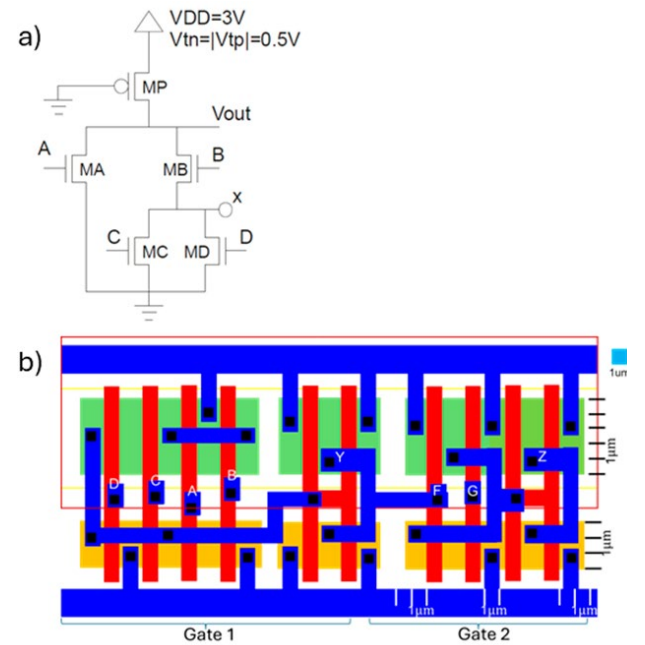


Figura 2: (a) Esquema de una puerta pseudo-NMOS utilizada para RPC en el curso. b) Diseño para fomentar el debate en torno a los parámetros en las implementaciones de CMOS.

profesor presenta un problema de dificultad creciente según el progreso del curso, que los alumnos deben resolver. Los estudiantes se agrupan en grupos de 3 a 5 personas y discuten el problema planteado en clase. El profesor interviene si los grupos se quedan atascados en algún momento. Los problemas se seleccionan para animar las discusiones en el grupo. Por ejemplo, en la Fig. 2a, se muestra un esquema de la función

$$f(A,B,C,D) = \overline{A + B(C + D)} \quad (1)$$

implementada en lógica pseudo-NMOS. Los estudiantes de ese momento aún no han visto la lógica pseudo-NMOS, pero son conscientes de todos los elementos que intervienen en los cálculos de retardo y cómo se colocan los transistores para realizar la función. Así, el estudiante debe ser capaz de darse cuenta de que, por ejemplo, hay varias transiciones posibles de un nivel de salida alto a uno bajo, u ordenarlas del retardo más alto al más bajo. Por lo tanto, las preguntas que se formulan incluyen: *¿Cuál es la transición más lenta en la salida de nivel alto a bajo?*, *¿Cuál es la transición más rápida de alto a bajo?* o *Calcula el retardo para la transición cuando ABCD=0111 si* R_{nMOS}*=500Ω,* C_{out}*=50fF y* C_x*=10fF*, o en un momento más avanzado del curso, *Dibuja el diagrama de sticks de esa puerta*. En otro ejemplo presentado en la Fig. 2b, se utiliza un diseño de una función booleana implementada por cuatro puertas para fomentar la discusión en torno a los componentes parásitos de los MOSFET y el retardo desde un nivel físico. En este caso, el estudiante debe discutir las capacitancias parásitas involucradas en las cálculos de retardo, su dependencia de los parámetros de diseño y los posibles modelos de retardo vistos en las clases teóricas.

IV. EXPERIENCIAS DE GAMIFICACIÓN

La RPC mejoró significativamente la experiencia de enseñanza y aprendizaje. Sin embargo, algunos aspectos necesitan un mayor refuerzo. Por ejemplo, la mayoría de los estudiantes confunden el orden de las capas en el proceso

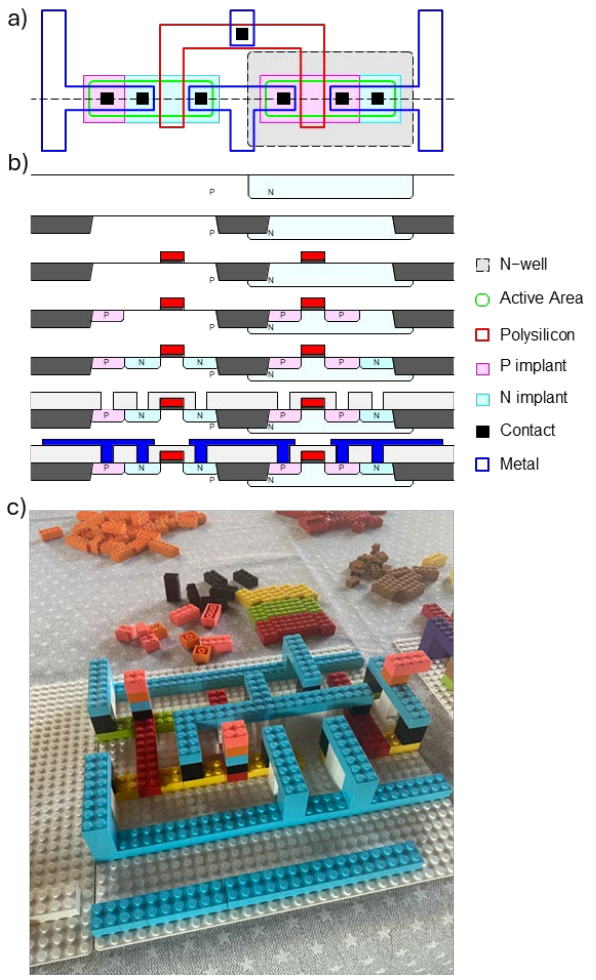


Figura 3: (a) Máscaras utilizadas para fabricar un inversor CMOS. b) Etapas de procesado simplificadas correspondientes (de arriba a abajo). (c) Puerta OR2 hecha con piezas de LEGO.

microelectrónico de un circuito integrado (Fig. 3), las etapas necesarias para la fabricación de chips o las capas necesarias para producir un transistor. Es un contenido que se imparte en las 2-3 horas iniciales del curso de DM, pero el estudiante necesita utilizar dicha información a lo largo de todo el curso, especialmente en el laboratorio. Debido a la importancia de estos conceptos, optamos por diseñar dos juegos que fortalecen el procesado CMOS y las reglas de diseño, que se describen a continuación.

A. Un sencillo juego de construcción

La fabricación de un microchip es similar a la construcción de un edificio. Por lo general, se realizan en una oblea de silicio. Sobre él se depositan capas de materiales semiconductores o aislantes. Los elementos del chip son sándwiches de estos materiales con dimensiones micro o nanométricas. Para lograr estos patrones, los materiales se protegen de ataques químicos o físicos a través de procesos fotolitográficos. Todos estos procesos deben llevarse a cabo en ambientes limpios, libres de partículas en el aire y con equipos especializados.

Casi todos hemos jugado con piezas de LEGO o juegos similares para hacer construcciones. Propusimos usar LEGO en clase para mostrar cómo se construyen las diferentes puertas, mostrando las diferentes capas (o procesos) utilizados. Los ladrillos coloreados se asocian a una capa en el proceso. Un ejemplo se puede ver en la Fig. 3. Allí, por ejemplo, el polisilicio corresponde a los ladrillos rojos. Los estudiantes agrupados pueden simplemente jugar para ser los primeros en identificar la puerta implementada por el profesor u otro grupo, pueden jugar para ser los primeros en construir una puerta fija, etc. Aspectos importantes de este juego constructivo son que los estudiantes tienen que discutir y ponerse de acuerdo sobre aspectos como el orden de las diferentes capas o la morfología utilizada para construir la puerta, precisamente la motivación para esta actividad de gamificación. Al mismo tiempo, pueden competir y disfrutar. Este juego, cuando se hace en colaboración, tiene en cuenta las diferentes personalidades de los jugadores [6], es decir, asesinos, triunfadores, socializadores o exploradores.

B. Un juego de cartas para aprender procesado de chips

Al aplicar la gamificación a la enseñanza, se pueden imitar juegos más sofisticados. Es conocido que la narrativa del juego es una parte muy importante para hacerlo atractivo para los alumnos [7]. Para ser atractiva, la narración debe girar en torno a tres elementos, es decir, el personaje o personajes, un conflicto y un objetivo final. El juego que aquí se propone se llama 'Conway' en honor a una mujer ingeniera que revolucionó la industria de los semiconductores con una nueva metodología en los inicios de la microelectrónica [8]. La narrativa utilizada en nuestro juego fue,

> *"Las foundries de todo el mundo ven peligrar la fabricación global de chips. El mundo se quedará sin PCs, sin teléfonos móviles, sin IA, porque una empresa malévola (CONWAY) quiere aplicar reglas de diseño incorrectas para evitar que se fabriquen. Vuestro objetivo será trabajar en grupos de 4-5 y evitarlo a toda costa luchando con (combinando) las capas del proceso o los procesos tecnológicos".*

La mecánica del juego es que los grupos jueguen por turnos con 7 cartas cada uno. Las cartas se presentan en la Fig. 4. Hay cartas para 'Objetos' (Fig. 4b), 'Capas' que deben combinarse para conseguir un 'Objeto' (Fig. 4c)), 'Procesos' que combinados se utilizan para obtener un 'Objeto' (Fig. 4d), y 'Reglas' que el diseñador debe seguir para fabricar el 'Objeto' (Fig. 4e). El grupo activo toma una carta del mazo, mientras que deja otra. Con las mano de cartas, los grupos tienen que lograr uno de los 'Objetos' combinando las 'Capas' o 'Procesos' requeridos. El grupo descarta el conjunto de cartas para conseguir los puntos correspondientes. Al mismo tiempo, un grupo atacante puede atacar al grupo que está descartando cartas con el conjunto de cartas de 'Reglas' asociadas a ese 'Objeto'. Se consiguen de 2 a 4 puntos cada vez que se consigue un 'Objeto' completo. El número de puntos depende de la complejidad del 'Objeto'. Además, se pasan los puntos de un grupo atacado a un grupo atacante si son atacados con 'Reglas'. El juego termina cuando un grupo logra 10 puntos o más.

En este juego, el grupo tiene que decidir qué estrategia quiere seguir, es decir, atacar o construir. En cada situación, debe saber o discutir qué procesos intervienen en la fabricación, qué capas deben tenerse en cuenta en el diseño y cuáles son las reglas que rigen esas capas. Al igual que en el caso anterior, este juego también tiene en cuenta la personalidad de cada jugador.

V. Discusión y Conclusiones

En cuanto a RPC, el estudiante debe adquirir los conocimientos necesarios para resolver problemas en las

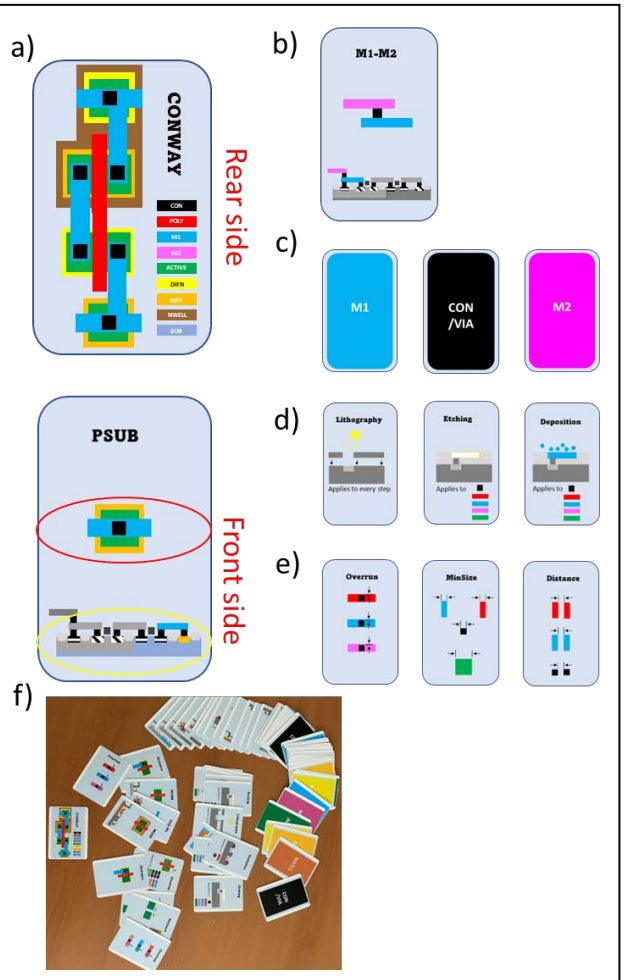


Figura 4: Juego de cartas para enseñar procesos VLSI. a) Vista trasera y frontal de las fichas de «Objetos». El círculo rojo marca la vista superior del elemento logrado. El círculo amarillo indica la sección transversal de la puerta con los elementos conseguidos marcados en color. b) Un ejemplo de objeto. En este caso se trata de una conexión de Metal1 a Metal 2 a través de una vía. c) «Capas» necesarias para obtener b). d) «Procesos» necesarios para obtener b). e) «Reglas» que deben obedecerse en el apartado b). f) Juego de cartas.

clases teóricas. Luego, los miembros del grupo conversan, interpretan, se preguntan, debaten, negocian y llegan a un consenso sobre el problema. En general, el trabajo colaborativo permitió a los estudiantes mejorar la interpretación de la información inicial sobre el problema, fueron capaces de encontrar nueva información no tratada en clase, comprendieron mejor el problema, planificaron una solución e identificaron una posible respuesta en la mayoría de los casos. Debido a que el nivel de los estudiantes es diverso, los avanzados ayudan a los que tienen déficits en comprender los ejercicios y a lograr la confianza suficiente para alcanzar los objetivos del curso. Por lo tanto, las diferencias entre los estudiantes de un grupo también se minimizaron. Al final, la mayoría de los estudiantes se vuelven más competentes.

Por otro lado, los juegos de preguntas cortas, los juegos de asociación, etc., están diseñados para fortalecer el conocimiento a través de algún tipo de cuestionario. Los juegos aquí diseñados persiguen el concepto de aprender haciendo. El juego de construcción es muy fácil de implementar y los estudiantes pueden ver de manera simplificada cómo se hacen los circuitos integrados. El juego de cartas es mucho más complejo de implementar. En éste, el diseño de la tarjeta tiene un dibujo que indica los 'Procesos', 'Capas' y 'Reglas' relacionados (Fig. 4a), lo que ayuda al estudiante a comprender y memorizar los procesos y materiales involucrados en la producción de un dispositivo.

Por otra parte, varios autores han informado de que los juegos tienen que adaptarse al individuo por diversas razones, entre ellas la personalidad, el comportamiento y las necesidades del alumno, así como su interacción con las personas, los ordenadores y la forma en que el alumno organiza su trabajo[1]. El juego de construcción se puede adaptar a cualquier grupo de estudiantes seleccionando la implementación de puerta adecuada.

Al mismo tiempo, también es bueno que el juego se adapte al nivel de estudios. El juego de la construcción puede parecer demasiado simple para un estudiante universitario, a pesar de que logra los objetivos. Para las carreras universitarias, el juego de cartas propuesto es más apropiado. El alumno está acostumbrado a jugar a juegos similares como el famoso VIRUS. Sin embargo, el juego de cartas comentado fue mucho más complejo de poner en práctica en el aula. Con el apretado horario habitual de un curso, es difícil encontrar tiempo para dedicar una o dos clases a jugar con el fin de que el alumno aprenda un concepto único.

Las experiencias de RPC y GA se han realizado los dos últimos cursos (2022 y 2023). Los resultados en términos de participación de los estudiantes son espectaculares. Anteriormente, se había producido una situación en la que solo el 15% de los alumnos asistían a clase. Ahora el 85% asistió, siendo participativo y divirtiéndose en el proceso. Las actividades de gamificación han sido valoradas positivamente en el 100% de los casos. Además, estas estrategias promueven el aprendizaje entre iguales y motivan a los estudiantes a ser creadores de su propio conocimiento.

A pesar de que se requiere un tiempo considerable para jugar un juego en clase, en comparación con la clase magistral tradicional, se observó que el beneficio a lo largo de todo el semestre fue realmente bueno porque los estudiantes recordaron mejor los temas tratados. Esto se debe en parte a la mejora de la concentración y el compromiso de los estudiantes al jugar. Pero también se debe al trabajo colaborativo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a los Drs. Elena Maestre y Daniel Hurtado por introducirnos en la gamificación en clase a través del curso 'Diseña tu propia clase gamificada' realizado en la UB.

REFERENCIAS

[1] W. Oliveira *et al.*, "Tailored gamification in education: A literature review and future agenda," *Educ Inf Technol (Dordr)*, vol. 28, no. 1, pp. 373–406, Jan. 2023, doi: 10.1007/s10639-022-11122-4.

[2] M. Y. C. A. Kek and H. Huijser, "The power of problem-based learning in developing critical thinking skills: preparing students for tomorrow's digital futures in today's classrooms," Higher Education Research & Development, vol. 30, no. 3, pp. 329–341, Jun. 2011, doi: 10.1080/07294360.2010.501074.

[3] E. Xu, W. Wang, and Q. Wang, "The effectiveness of collaborative problem solving in promoting students' critical thinking: A meta-analysis based on empirical literature," Humanit Soc Sci Commun, vol. 10, no. 1, p. 16, Jan. 2023, doi: 10.1057/s41599-023-01508-1.

[4] A. C. Graesser, S. Greiff, M. Stadler, and K. T. Shubeck, "Collaboration in the 21st century: The theory, assessment, and teaching of collaborative problem solving," Comput Human Behav, vol. 104, p. 106134, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.chb.2019.09.010.

[5] A. Christopoulos and S. Mystakidis, “Gamification in Education,” Encyclopedia, vol. 3, no. 4, pp. 1223–1243, Oct. 2023, doi: 10.3390/encyclopedia3040089.
[6] R. Bartle, “HEARTS, CLUBS, DIAMONDS, SPADES: PLAYERS WHO SUIT MUDS,” Journal of MUD Research, vol. 1, no. 1, 1996.
[7] H. Y. Jarrah et al., “The impact of storytelling and narrative variables on skill acquisition in gamified learning,” *Int. J. of Data and Net. Sci.*, vol. 8, no. 2, pp. 1161–1168, 2024, doi: 10.5267/j.ijdns.2023.11.018.
[8] C. Mead and L. Conway, Introduction to VLSI systems. Addison-Wesley, 1980.

Evaluación mediante ejercicios cortos en el laboratorio de Arquitectura de Ordenadores

Martín Llamas-Nistal
atlanTTic Research Center
Universidade de Vigo
Vigo, España
martin@det.uvigo.es

Martín Liz-Domínguez
atlanTTic Research Center
Universidade de Vigo
Vigo, España
mliz@det.uvigo.es

Juan M. Santos-Gago
atlanTTic Research Center
Universidade de Vigo
Vigo, España
jsgago@det.uvigo.es

Manuel J. Fernández- Iglesias
atlanTTic Research Center
Universidade de Vigo
Vigo, España
manolo@det.uvigo.es

Luis E. Anido-Rifón
atlanTTic Research Center
Universidade de Vigo
Vigo, España
lanido@det.uvigo.es

Moisés R. Pacheco-Lorenzo
atlanTTic Research Center
Universidade de Vigo
Vigo, España
moises.pacheco@det.uvigo.es

***Abstract*— En este artículo se presenta un nuevo enfoque de evaluación para el laboratorio de la asignatura Arquitectura de Ordenadores (AO) de un grado en Tecnologías de Telecomunicación, que puede ser aplicable a otro tipo de laboratorios. La evaluación mediante ejercicios cortos en cada una de las sesiones de prácticas trata de complementar la evaluación sumativa clásica de este laboratorio que se viene realizando, bien mediante un examen final o bien mediante dos exámenes parciales. Este tipo de evaluación introduce un elemento de evaluación formativa que facilita al alumnado conocer el grado de comprensión de las prácticas y en último caso conseguir los objetivos de aprendizaje. Los resultados de aplicación de este nuevo enfoque al curso 2022/23 son positivos, y nos conduce a seguir profundizando en el mismo en cursos sucesivos.**

Keywords— Computer architecture, assessment, quizzes, laboratory.

I. Introducción

La asignatura de Arquitectura de Ordenadores (AO) tiene como objetivo proporcionar los conocimientos necesarios para entender el funcionamiento del ordenador en el nivel de máquina convencional. Este objetivo de AO es común en varias ingenierías, y sirve de enlace con otras asignaturas del ámbito de la electrónica, como pueden ser las de Electrónica digital y Sistemas Digitales.

Desde hace varios cursos, nuestro departamento está inmerso en un proceso de mejora continua con el propósito de conseguir la mejor docencia para nuestro alumnado. Fruto de esta mejora continua hemos cambiado hace algunos años la parte práctica de AO [1] para pasar de hacer las prácticas en un procesador pedagógico a un procesador real, en concreto un procesador con arquitectura ARM/Thumb [2]. Para mantener el enfoque pedagógico, utilizamos también el simulador qtARMSim [3] y manuales prácticos [4, 5], distribuidos bajo licencia CC-BY-SA y CC-BY-NC-ND respectivamente.

Actualmente estamos trabajando en una actualización del entorno de prácticas, pasando a un nuevo modelo basado en un ordenador construido a partir de sistema Rapsberry Pi, donde el estudiantado pueda interaccionar con cada uno de los elementos de un ordenador típico, pero abstrayendo su funcionamiento interno [6]. Este sistema podría también servir de base para otras asignaturas centradas en otros niveles conceptuales, consiguiendo así un doble objetivo: por una parte, actualizar la enseñanza de AO, y por otra, que este laboratorio fuese un elemento común a varias materias, de distintas áreas, facilitando el aprendizaje al alumnado.

Otro de los objetivos en este nuevo enfoque es la mejora de la parte de evaluación, introduciendo la realización de ejercicios cortos en las sesiones de prácticas. La evaluación de la parte práctica se basa tradicionalmente en un examen final o en dos exámenes parciales, uno a mitad del cuatrimestre y otro al final de este. El pasado curso 2022/23 introdujimos una opción de evaluación formativa mediante la realización de pequeños ejercicios cortos de selección simple sobre alguno de los aspectos tratados en la correspondiente sesión de prácticas. Aunque en principio estos ejercicios se han enfocado como una evaluación formativa, finalmente tienen cierta componente de evaluación sumativa, pues contribuyen con un punto adicional al máximo que se podría obtener originalmente en la parte práctica de la asignatura.

El presente artículo tiene como objetivo presentar esta propuesta de evaluación formativa y los primeros resultados obtenidos durante el pasado curso 2022/23. En los párrafos siguientes ofrecemos una breve descripción de la asignatura AO. A continuación, en la sección III, se describe nuestra propuesta de evaluación formativa mediante la realización de ejercicios cortos, y se muestran en la sección IV los primeros resultados de la aplicación de esta propuesta en el curso 2022/23. Finalmente, en la sección V, se presentan las conclusiones y líneas de trabajo futuro.

II. Descripción de la asignatura

La evolución de la asignatura de Arquitectura de Ordenadores (AO), impartida actualmente en el grado de Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación de la Universidade de Vigo con el nombre de Informática: Arquitectura de Ordenadores [7], ha sufrido una evolución importante durante los últimos años [1, 6]. Se trata de una asignatura de 6 créditos ECTS, donde 3 se basan en sesiones de aula y otros 3 en sesiones de laboratorio. De acuerdo con la guía docente de la asignatura del curso 2022/23 [7] objeto de la experiencia descrita en este artículo, la nota final de la asignatura es la nota media de las dos partes -aula y

This paper has been partially funded by Xunta de Galicia (Galicia's Singular Research Center, accreditation 2019-2022), the European Union (European Regional Development Fund - ERDF), and the Galician Regional Government under project ED431B 2023/37.

laboratorio- siendo necesario obtener al menos una puntuación de 3,5 en cada parte para aprobar la asignatura. De no darse esta condición, la nota final sería la nota media de las dos partes, excepto que ésta fuese mayor de 3,5 en cuyo caso la nota final sería 3,5.

En este artículo nos centraremos en la parte práctica que se desarrolla en el laboratorio, que pasamos a describir a continuación. Esta parte consiste en 10 sesiones prácticas más una sesión práctica 0 de presentación de la asignatura y del entorno del laboratorio. Las sesiones prácticas se realizan en grupos de un máximo de unas 24 personas, compartiendo todos los grupos el mismo laboratorio en distintos horarios, siendo 8 grupos los correspondientes al curso 2022/23.

Esta parte práctica puede ser evaluada por evaluación continua (EC) o por evaluación final (EF). La EC consiste en la realización de dos exámenes parciales (EP1 y EP2), donde el primero (EP1) se realiza un día por la tarde durante el horario lectivo, a mitad del cuatrimestre, en uno o dos turnos, dependiendo del alumnado que se presente al examen. El segundo examen (EP2) se realiza el mismo día que el examen de la evaluación final (EF).

El alumnado tiene la opción de elegir EC (presentándose al EP1) o EF, siendo ambas opciones excluyentes. EP1 comprende los temas tratados en las primeras 5 sesiones prácticas y EP2 los temas tratados en las últimas 5. La nota de práctica es el 40% de la nota obtenida en EP1 más el 60% de la nota obtenida en EP2, lo que refleja el mayor grado de dificultad de la segunda parte.

Con la introducción de la evaluación formativa mediante los ejercicios cortos, se añadió un elemento de evaluación sumativa, sumando un punto a mayores como máximo en cada examen de evaluación continua (EP1 y EP2). El alumnado que no obtuviese la nota mínima de 3,5 en la parte práctica o que obteniéndola desee mejorarla, puede presentarse al examen final, conservando el punto a mayores de los ejercicios cortos. El examen final tiene una estructura similar a los exámenes EP1 y EP2, sólo que el examen se realiza sobre todo el temario de la parte práctica de la asignatura.

Los exámenes parciales EP1 y EP2 constaban cada uno de ellos de 3 partes, consistiendo cada una de ellas en el desarrollo de un pequeño programa en el lenguaje ensamblador de la arquitectura ARM/Thumb, que el alumnado tiene que realizar en el laboratorio, y donde el profesorado comprueba que está correcto mediante el paso de una serie de pruebas. La evaluación de cada parte es de tipo todo o nada, es decir, o pasa las pruebas o no las pasa. En consecuencia, describiremos los resultados de estos dos exámenes mediante las puntuaciones 0/3, 1/3, 2/3 y 3/3, indicando así las partes que resolvieron satisfactoriamente.

Hay que hacer constar que la evaluación continua es el tipo de evaluación preferida por el alumnado. De los 198 estudiantes matriculados en la asignatura, sólo 2 se presentaron a la evaluación final, 104 a la evaluación continua y 92 no se presentaron a ninguna evaluación. De los 2 estudiantes presentados a evaluación final, uno aprobó y otro suspendió.

III. Descripción de los ejercicios cortos

Tal como se comentó anteriormente, los alumnos realizan durante el cuatrimestre 10 prácticas de laboratorio de 2 horas cada una. Cada práctica, en la que el alumno resuelve ejercicios de programación en ensamblador ARM/Thumb, aborda una temática concreta, desde la programación de bucles simples en la primera práctica, hasta la programación de subrutinas reentrantes con paso de parámetros por pila en la última.

Las prácticas se agrupan en dos bloques de 5 prácticas (en el primer bloque se utiliza una parte básica del repertorio de instrucciones ARM/Thumb y en el segundo el repertorio completo), tras las cuales realizan un examen práctico de evaluación sumativa. Más allá de estos exámenes prácticos, los alumnos se enfrentan al comenzar cada sesión de laboratorio (salvo en la primera sesión de cada bloque) a un ejercicio corto de evaluación formativa. El objetivo de estos ejercicios cortos no es tanto calificar al alumno (evaluación sumativa) sino fomentar el estudio continuo y la auto valoración de su evolución en la asignatura. El ejercicio corto al que se enfrenta el alumnado en una sesión semanal está relacionado con la temática de la práctica realizada la semana anterior. Así, este tipo de ejercicios obligan de algún modo al estudiante a repasar el trabajo realizado previamente.

Los ejercicios cortos realizados a principio de cada sesión de laboratorio se llevan a cabo mediante la plataforma BeA [8,9]. Esta plataforma proporciona funcionalidades que permiten definir *quizzes* de manera rápida y sencilla (ver Fig. 1). El formato elegido de ejercicio corto es el de pregunta de elección simple, en la que se muestran 4 posibles respuestas al alumno, y este debe escoger la única correcta.

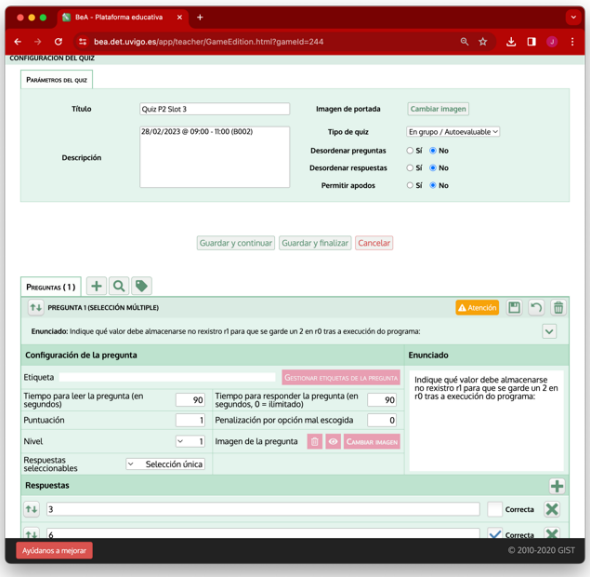


Fig. 1: Funcionalidad de BeA para definir *quizzes*.

Al inicio de una sesión de prácticas, el profesor activa el ejercicio en BeA correspondiente a la sesión en curso, lo que genera un código que el alumno podrá utilizar para acceder al mismo. El alumno hace uso, o bien de un navegador web instalado en el ordenador que se le ha asignado en el laboratorio, o bien, más comúnmente y por simplicidad, de su propio smartphone, para "incorporarse" al ejercicio.

El profesor puede comprobar en su ordenador cómo los alumnos se van incorporando. Una vez incorporados todos los alumnos del aula, el profesor activa la proyección del enunciado del ejercicio en la pantalla del laboratorio (Fig. 2), que se mantendrá visible durante un tiempo predeterminado (la mayoría de los ejercicios están configurados de modo que el enunciado se muestra durante 2 minutos).

El ejercicio corto que aparece a modo de ejemplo en la Fig. 2 se corresponde con la evaluación formativa realizada en la sesión 7 del curso, con una pregunta relacionada con los ejercicios efectuados en la práctica 6, en la que se introduce el concepto de pila y los registros e instrucciones relacionadas con su manejo.

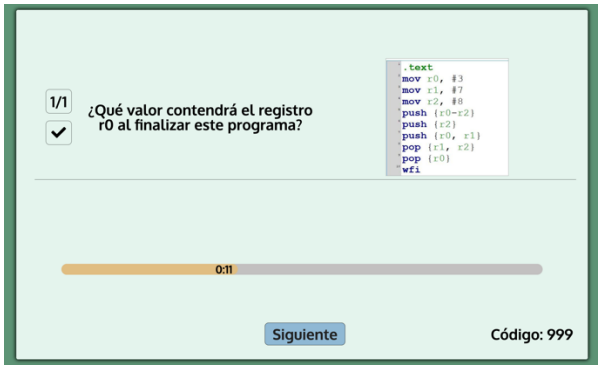


Fig. 2: Visualización del enunciado de un ejercicio corto.

Transcurrido el tiempo de visualización del enunciado del ejercicio corto, automáticamente se muestran en la pantalla de proyección las posibles respuestas (Fig. 3). El alumno tiene un tiempo predeterminado, típicamente 90 segundos (aunque esto depende de la dificultad del ejercicio), para escoger la respuesta que considera correcta a través de su dispositivo de acceso (Fig. 4).

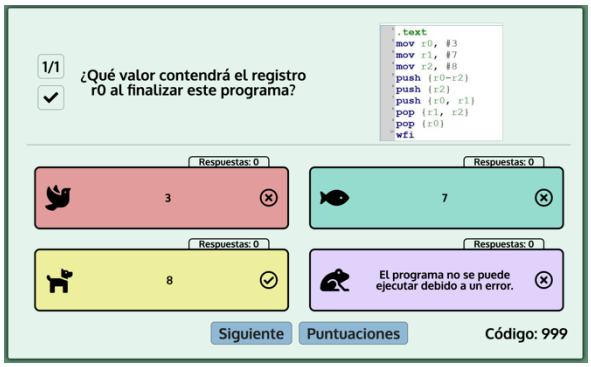


Fig. 3: Visualización de las posibles respuestas.

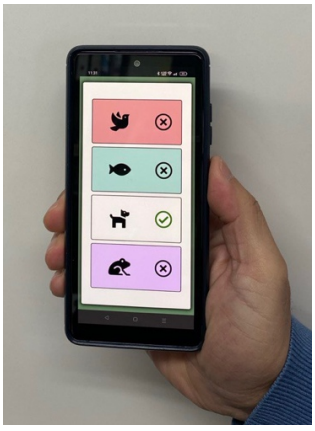


Fig. 4: App móvil para el envío de la respuesta considerada correcta.

Una vez transcurrido el tiempo disponible para dar una respuesta, el alumno recibe información sobre la respuesta correcta.

Cada grupo de laboratorio se enfrenta a un ejercicio de dificultad y temática semejante, aunque diferente en cuanto a su respuesta válida.

IV. Resultados

La tabla I muestra el rendimiento del alumnado en el primer examen EP1 en función del número de ejercicios cortos realizados. Todos los alumnos que asisten a las sesiones prácticas realizan los ejercicios cortos, por lo que los ejercicios realizados son también un indicador de la asistencia a las sesiones de prácticas, al menos a las cuatro últimas de las cinco de las que consta esta parte. Se puede observar como una mayoría del alumnado que hizo los cuatro ejercicios cortos (73,47%, 36 sobre un total de 49) aprobó este primer examen EP1 (obtuvo una nota de 2/3 ó 3/3). Si se tienen en cuenta sólo a los que se presentaron (44), el porcentaje sube al 81,82%.

Estas cifras ponen de manifiesto la influencia positiva que tiene la realización de todos los ejercicios cortos en esta primera parte de las prácticas, por lo que ello conlleva de asistencia a las sesiones prácticas y de evaluación formativa.

TABLA I. Rendimiento en EP1 en Función del Número de Ejercicios Cortos Realizados

Ejercicios Realizados (EP1)	**Puntuación en EP1**					**Total Ejercicios Realizados (EP1)**
	NP	***0/3***	***1/3***	***2/3***	***3/3***	
0/4	62	3	4	4	2	75
1/4	8	3	0	3	3	17
2/4	10	3	5	1	1	20
3/4	7	7	4	8	9	35
4/4	5	4	4	7	29	49
Total (EP1)	92	20	17	23	44	196

Si tenemos en cuenta no sólo la realización de los ejercicios sino también sus resultados, la tabla II muestra el rendimiento en EP1 de acuerdo con el número de ejercicios cortos resueltos satisfactoriamente. Se puede observar cómo dos tercios (66,66 %) del alumnado que ha resuelto satisfactoriamente al menos la mitad (2) de los cuatro ejercicios cortos ha superado satisfactoriamente el examen EP1, obteniendo una puntuación de 2/3 o 3/3.

TABLA II. Rendimiento en EP1 en Función del Número de Ejercicios Cortos Resueltos Correctamente

Ejercicios Correctos (EP1)	**Puntuación en EP1**					**Total Ejercicios Correctos (EP1)**
	NP	***0/3***	***1/3***	***2/3***	***3/3***	
0/4	15	4	2	2	3	26
1/4	7	7	7	4	9	34
2/4	6	4	2	8	16	36
3/4	2	2	2	4	10	20
4/4	0	1	0	0	4	5
Total (EP1)	92	20	17	23	44	121

La tabla III es similar a la tabla I, sólo que en este caso se muestra el rendimiento en EP2 en función del número de ejercicios cortos realizados. Obsérvese que, en este caso, el alumnado que se puede presentar a este examen EP2 es aquel que se haya presentado a EP1, y que por lo tanto esté en evaluación continua. El total de alumnos en este caso es de 104, ya que 92 estudiantes no se presentaron a EP1.

Si nos fijamos en los mismos parámetros que en la tabla I vemos que un 47,22% del alumnado que hizo los 4 ejercicios de esta parte (17 sobre un total de 36), aprobó este segundo examen EP2, y teniendo en cuenta sólo a los presentados (33), este porcentaje sube al 52,52%. Las cifras son menores que en el examen EP1 debido entre otras cosas a que el alumnado que ha obtenido una buena nota ya no tiene la necesidad de obtener también una buena nota en este segundo examen EP2 para aprobar esta parte de práctica, debido a la ponderación 40%-60% de los exámenes EP1. Por ejemplo, si un estudiante ha obtenido un 3/3 en EP1 ya tiene un 4 sobre 10, más un punto extra a mayores de los ejercicios cortos, en total un 5, y por lo tanto ya tiene esta parte aprobada.

La tabla IV es similar a la tabla II, sólo que en este caso está referida al rendimiento en EP2. Se puede observar cómo en este caso la proporción del alumnado que ha resuelto satisfactoriamente al menos la mitad (2) de los cuatro ejercicios cortos superando satisfactoriamente el examen EP2, se ha reducido prácticamente a la mitad (47,5%), por la misma razón expuesta para la tabla III.

La tabla V muestra los resultados de EP2 en función de los de EP1, donde se puede apreciar esta bajada de rendimiento en el EP2 debido a los buenos resultados en el EP1.

TABLA III. RENDIMIENTO EN EP2 EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE EJERCICIOS CORTOS REALIZADOS

Ejercicios Realizados (EP2)	**Puntuación en EP2**					**Total Ejercicios Realizados (EP2)**
	NP	***0/3***	***1/3***	***2/3***	***3/3***	
0/4	25	8	4	2	0	39
1/4	1	2	5	1	1	10
2/4	4	4	3	1	1	13
3/4	1	2	0	3	0	6
4/4	3	4	12	9	8	36
Total (EP2)	34	20	24	16	10	104

TABLA IV. RENDIMIENTO EN EP2 EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE EJERCICIOS CORTOS RESUELTOS CORRECTAMENTE

Ejercicios Correctos (EP2)	**Puntuación en EP2**					**Total Ejercicios Correctos (EP2)**
	NP	***0/3***	***1/3***	***2/3***	***3/3***	
0/4	0	4	2	0	1	7
1/4	4	3	7	4	0	18
2/4	3	1	3	3	4	14
3/4	1	4	6	3	3	17
4/4	1	0	2	4	2	9
Total (EP2)	9	12	20	14	10	65

TABLA V. RENDIMIENTO EN EP2 EN FUNCIÓN DEL RENDIMIENTO EN EP1

Puntuación en EP1	**Puntuación en EP2**					**Total (EP1)**
	NP	***0/3***	***1/3***	***2/3***	***3/3***	
0/3	17	2	1	0	0	20
1/3	7	7	3	0	0	17
2/3	4	9	7	2	1	23
3/3	6	2	13	14	9	44
Total (EP2)	34	20	24	16	10	104

Finalmente, las tablas VI y VII muestran los resultados finales obtenidos en la convocatoria de mayo en función del número de ejercicios cortos realizados y del resultado de estos, respectivamente. Se puede apreciar en la tabla VI que en general a mayor número de ejercicios cortos realizados mayor número de aprobados. En concreto, si tenemos en cuenta al alumnado que ha realizado al menos 6 de los 8 ejercicios cortos (50 alumnos), podemos observar que el 70% (35) aprobó y el 30% (15) suspendió. Estas cifras contrastan con el alumnado que hizo menos de 6 ejercicios cortos (82 alumnos), En este caso, sólo un 13,41% (11) aprobó frente al 86,59% (71) que suspendió. Podemos ver también que de los 17 estudiantes que no hicieron ningún ejercicio corto (es decir, que no asistieron a las sesiones prácticas) sólo 2 aprobaron (11,76%).

Si tenemos en cuenta los resultados de los ejercicios cortos (tabla VII), podemos apreciar tres grupos: el alumnado que hizo a lo sumo 2 ejercicios bien, con un índice de aprobados en el mejor de los casos (2 ejercicios bien) de un tercio, y destacando sólo 1 aprobado entre los que 25 que hicieron bien sólo 1 ejercicio; el alumnado que hizo bien entre 3 y 5 ejercicios, con índices de aprobados de cerca de la mitad; y finalmente el alumnado que hizo bien 6 ó 7 ejercicios, ya que nadie hizo bien los 8 ejercicios, en donde sólo 1 de los 18 estudiantes suspendió.

TABLA VI. RESULTADO EN LA CONVOCATORIA DE MAYO EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE EJERCICIOS CORTOS REALIZADOS

Ejercicios Realizados (Curso)	**Resultado en mayo**		**Total Ejercicios Realizados (Curso)**
	Suspenso	***Aprobado***	
0/8	15	2	17
1/8	10	2	12
2/8	11	0	11
3/8	14	2	16
4/8	14	4	18
5/8	7	1	8
6/8	4	7	11
7/8	4	3	7
8/8	7	25	32
Total (Mayo)	86	46	132

TABLA VII. RESULTADO EN LA CONVOCATORIA DE MAYO EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE EJERCICIOS CORTOS RESUELTOS CORRECTAMENTE

Ejercicios Correctos (Curso)	Resultado en mayo		Total Ejercicios Correctos (Curso)
	Suspenso	*Aprobado*	
0/8	10	1	11
1/8	24	1	25
2/8	14	7	21
3/8	9	8	17
4/8	6	5	11
5/8	7	5	12
6/8	0	13	13
7/8	1	4	5
8/8	0	0	0
Total (Mayo)	71	44	115

Estos resultados nos indican que la evaluación formativa llevada a cabo durante este curso 2022/23 es realmente beneficiosa para el alumnado ya que, en términos generales, a mayor participación mejores resultados académicos se obtienen, y a mayor rendimiento en la realización de estos, se incrementa notablemente el éxito académico.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este artículo hemos presentado una propuesta de evaluación formativa en la parte práctica de la asignatura de AO y los primeros resultados obtenidos durante el pasado curso 2022/23, dentro de una reestructuración de la parte práctica de la asignatura descrita en [6]. La evaluación formativa, con un pequeño componente de evaluación sumativa, consiste en la realización de ejercicios cortos en las sesiones prácticas, basados en las sesiones anteriores.

Los primeros resultados obtenidos son prometedores, ya que indican que la mera participación en la evaluación formativa incide positivamente en los resultados finales obtenidos por el alumnado. Y si además se obtienen buenos resultados en estos ejercicios cortos, la incidencia positiva es mayor.

Sin embargo, este curso 2022/23 ha sido el primer curso en poner en práctica esta propuesta de evaluación formativa, por lo que tenemos que esperar a tener más datos para poder ratificar estas primeras impresiones y para poder refinar el método y estudiar alguna otra aplicación, como puede ser un sistema de alerta temprana que detecte al estudiantado en riesgo de no superar esta parte práctica y aporte soluciones para reconducir estas situaciones. Por otra parte, la propia estructura de la evaluación continua debería tenerse en cuenta a la hora de diseñar los instrumentos de evaluación formativa, para con ello obtener mejor aprovechamiento de esta última.

Finalmente, dados los primeros resultados, consideramos que puede resultar oportuno aplicar este método de evaluación formativa a otros laboratorios del grado, con el objetivo de estudiar si los beneficios preliminares observados en este primer análisis se repiten en otras asignaturas, y de plantear algún estudio comparativo sobre el impacto de este modelo de evaluación formativa en función del tipo o de los contenidos de las asignaturas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado dentro del grupo GIDEITT del programa GID (Grupos de Innovación Docente) de la Universidad de Vigo, España.

REFERENCIAS

[1] M. Llamas-Nistal, F. A. Mikic-Fonte, J. M. Santos-Gago, and L. M. Álvarez-Sabucedo, "Update of a course about computer architecture in the first year of a degree in engineering (Work in progress)," *2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE)*, 2016, pp. 1-7, doi: 10.1109/TAEE.2016.7528360.

[2] Atmel Corporation, "ARM7TDMI (Thumb) Datasheet," Volumen 0673B. Atmel Corporation. Capítulo 5. 1999.

[3] S. Barrachina-Mir, "QtARMSim: an ARM simulator," [Online] Disponible en: https://lorca.act.uji.es/project/qtarmsim/

[4] S. Barrachina-Mir, M. Castillo-Catalán, G. Fabregat-Llueca, J. C. Fernández-Fernández, G. León-Navarro, J. V. Martí Avilés, R. Mayo-Gual, and R. Montoliu-Colás, "Introducción a la arquitectura de computadores con QtARMSim y Arduino," Sapientia 129. Universitat Jaume I. DOI: 10.6035/Sapientia129, 2018. [Online] Disponible en: http://lorca.act.uji.es/libro/introARM/.

[5] M. J. Fernández-Iglesias, M. Llamas-Nistal, L. E. Anido-Rifón, J. M. Santos-Gago, and F. A. Mikic-Fonte, "Arquitectura de Ordenadores. Ejercicios practicos de ARM/Thumb," Universidade de Vigo, 2020. ISBN: 978-84-8158-855-2. Disponible en: https://libroarm.webs.uvigo.es/el-libro/

[6] M. Llamas-Nistal, M. J. Fernández-Iglesias, . M. Santos-Gago, L. E. Anido-Rifón, F. A. Mikic-Fonte, M. Liz-Domínguz and M.R. Pacheco-Lorenzo "Towards a new approach to the Computer Architecture lab," 2022 Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (XV Technologies Applied to Electronics Teaching Conference), Teruel, Spain, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/TAEE54169.2022.9840747.

[7] Guía docente de la asignatura "Informática: Arquitectura de Ordenadores" en el Grado de Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación en la Universidad de Vigo, España, curso 2022/23. Accesible en https://secretaria.uvigo.gal/docnet-nuevo/guia_docent/index.php?ensenyament=V05G301V01&assignatura=V05G301V01109&any_academic=2022_23&idioma_assig=cast

[8] F. Mikic-Fonte, M. Llamas-Nistal, M. Caeiro-Rodríguez and M. Liz-Domínguez, "A Gamification Module for BeA Platform," 2020 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), Uppsala, Sweden, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/FIE44824.2020.9274180

[9] M. Llamas-Nistal, F. A. Mikic-Fonte, M. C. Rodríguez, M. Liz-Domínguez and A. Lugilde-López, "New functionalities in BeA: Exams as photos and gamification," 2022 International Symposium on Computers in Education (SIIE), Coimbra, Portugal, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/SIIE56031.2022.9982336.

Enseñanza de Electrónica Digital y FPGAs Mediante el Aprendizaje Basado en Proyectos y la Robótica: Un Estudio de Caso

Jonathan Álvarez Ariza
Depto. Tecnología en Electrónica
Corporación Universitaria Minuto de Dios
(UNIMINUTO), Bogotá, Colombia
jalvarez@uniminuto.edu

Carola Hérnandez Hérnandez
Facultad de Ingeniería
Universidad de los Andes
Bogotá, Colombia
c-hernan@uniandes.edu.co

***Abstract*—Este trabajo describe la experiencia y resultados de aprendizaje de 22 estudiantes de ingeniería en un curso de Electrónica Digital que se combinó con el uso de Field Programmable Gate Arrays (FPGAs). Se empleó el aprendizaje basado en proyectos (ABP) y la construcción de robots de bajo costo en impresión 3D programados con las FPGAs como herramientas para fomentar el proceso de aprendizaje de los estudiantes. Para analizar las implicaciones educativas de la metodología, se emplearon una encuesta de percepción, las notas académicas de los estudiantes, y el análisis de los blogs y videos que los estudiantes usaron como medio para difundir sus proyectos. Los resultados evidencian que los estudiantes tuvieron una buena aceptación de la metodología y esta influenció positivamente en su motivación, autoeficacia, habilidades de colaboración y aprendizaje, que se hicieron evidentes al mejorar el rendimiento académico de este grupo con relación a estudiantes del semestre anterior.**

***Index Terms*—Aprendizaje basado en proyectos, ABP, electrónica digital, FPGA, robótica, impresión 3D**

I. Introducción

La Experimentación Activa es uno de los componentes principales en los currículos de Ingeniería y grados académicos en Tecnología como medio que permite a los estudiantes la comprensión y aplicación de los conceptos abordados en los cursos. Sin la experimentación y aplicación de los conceptos aprendidos, los estudiantes pueden carecer de habilidades *técnicas* de solución de problemas, implementación y depuración de sus diseños como asimismo de habilidades *blandas* tales como comunicación, colaboración entre pares, trabajo en equipo, entre otras, las cuales son críticas en el actual mundo laboral. Ahora bien, cabe resaltar que el concepto de *experimentación activa* proviene de la teoría de *aprendizaje experiencial* propuesta por Kolb [1]. En esta teoría, la experimentación activa permite que el estudiante ponga a prueba los conocimientos adquiridos en el mundo real. Entonces según Kolb [1], [2], el aprendizaje es un proceso en el cual se crea conocimiento mediante la transformación de la experiencia. No obstante, para que haya esta transformación, el estudiante primero debe observar y reflexionar sobre los conceptos que está aprendiendo para después aplicarlos. Es la continua interacción entre la reflexión-observación y la aplicación-experimentación lo que permite generar el aprendizaje [1].

En esta línea, han surgido varias metodologías de aprendizaje que propenden, e.g., por la experimentación activa y la colaboración entre pares como lo es el aprendizaje basado en proyectos (ABP). En el ABP, los estudiantes trabajan de manera activa, evalúan e implementan proyectos con aplicación en mundo real [3]. Wilkerson & Gijselaers [4] han definido tres principios de la teoría del aprendizaje que aplican al ABP: (1) el aprendizaje es un proceso constructivo y no receptivo; (2) la metacognición afecta al aprendizaje; y (3) los factores sociales y contextuales influyen en el aprendizaje. De este modo, el ABP surge como una metodología para dar respuesta a la construcción no solo de habilidades técnicas sino otras de índole más personal y grupal como la colaboración, el pensamiento crítico o el pensamiento creativo [5].

Específicamente dentro del contexto de la ingeniería eléctrica, la electrónica y las ciencias de la computación se han formulado varios trabajos que toman en cuenta el ABP como método para brindar experimentación activa a los estudiantes. Por ejemplo, en [6] se presenta la experiencia de incorporar el ABP en varios cursos ingeniería de software. Los resultados muestran un aumento en la motivación y en el aprendizaje de los estudiantes. De manera similar, en [7], se muestra como el ABP permitió que los estudiantes estuvieran más comprometidos con las temáticas y tareas en un curso de sistemas embebidos mediante microcontroladores. También en [8], se describe una experiencia de ABP que se mezcló con el micro aprendizaje en un curso de FPGAs y electrónica digital. Se hace énfasis en cómo los estudiantes tuvieron más confianza y motivación en el aprendizaje de las temáticas abordadas en el curso. Por último, en [9] se expone una metodología ABP para enseñar control automático mediante un levitador magnético usando FPGAs en la asignatura de Diseño Electrónico y Control Avanzado. Los autores indican la importancia de mostrar aplicaciones prácticas a los estudiantes que permitan enlazar los contenidos teóricos con los prácticos, como asimismo se enfatiza en cómo el profesorado debe reorientar sus actividades para que se alineen a lo esperado en el ABP.

Conviene subrayar que muchos de los resultados educativos que se obtienen en el ABP en ingeniería también provienen del tipo de herramientas tecnológicas incorporadas en los cursos, de su orientación pedagógica por parte de los docentes, y de

la utilización de estas por parte de los estudiantes como medio para potenciar las habilidades mencionadas [10], [11]. Así, en [12], se presenta un prototipo electrónico que puede ser usado para potenciar el ABP en asignaturas que tengan relación con las temáticas de FPGA, VHDL, NI LabView y microcontroladores. El prototipo consta de dispositivos como motores DC, sensores de ultrasonido, sensor de temperatura, entre otros. En esta misma línea de tecnologías con potenciales usos con ABP, Navas-Gonzaléz *et al*. [13] presentan un laboratorio remoto para las temáticas de FPGAs, además de indicar como algunos proyectos pueden ser incorporados dentro de este laboratorio. Los estudiantes que usaron la herramienta mostraron un alto nivel de satisfacción con el mismo. De igual forma, Yesa *et al*. [14] presentan un laboratorio remoto para FPGAs que se ha usado como complemento a los laboratorios presenciales en la Universidad de Deusto, España.

Los trabajos anteriores muestran la importancia de incorporar el ABP en los currículos de ingeniería eléctrica, electrónica, ciencias de la computación y afines. Sin embargo, como complemento a los anteriores trabajos, el presente estudio describe una metodología de ABP para la asignatura de sistemas digitales con FPGAs que combinó el uso de robótica básica y que fue accesible a través de impresión 3D. Este curso fue tomado por estudiantes del programa de Tecnología en Informática en la Universidad Colombiana Corporación Universitaria Minuto de Dios-UNIMINUTO y buscó fomentar el interés y aprendizaje de los temas de la asignatura, el trabajo en equipo, las habilidades de comunicación y el rendimiento académico en la asignatura. En parte diseñamos y desplegamos esta metodología debido a que, en cursos anteriores de la misma asignatura, los estudiantes mostraron desinterés y falta de compromiso hacia las temáticas y actividades e incluso en algunos casos hubo deserción académica.

Tomando en cuenta lo anterior, en la sección 2 de este documento abordamos el contexto educativo de los estudiantes y de la asignatura en la cual se llevó a cabo el estudio. En la sección 3 describimos en detalle la metodología educativa con ABP y los instrumentos usados para la recolección de la información para evaluar el impacto de la metodología educativa en los estudiantes. En la sección 4 exponemos los resultados y su discusión basándonos en el análisis de los datos de los estudiantes. Finalmente, las secciones 5 y 6 exponen las limitaciones del trabajo y las conclusiones derivadas del mismo.

II. Contexto Educativo

A. Descripción del curso

Como se ha descrito, se seleccionó la materia de Electrónica Digital I para desplegar la metodología educativa. La materia tiene una duración de 16 semanas y está dividida en tres cortes por semestre, cada uno con un periodo de evaluación en las semanas 6, 11 y 15, respectivamente. La materia es transversal al currículo de varias carreras en nuestra universidad como lo son Tecnología en Electrónica, Ingeniería de Sistemas y Tecnología en Informática y tiene una intensidad horaria por semana de 3 horas. La Tabla 1 muestra los temas por cortes en la materia con la estructura típica del curso. Normalmente para la implementación de las prácticas de laboratorio, los estudiantes usan protoboard y compuertas lógicas u otro tipo de circuitos integrados como decodificadores, codificadores o multiplexores de la serie TTL 74LSXX o 74HCXX.

TABLA I
Temas por corte en la materia de Electrónica Digital I.

Corte	Temas
Corte 1 (Semanas 1-6) **Introducción a la Electrónica Digital**	• Introducción a la Electrónica Digital • Sistemas numéricos (Binario, Octal, Hexadecimal, Decimal) • Compuertas Lógicas y álgebra Booleana • Introducción VHDL y FPGAs • Implementación de compuertas lógicas en VHDL
Corte 2 (Semanas 7-11) **Sistemas Combinacionales**	• Sistemas combinacionales • Tablas de verdad • Expresiones lógicas • Reducciones de expresiones lógicas usando mapas de Karnaugh • Codificadores, decodificadores y multiplexores • Implementación de sistemas combinacionales con VHDL y FPGA
Corte 3 (Semanas 12-16) **Sistemas Secuenciales**	• Principios de Latches y Flip Flops • Sentencias condicionales, secuenciales y concurrentes en VHDL e implementación en FPGA

Para el curso de 2023 dónde se implementó la metodología, decidimos modificar la etapa de implementación e introducir a los estudiantes en el lenguaje Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language (VHDL) junto con el manejo de FPGAs mediante la tarjeta Digilent Basys 2 [15]. Específicamente para el curso, empleamos la FPGA Xilinx Spartan3E-100 CP132. Con lo anterior buscamos que los estudiantes entendieran que hay otro tipo de lenguajes, en este caso, para el diseño y creación de hardware. El curso tiene el objetivo de introducir a los estudiantes en los sistemas digitales tanto combinacionales como secuenciales que les permitirán entender arquitecturas más complejas que pueden usarse a nivel de procesamiento de datos y protocolos de comunicación.

B. Participantes

La materia fue ofrecida a estudiantes del programa de Tecnología en Informática durante el primer semestre de 2023 y fue vista por estudiantes de segundo semestre de este programa académico. 22 estudiantes de este programa se inscribieron en el curso y decidieron participar libremente en la metodología. El promedio de edad de los estudiantes fue 20.35 años con una distribución de 11 estudiantes hombres (50%) y 11 estudiantes mujeres (50%).

III. Metodología

El objetivo del diseño de la metodología fue doble. Por un lado, buscamos que los estudiantes aprendieran otras temáticas diferentes del curso típico de electrónica digital y desarrollaran

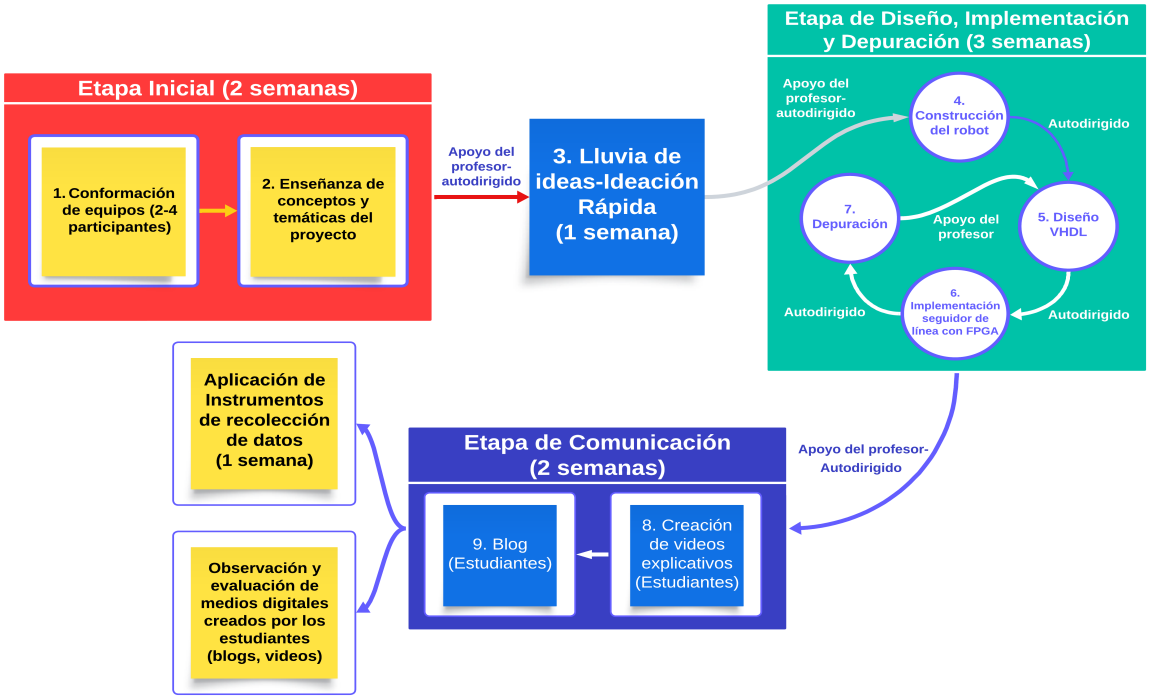


Fig. 1. Etapas propuestas para la metodología. Tiempo de ejecución: **6 semanas**.

habilidades de colaboración y trabajo en equipo. Por otro lado, dadas las percepciones de los estudiantes en cursos anteriores de la misma materia, en dónde se evidenció bajo rendimiento académico y desmotivación hacia las temáticas del curso, esto nos hizo preguntarnos sobre cómo mejorar el proceso de aprendizaje de los estudiantes en la materia. Con base en la experiencia de trabajo con la robótica como andamiaje del proceso educativo en otros cursos del currículo de ingeniería dónde hemos tenido buenos resultados, decidimos también incorporarla en el curso mediante un robot seguidor de línea. Además, varios estudios han reportado beneficios de la robótica como el aumento de la motivación y la reducción de la brecha de género en cursos de programación [16], [17]. Así, pues, se buscó que este robot fuera accesible económicamente para los estudiantes, por esta razón se optó por su diseño en impresión 3D. El robot fue entregado por el profesor del curso para que los estudiantes lo armaran y lo pusieran en marcha con la implementación en FPGA. La metodología se desplegó durante las últimas seis semanas del semestre.

A. *Robot seguidor de línea*

Como se ha descrito, para potenciar el aprendizaje con la metodología ABP, se diseñó un robot seguidor de línea al inicio del curso que fuese accesible a los estudiantes con un costo de USD30. Varias partes del robot se construyeron en impresión 3D y se empleó un módulo de sensor infrarrojo, un controlador de motor DC, dos motores DC y una bateria (power bank). La apariencia de diseño del robot se muestra en la Fig.(2). Es importante señalar que las partes del robot fueron facilitadas a los estudiantes y las tarjetas Digilent Basys 2 fueron entregadas por el laboratorio de la universidad a los mismos.

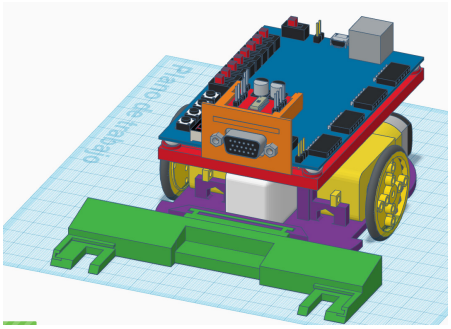


Fig. 2. Diseño del robot seguidor de línea.

B. *Etapas de la metodología*

La Fig.(1) muestra las etapas que se crearon para la metodología con ABP. Varias de las etapas en la Fig.(1) se hicieron de manera simultánea, e.g., durante la misma semana de la lluvia de ideas, los estudiantes comenzaron a construir sus robots. Similarmente, durante el tiempo en la etapa de diseño y depuración, los estudiantes crearon sus videos explicativos y blogs sobre el proceso del proyecto (etapa de comunicación). Al final de la intervención (semana 16 del semestre), se aplicaron los instrumentos de recolección de datos y se realizó la evaluación de los blogs y videos creados por los estudiantes. Cada una de las etapas se explica con más detalle a continuación:

1) *Etapa Inicial*: En esta etapa se conformaron los equipos de trabajo de entre dos a cuatro integrantes sin restric-

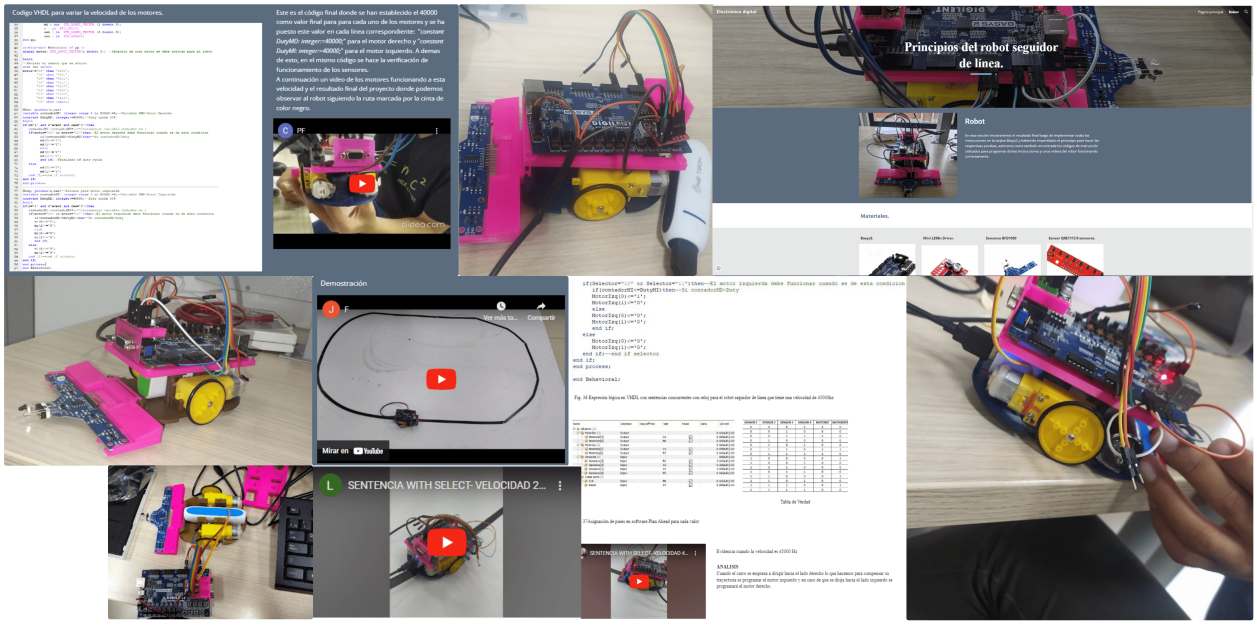


Fig. 3. Imágenes del proceso educativo con la metodología llevado a cabo por los estudiantes. Se muestran algunos videos, blogs, robots, y códigos en VHDL.

ciones (se formaron 6 equipos de trabajo). Una vez se conformaron los grupos, se pasó a la explicación de los temas para el proyecto, entre los cuales se encontraban secuencias concurrentes en VHDL, sensores infrarrojos, manejo de controlador de motor DC y modulación de ancho de pulso (PWM) en VHDL.

2) *Lluvia de ideas e ideación rápida*: Con los temas y conceptos enseñados, los estudiantes realizaron primero una lluvia de ideas y también buscaron soluciones rápidas para la implementación de la lógica de control para su robot seguidor de línea. En segundo lugar, los estudiantes debatieron y compararon varias estructuras para bucles, procesos o condicionales en VHDL. De manera similar, los estudiantes dibujaron y analizaron como debería moverse el robot seguidor de línea y construyeron su tabla de verdad de sensores (entradas) vs. motores (salidas). En tercer lugar, los estudiantes hicieron el código respectivo en VHDL tomando en cuenta esta tabla de verdad y sentencias concurrentes, secuenciales y condicionales, i.e., when-else, if, process, with-select, case. De hecho, uno de los requerimientos era que los estudiantes compararan en la práctica estas sentencias. Este proceso contó con el apoyo del profesor como guía en la selección de una técnica para dicho control y también fue autodirigido por los estudiantes en el sentido de que ellos idearon sus propias soluciones.
3) *Etapa de diseño, implementación y depuración*: Con el diseño de sus entidades (hardware) en el paso anterior en VHDL, los estudiantes las implementaron en el robot seguidor de línea. Para ello se construyó una pista básica para que los estudiantes probaran sus robots. Se presentaron varios problemas especialmente con la velocidad del robot que hacía que este se saliese de la línea (pista) y con las conexiones entre los componentes de sensores, Basys 2 y controlador de motor DC. Por esta razón, se decidió incorporar la temática de modulación por ancho de pulso (PWM) para variar la velocidad de los motores. Los estudiantes incorporaron esta técnica a sus entidades originales. De allí que esta etapa fue un proceso iterativo entre el diseño, la puesta en marcha de las entidades con el robot y la depuración (corrección de errores), en algunos momentos autodirigido por los estudiantes y en otros con la asistencia de profesor para encontrar y comprender las causas de los errores y su solución.
4) *Etapa de comunicación*: En esta etapa, los estudiantes crearon videos explicativos dónde mostraron cómo crearon las entidades en VHDL para manejar el robot seguidor. Cabe resaltar que además del robot, los estudiantes realizaron un taller con las temáticas del tercer corte (ver Tabla 1), que buscaron soportar el diseño y puesta en marcha del proyecto final. El profesor del curso revisó previo a la finalización de semestre los blogs y videos y dio la realimentación a cada grupo para que los mejoraran.
5) *Aplicación de encuesta y evaluación de medios digitales:* Al final del semestre (semana 16) se aplicó la encuesta de percepción de la metodología y se evaluaron los blogs y videos creados por los estudiantes usando una rúbrica de evaluación que hemos usado en otros estudios [18]. Con la rúbrica se evaluaron la comprensión y la aplicación de los conceptos aprendidos en el curso en la realización del proyecto, la calidad del blog en términos de la presentación de la información y el trabajo en grupo, ya que los videos debían hacerse de manera colaborativa.

Algunas imágenes del proceso se muestran en la Fig.(3).

C. Instrumentos de recolección de Información

Para analizar los impactos educativos de la metodología, se tomaron tres instrumentos de recolección de datos, a saber, una encuesta de percepción, las notas académicas de los estudiantes por corte en el curso con la metodología y una rúbrica de evaluación para los blogs y videos creados por los estudiantes para posteriormente triangularlos. El proceso de triangulación permite contrastar varias fuentes de información para observar la veracidad de los datos y tener mayor confiabilidad en los resultados obtenidos [19]. Además, se usaron las notas de los estudiantes en el mismo curso durante el semestre anterior, el cual fue impartido por el mismo profesor del curso actual. Las notas nos permitieron validar el rendimiento académico de los estudiantes con y sin metodología.

1) Encuesta de Percepción: La encuesta se diseñó con un total de 23 preguntas (21 cerradas y 2 abiertas). Las preguntas cerradas tuvieron una escala Likert de cuatro puntos (1: Totalmente en desacuerdo a 4: Totalmente de acuerdo) y se dividieron en tres categorías (constructos) que se deseaban evaluar con la metodología de ABP cuyo rango de preguntas, descripción y valor de Alpha de Cronbach (α) se encuentran consignados en la Tabla 2. El valor de Alpha de Cronbach (α) permite conocer la validez interna del instrumento. Valores de ($\alpha \geq 0.7$) indican que el instrumento tiene una buena consistencia interna y responde a la naturaleza de los constructos que se desean conocer [20]. Específicamente en esta tabla, la autoeficacia se refiere a las creencias personales sobre la posesión de capacidades para hacer frente a determinadas situaciones y obtener los resultados deseados en las mismas [21], en este caso, relacionada con el aprendizaje en el curso y la implementación del proyecto final. N = 20 (90.9%) de los estudiantes respondieron la encuesta de manera anónima.

TABLA II
DESCRIPCIÓN DE LAS CATEGORÍAS DE LA ENCUESTA Y VALOR DE ALPHA DE CRONBACH (α). P: PREGUNTA.

Categoría (Rango preguntas)	**Descripción**	**Alpha de Cronbach (α)**
Aprendizaje y Experimentación (P1-P8)	Pretende conocer la percepción de los estudiantes respecto al aprendizaje y la experimentación que tuvieron con la metodología ABP.	0.918
Autoeficacia y Motivación (P9-P16)	Busca identificar el grado de autoeficacia y motivación de los estudiantes con la metodología.	0.766
Rol del Profesor (P17-P21)	Pretende conocer cómo el rol del profesor influyó en la metodología.	0.910

2) Rúbrica de Evaluación: La rúbrica de evaluación fue un instrumento para evaluar los medios digitales (blogs y videos) creados por los estudiantes y se encuentra disponible en el enlace (https://zenodo.org/records/8193140). La rúbrica se dividió en las categorías de *organización, coherencia de contenidos, comprensión de conceptos, aplicación de conceptos y trabajo en equipo*. Cada una de estas categorías se evaluó en un rango de 0-5. La estructura y pertinencia de la rúbrica fue evaluada por un experto en educación.

D. Análisis de datos

Para el análisis estadístico e inferencial de los datos de los estudiantes se usó el software IBM SPSS Statistics v.27. Para el análisis de los comentarios de los estudiantes se empleó el software NVivo v.13.

IV. Resultados y discusión

A. Encuesta de percepción

Las Tablas 3-5 muestran el valor medio ($\bar{x}$) y desviación estándar (SD) por cada una de las preguntas aplicadas en la encuesta. Del mismo modo, las Figuras 4-6 muestran la distribución de respuesta de los estudiantes por categoría de la encuesta.

TABLA III
PREGUNTAS DE LA ENCUESTA: CATEGORÍA APRENDIZAJE Y EXPERIMENTACIÓN. $\bar{x}$: MEDIA, SD: DESVIACIÓN ESTÁNDAR. n = 20.

Pregunta	$\bar{x}$	**SD**
P1. ¿La metodología desarrollada en el curso me permitió entender los conceptos enseñados por el docente en el área de electrónica digital?	3.9	0.31
P2. ¿Mediante la metodología empleada en el curso pude experimentar y aplicar los conceptos aprendidos usando, por ejemplo, la tarjeta Basys 2?	3.85	0.36
P3. ¿La metodología en el curso me permitió resolver mis dudas sobre los diversos conceptos vistos en clase?	3.8	0.41
P4. ¿Mediante la metodología desarrollada en el curso pude resolver y proponer soluciones a los problemas planteados en el área de electrónica digital?	3.75	0.44
P5. ¿La metodología empleada en el curso me permitió investigar conceptos adicionales sobre las temáticas del curso?	3.75	0.44
P6. ¿La metodología desarrollada me ayudó a identificar los errores que tenia en mis entregables como laboratorios, talleres, parciales, etc.?	3.8	0.41
P7. Mediante la metodología, ¿pude crear esquemáticos para simbolizar las expresiones lógicas vistas en clase?	3.85	0.37
P8. Con el proyecto final, ¿Puede integrar y aplicar los conocimientos aprendidos en el curso?	3.9	0.31

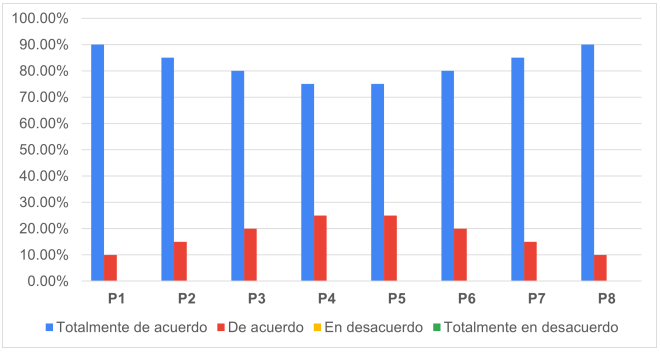


Fig. 4. Distribución de respuestas de los estudiantes en la categoría Aprendizaje y Experimentación. n = 20.

Una de las primeras cosas que llaman la atención en la categoría Aprendizaje y Experimentación es que los estudiantes

tuvieron todas sus respuestas entre totalmente de acuerdo y de acuerdo. Por ejemplo, en la Tabla 3 los valores más altos en media $\bar{x} = 3.9$ y con una baja desviación $SD = 0.31$ se obtuvieron a las preguntas P1 y P8, las cuales se relacionan con sí la metodología les permitió a los estudiantes entender de mejor manera los conceptos en la materia (P1) y sí a través del proyecto final se integraron y aplicaron los conceptos aprendidos en la materia (P8). También en la pregunta P2 relacionada con la experimentación y aplicación de lo aprendido, el 85% de los estudiantes estuvo totalmente de acuerdo y el 15% de acuerdo, lo cual demuestra que la metodología permitió la experimentación que como se ha mencionado es uno de los aspectos más importantes en los currículos de ingeniería.

Otro aspecto destacable es que la metodología les permitió a los estudiantes resolver sus dudas en clase con el apoyo del docente (ver pregunta P3, $\bar{x} = 3.8, SD = 0.41$), lo que ayudo a que los estudiantes estuvieran motivados y realizaran sus actividades dentro de la materia y el proyecto final de una mejor manera. Llama también la atención las respuestas de la pregunta P6 ($\bar{x} = 3.8, SD = 0.41$) que se relacionan con la identificación de errores relacionados con los temas en talleres, laboratorios e implementación en la FPGA de las entidades creadas por los estudiantes en VHDL. Allí, el 80% está totalmente de acuerdo con la pregunta y el 20% restante está de acuerdo. De manera similar, las respuestas de la pregunta P4 ($\bar{x} = 3.75, SD = 0.44$) indican que los estudiantes de manera autónoma buscaron soluciones para las problemáticas en el área de sistemas digitales con un 75% de los estudiantes totalmente de acuerdo y un 25% de acuerdo.

TABLA IV
PREGUNTAS DE LA ENCUESTA: CATEGORÍA AUTOEFICACIA Y MOTIVACIÓN. $\bar{x}$: MEDIA, SD: DESVIACIÓN ESTÁNDAR. n = 20.

Pregunta	$\bar{x}$	SD
P9. Comparando mis habilidades al inicio del curso y al final del curso ¿creo que estás mejoraron con la metodología de curso?	3.85	0.37
P10. ¿Considero que mi desempeño en la materia fue bueno?	3.45	0.51
P11. ¿Creo que las habilidades que desarrolle en el curso me permitieron resolver los problemas planteados en el área de electrónica digital?	3.7	0.47
P12. Con lo aprendido en el curso, ¿Considero que puedo identificar y analizar errores que se presenten en el área de sistemas digitales?	3.55	0.51
P13. ¿Considero que las actividades desarrolladas en el curso fueron interesantes?	3.9	0.31
P14. ¿La metodología empleada me motivó a aprender las temáticas y/o conceptos en el curso?	3.8	0.41
P15. ¿La metodología del curso me ayudó a reducir mi nerviosismo al momento de entregar un quiz, parcial, laboratorio, etc.?	3.55	0.51
P16. ¿Me agrado ver como aplique los conceptos vistos en el desarrollo del proyecto final?	3.9	0.31

Por último, mientras en la pregunta P6 ($\bar{x} = 3.8, SD = 0.41$) los estudiantes indicaron que podían detectar errores/fallas en los entregables del curso (talleres, parciales, laboratorios), especialmente con la implementación, en la pregunta P12 de la Tabla 4 ($\bar{x} = 3.55, SD = 0.51$) los estudiantes indicaron que para el análisis de sistemas digitales más complejos podían tener dificultades con el análisis de estos errores y con reconocerlos después de la finalización del curso. Esto puede suponer que los estudiantes aún necesitan la ayuda del profesor para reconocer estas fallas y darles una solución.

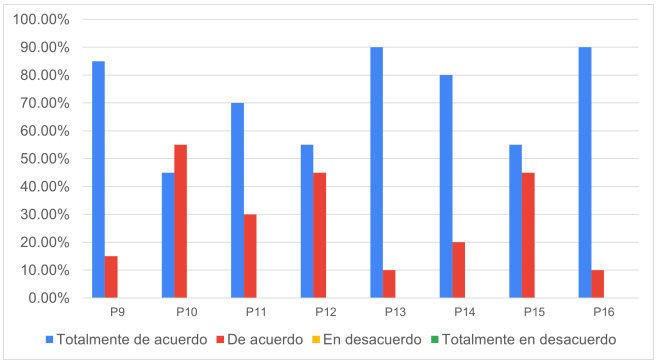


Fig. 5. Distribución de respuestas de los estudiantes en la categoría Autoeficacia y Motivación. n = 20.

Respecto a la categoría Autoeficacia y Motivación, los estudiantes tuvieron una mayor diversidad en las respuestas, con valores más bajos de media en sus respuestas de acuerdo a la Tabla 4 y a la Fig.(5). Por ejemplo, en la pregunta P10 ($\bar{x} = 3.45, SD = 0.51$), la mayoría de estudiantes (55%) están de acuerdo en que su desempeño en la materia fue bueno, mientras el 45% están totalmente de acuerdo. No obstante, los resultados sugieren que los estudiantes tienen una buena percepción de su desempeño en la materia, aunque de acuerdo con las observaciones de curso hechas por el profesor, varios de los estudiantes necesitaron ayuda extra con tutorías para la compresión de las temáticas. Paralelamente la pregunta P15 ($\bar{x} = 3.55, SD = 0.51$) sugiere que la metodología ayudó a reducir el nerviosismo respecto a las entregas de las tareas del curso por parte de los estudiantes. Con la metodología buscamos que los estudiantes se sintieran bien en el aula de clase y participaran de manera libre exponiendo sus inquietudes, lo cual pudo influir en la percepción de esta pregunta. Además, los estudiantes indican que sus habilidades en el curso (teóricas y blandas) mejoraron en comparación con el inicio del curso, con un 85% de los estudiantes totalmente de acuerdo y un 15% de acuerdo (ver pregunta P9 ($\bar{x} = 3.85, SD = 0.37$)).

Con relación a la motivación de los estudiantes, la pregunta P14 ($\bar{x} = 3.8, SD = 0.41$) indica que la metodología influyó en en este constructo positivamente. Igualmente la pregunta P13 ($\bar{x} = 3.9, SD = 0.31$) indica que las actividades propuestas en el curso y en el proyecto final fueron interesantes, con un 90% de los estudiantes totalmente de acuerdo. Estudios previos en el área de ingeniería sugieren que la autoeficacia y la motivación son relevantes para el rendimiento de los estudiantes y ayudan a que ellos tengan persistencia en los cursos y no deserten de los mismos[22], [23]. Sin embargo, como lo indican Hirshield & Chachra [23], no siempre las actividades prácticas en ingeniería y un mayor tiempo de exposición de los estudiantes a estas hace que ellos tengan una

mayor autoeficacia. Incluso en algunos casos puede jugar en contra. No obstante, según nuestros resultados, los estudiantes tienen una buena percepción de su autoeficacia de acuerdo con las preguntas P9-P12. Ahora bien, no pudimos encontrar una diferencia significativa en las apreciaciones de autoeficacia en estas preguntas entre estudiantes hombres y mujeres contrario a lo indicado en el estudio [22]. Quizás la única diferencia apreciable está en la pregunta P9 dónde todas las estudiantes estuvieron totalmente de acuerdo con que mejoraron sus habilidades durante el curso en comparación con el inicio de este y en la pregunta P13 en dónde todas las estudiantes estuvieron totalmente de acuerdo en que las actividades propuestas en la metodología ABP fueron interesantes.

La Tabla 5 y la Fig.(6) muestran las percepciones de los estudiantes respecto al rol del profesor en la metodología ABP y sus resultados.

TABLA V
PREGUNTAS DE LA ENCUESTA: CATEGORÍA ROL DEL PROFESOR. $\bar{x}$: MEDIA, SD: DESVIACIÓN ESTÁNDAR. n = 20.

Pregunta	$\bar{x}$	SD
P17. ¿Las explicaciones realizadas por el profesor me permitieron entender los conceptos del curso fácilmente?	3.9	0.31
P18. ¿Cuándo no sabía que hacer, el profesor me ayudó a encontrar una solución a los problemas planteados?	3.9	0.31
P19. ¿El profesor me dio ejemplos que me ayudaron a desarrollar los talleres, laboratorios, etc.?	3.95	0.22
P20. ¿La actitud del profesor me permitió preguntar y aclarar mis dudas en el curso?	3.9	0.31
P21. ¿La disposición del profesor me ayudó a aprender de una mejor manera los temas del curso, incluso aquellos que me resultaban difíciles?	3.95	0.22

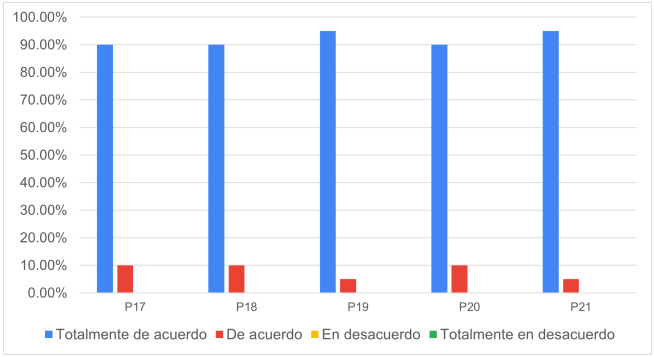


Fig. 6. Distribución de respuestas de los estudiantes en la categoría Rol del Profesor. n = 20.

Normalmente en muchos estudios de educación en ingeniería, el rol del profesor no es tomado en cuenta y parece en algunos casos no influir en los resultados educativos. Contrariamente, nosotros creemos que el rol del profesor tiene una gran influencia en el diseño, implementación y resultados derivados de metodologías educativas, en este caso con ABP. Por ejemplo, en la P18 ($\bar{x} = 3.9, SD = 0.31$), el 90% de los estudiantes estuvieron totalmente de acuerdo en que la orientación del profesor les ayudó cuando ellos no sabían que hacer y esto les permitió encontrar una solución a los problemas planteados. También, los estudiantes reconocen en las preguntas P20 ($\bar{x} = 3.9, SD = 0.31$) y P21 ($\bar{x} = 3.95, SD = 0.22$) que la actitud del profesor les permitió aclarar sus dudas, participar en la clase y a aprender temas que a ellos les resultaban difíciles. En estas preguntas entre el 90% a 95% de los estudiantes están totalmente de acuerdo. Esto es en parte lo esperado por parte de los profesores con una actitud abierta y facilitadora del proceso de aprendizaje en la metodología ABP y ha sido enunciado desde modelos teóricos que la soportan [24].

B. Rendimiento académico de los estudiantes

Como se ha mencionado, optamos por analizar las notas académicas de los estudiantes del curso con metodología ABP vs. las notas de los estudiantes del curso anterior sin metodología del año 2022 en segundo semestre. El análisis de las notas nos permitió validar los resultados obtenidos en la encuesta de percepción y saber si estos resultados eran congruentes o no. Para ello, lo primero que hicimos desde un punto de vista estadístico fue validar si las notas de ambos cursos tenían una distribución normal mediante la prueba Kolmogorov-Smirnov (K-S) para después aplicar la prueba t-Student para muestras independientes. En ambos cursos, las notas tuvieron una distribución normal. Así, primero, aplicamos la prueba t-Student para las notas del curso con ABP entre el primer corte (sin metodología) vs. el último corte (con metodología). Después, validamos las notas mediante la misma prueba en el tercer corte de cada curso con y sin metodología para los años 2022 y 2023. De igual modo propusimos la hipótesis nula H_0 en la cual no hay diferencia estadísticamente significativa en las notas académicas de los estudiantes en los cursos con y sin metodología ABP. Se debe recordar que las notas tuvieron un rango de 0-5.

Primero, se observó un mayor promedio académico de los estudiantes del curso con metodología ABP en el tercer corte dónde presentaron sus proyectos finales con ($t(21) = 71.178$, $p < 0.001$) y $\bar{x} = 4.46$ vs. el primer corte del mismo curso dónde aún no se había desplegado la metodología ABP con $\bar{x} = 3.97$.

Segundo, entre los cursos de 2022 y 2023 se observó un mayor desempeño académico para el curso con metodología ABP con ($t(36) = 4.42$, $p < 0.001$) y $\bar{x} = 4.46$ vs. el curso de 2022 con $\bar{x} = 3.49$. Con lo anterior rechazamos la hipótesis nula H_0, lo que nos permite afirmar que si hay un mejor rendimiento académico (estadísticamente significativo) de los estudiantes en el curso con metodología ABP.

C. Comentarios de los estudiantes

Las preguntas P22 y P23 de la encuesta recogieron los comentarios de los estudiantes. La Tabla 6 muestra el resumen de estos comentarios en función de las categorías de la encuesta. Como aspectos por mejorar los estudiantes indicaron la necesidad de un mayor tiempo de clase para hacer las actividades y un mayor número de estas para poner en práctica lo aprendido.

TABLA VI
COMENTARIOS DE LOS ESTUDIANTES POR CATEGORÍA DE LA ENCUESTA. E: ESTUDIANTE

Categoría de la encuesta	Comentarios de los estudiantes
Aprendizaje y Experimentación	• *E20*. «Pudimos manipular los materiales de construcción del proyecto final y saber cada una de sus funciones.» • *E7*. «Bastante amplios los temas y la explicación, buena manera de emplear lo aprendido en clase.» • *E11*. «Me gustó mucho el curso aprendí muchas cosas nuevas como el manejo de la tarjeta Basys 2 y el proyecto del robot seguidor de línea, también todo lo lógico como las sentencias y mapas que se aprendieron mediante el curso.» • *E17*. «Es una muy buena metodología debido a que los trabajos que dejan te hacen poner en práctica absolutamente todo lo que te explican en la clase.»
Autoeficacia y Motivación	• *E4*. «Fue una materia que me permitió interesarme por aspectos de electrónica y la lógica digital.» • *E9*. «El profe no nos hizo sentir ansiosos en ningún momento y uno mismo iba al tablero a resolver las dudas porque no colocaba presión en uno ni delante de los compañeros.»
Rol del Profesor	• *E3*. «Pues de un inicio parecía un curso complejo, pero a medida que pasaba el tiempo la metodología que desarrollo el docente, como su forma de explicar, los ejemplos, talleres etc., permitieron que sea un curso muy bueno en los profesional y personal.» • *E8*. «El profe tiene vocación, enseña muy bien, tiene una muy buena actitud.» • *E12*. «Resalto la vocación del docente por enseñar y explicar para que todos los temas se entendieran a cabalidad.»

D. Rúbrica de Evaluación

Los estudiantes en los 6 grupos conformados obtuvieron una nota promedio de $(M = 4.1, SD = 0.33)$ en la escala de 1-5 en todas las categorías de la rúbrica. De acuerdo con el análisis de los materiales digitales (blogs y videos) se resalta lo siguiente:

- Varios grupos tuvieron problemas en la selección de una herramienta tecnológica adecuada para la creación de sus blogs. Aunque se sugirieron herramientas como Google Sites o WordPress, los estudiantes usaron algunas que generaron problemas. También, en estos casos la herramienta seleccionada no permitió plasmar adecuadamente los contenidos ni cargar los videos con las explicaciones solicitadas. Así, por ejemplo, los videos estaban bloqueados por normativa de privacidad debido a las cuentas de correo electrónico que usaron los estudiantes.
- La organización de la información en los blogs en varios casos fue confusa. En estos casos no hubo un orden para presentar la información, por ejemplo, en entradas en los blogs.
- Varios estudiantes tienen dificultades con citar fuentes bibliográficas o webgrafia de dónde tomaron la información para el desarrollo de los blogs.
- Algunos estudiantes presentan dificultad en la explicación de algunos conceptos relacionados con las temáticas del curso. En relación con el proyecto, los estudiantes explicaron adecuadamente en los videos cómo hicieron sus entidades para controlar el robot seguidor de línea.

Lo anterior evidencia que se debe hacer un mayor énfasis en actividades que empleen TIC y en la selección y curación de contenidos que los estudiantes usan en sus videos y blogs.

V. LIMITACIONES

Una de las principales limitaciones que evidenciamos es la referente al tamaño de la muestra de los estudiantes en la metodología lo cual es una restricción al hacer generalizaciones. Sin embargo, creemos que los resultados mostrados son significativos y aportan comprensión sobre cómo diseñar y desplegar metodologías de aprendizaje en ingeniería eléctrica, electrónica y afines, en este caso con ABP. En segundo lugar, se debe analizar con detalle el rol del profesor en la metodología. No descartamos que una parte de los resultados obtenidos tengan relación directa con este rol, pero a su vez la triangulación de los datos recolectados y la comparación con otros cursos nos permiten indicar que, junto con el rol del profesor, influyeron el diseño de la metodología y las características del proyecto realizado con robótica.

VI. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este estudio describimos una metodología con ABP para el curso de Electrónica Digital que combinó la utilización de FPGAs y robótica básica. Nuestro interés fue mejorar el proceso educativo de los estudiantes en la materia, lo cual abarca no solamente lo cognitivo (creación y manejo de conocimiento) sino también la motivación, interés y la autoeficacia de los estudiantes. Nuestros resultados se alinean con la teoría del aprendizaje experiencial propuesta por Kolb, más aún, en cursos de programas tecnológicos que buscan que los estudiantes desarrollen habilidades prácticas en el núcleo temático como también la colaboración, trabajo en equipo o pensamiento crítico. Los resultados evidencian que los estudiantes tuvieron una buena percepción de la metodología y esta influyó en el aprendizaje, la experimentación, y el rendimiento académico que tuvieron en la asignatura, con lo cual se abordaron las problemáticas experimentadas en cursos anteriores. Debemos indicar que estos resultados se debieron a la planeación de la metodología ABP y del rol orientador y facilitador del profesor de la asignatura. Como trabajo futuro, se debe incorporar en la asignatura el desarrollo de habilidades para el manejo de las TIC y de curaduría de los contenidos que los estudiantes usan en sus blogs y videos. De igual manera, para validar la metodología, se necesita un mayor número de estudiantes que participen en futuros cursos.

REFERENCIAS

[1] D. A. Kolb, *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*. FT press, 2014.

[2] E. M. Espinar Álava and J. A. Vigueras Moreno, "El aprendizaje experiencial y su impacto en la educación actual," *Revista Cubana de Educación Superior*, vol. 39, no. 3, 2020.

[3] J. A. Martí, M. Heydrich, M. Rojas, and A. Hernández, "Aprendizaje basado en proyectos: una experiencia de innovación docente," 2010.

[4] L. Wilkerson and W. H. Gijselaers, *Bringing problem-based learning to higher education: Theory and practice*. Jossey-Bass,, 1996.

[5] A. Kolmos and E. De Graaff, "Problem-based and project-based learning in engineering education: Merging models," in *Cambridge handbook of engineering education research*. Cambridge University Press, 2014, pp. 141–161.

[6] C. Almeida and C. França, "Improving the pbl method with experiential learning theory in software engineering teaching," in *Proceedings of the 4th International Workshop on Software Engineering Education for the Next Generation*, 2022, pp. 28–35.

[7] E. Díaz Ronceros, "Relevancia de la ejecución experimental de proyectos con microcontroladores en el aprendizaje de la ingeniería electrónica," *Educación*, vol. 29, no. 56, pp. 48–72, 2020.

[8] V. Kiray, S. Demir, and M. Zhaparov, "Improving digital electronics education with fpga technology, pbl and micro learning methods," in *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Teaching, Assessment and Learning for Engineering (TALE)*. IEEE, 2013, pp. 445–448.

[9] E. Ramirez-Laboreo, A. Bono-Nuez, E. Montijano-Muñoz, and C. Sagüés, "Enseñando diseño electrónico y control avanzado con un levitador magnético," in *XLIV Jornadas de Automática*. Universidade da Coruña. Servizo de Publicacións, 2023, pp. 265–270.

[10] C. Hernandez, O. Ravn, and P. Valero, "The aalborg university po-pbl model from a socio-cultural learning perspective," *Journal of problem based learning in higher education*, vol. 3, no. 2, 2015.

[11] M. A. Tocora and C. H. Hernández, "Investigación en enseñanza de las ciencias en colombia: estudio desde sus cosificaciones," *Educación y Educadores*, vol. 23, no. 1, pp. 47–68, 2020.

[12] J. García-Zubía, I. A. Martínez, and J. V. Sáez, "Maqueta open hardware para asignaturas de electrónica programable," in *Libro de actas TAEE 2022 XV Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica: Livro de procedimentos TAEE 2022 XV Conferência em Tecnologia, Aprendizagem e Ensino da Eletrónica= Proceedings book TAEE 2022 XV International Conference of Technology, Learning and Teaching of Electronics*. Escuela Universitaria Politécnica de Teruel, 2022, p. 24.

[13] R. Navas-González, Ó. Oballe-Peinado, J. Castellanos-Ramos, D. Rosas-Cervantes, and J. A. Sánchez-Durán, "Practice projects for an fpga-based remote laboratory to teach and learn digital electronics," *Information*, vol. 14, no. 10, p. 558, 2023.

[14] S. R. Yesa, J. García-Zubía, J. L. G. Temiño, J. V. Sáez, and I. A. Martínez, "Uso de un laboratorio remoto de fpgas para la realización de prácticas en grados de ingeniería," in *XIV Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica: Proceedings TAEE 2020= XIV Conferência em Tecnologias Aplicadas ao Ensino da Eletrónica= XIV Conference on Technology, Teaching and Learning of Electronics*. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2020, pp. 293–300.

[15] D. Inc. (2016) Basys2 overview. [Online]. Available: https://digilent.com/reference/_media/basys2:basys2_rm.pdf

[16] M. A. Rubio, R. Romero-Zaliz, C. Mañoso, and A. P. de Madrid, "Closing the gender gap in an introductory programming course," *Computers & Education*, vol. 82, pp. 409–420, 2015.

[17] N. Spolaôr and F. B. V. Benitti, "Robotics applications grounded in learning theories on tertiary education: A systematic review," *Computers & Education*, vol. 112, pp. 97–107, 2017.

[18] J. Á. Ariza, "Bringing active learning, experimentation, and student-created videos in engineering: A study about teaching electronics and physical computing integrating online and mobile learning," *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 31, no. 6, pp. 1723–1749, 2023.

[19] J. P. Goetz and M. D. Lecompte, *Etnografía y diseño cualitativo en investigación educativa*. Morata Madrid, 1988, vol. 1.

[20] C. H. Yu, "An introduction to computing and interpreting cronbach coefficient alpha in sas," in *Proceedings of 26th SAS User Group International Conference*, vol. 2225. SAS Institute Inc. Cary, NC, 2001, pp. 1–6.

[21] A. Bandura, W. H. Freeman, and R. Lightsey, "Self-efficacy: The exercise of control," 1999.

[22] K. M. Whitcomb, Z. Y. Kalender, T. J. Nokes-Malach, C. D. Schunn, and C. Singh, "Comparison of self-efficacy and performance of engineering undergraduate women and men," *International Journal of Engineering Education*, vol. 36, no. 6, pp. 1996–2014, 2020.

[23] L. Hirshfield and D. Chachra, "Experience is not mastery: Unexpected interactions between project task choice and measures of academic confidence and self-efficacy in first-year engineering students," *International Journal of Engineering Education*, vol. 35, no. 3, pp. 806–823, 2019.

[24] M. Savin-Baden, *Facilitating problem-based learning*. McGraw-Hill Education (UK), 2003.

PÓSTERES 2 – SESIÓN DE PÓSTERES

Proyectos de Electrónica Analógica para promover el aprendizaje activo

Leyre Escribano
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicaciones
Public University of Navarra
Pamplona, Navarra, Spain
escribano.121299@e.unavarra.es

Santiago Tainta
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicaciones
Public University of Navarra
Pamplona, Navarra, Spain
santiago.tainta@unavarra.es

María José Erro
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicaciones
Public University of Navarra
Pamplona, Navarra, Spain
mjose.erro@unavarra.es

***Abstract*— En este trabajo se presenta una propuesta para incluir el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) en un curso de Electrónica Analógica. Para ello, se han desarrollado varios proyectos para ser implementados en un curso avanzado de grado, cubriendo conceptos relacionados con amplificadores, osciladores y filtros activos. Además, se presentan los resultados obtenidos tras la implantación de uno de estos proyectos en una asignatura de la titulación de Ingeniería en Tecnologías Industriales.**

Keywords*— *Electrónica Analógica, Aprendizaje Basado en Proyectos

I. INTRODUCCIÓN

En el dinámico mundo de la enseñanza en ingeniería, los métodos tradicionales que se centran exclusivamente en impartir conocimientos teóricos generan un vacío entre el aprendizaje y la aplicación en el mundo real. Esto puede dejar a los graduados sin preparación para los retos prácticos que encontrarán en sus carreras profesionales. Para superar esta carencia, los profesores recurren cada vez más al aprendizaje basado en proyectos (ABP) [1]. Este atractivo enfoque sitúa a los estudiantes en el centro de su aprendizaje, permitiéndoles abordar problemas prácticos en escenarios reales simulados.

El ABP ofrece multitud de ventajas a los estudiantes de las disciplinas de ingeniería [2-4]. A diferencia de las clases tradicionales, el ABP fomenta el pensamiento crítico y la capacidad de resolución de problemas al exigir a los estudiantes que se impliquen activamente en el material estudiado. Además, el estudiantado aprende a definir problemas, investigar soluciones y aplicar conocimientos teóricos en un contexto práctico. Esta experiencia práctica permite al estudiantado desarrollar valiosas habilidades técnicas, ganar confianza en sus capacidades y cultivar una comprensión más profunda de los conceptos subyacentes. Además, el ABP fomenta el trabajo en equipo y la colaboración, preparando a los estudiantes para la naturaleza colaborativa del trabajo de ingeniería.

El ABP ha demostrado su eficacia en el campo de la enseñanza de la electrónica analógica, logrando resultados positivos entre los estudiantes [5-8]. Sin embargo, existe un vacío en la bibliografía con respecto a los detalles específicos de la aplicación del ABP en este ámbito. Muchos estudios se limitan a mencionar el uso de proyectos sin profundizar en su ejecución concreta. Este artículo aborda esta laguna presentando una serie de propuestas de ABP desarrolladas en el marco de un trabajo fin de grado [9]. A continuación, se detalla la implementación de estas ideas en un curso específico de electrónica analógica [10]. Por último, se presentan los resultados obtenidos en las encuestas realizadas a los alumnos para evaluar la eficacia del planteamiento.

II. CONTEXTUALIZACIÓN

Los métodos tradicionales de enseñanza de la electrónica analógica, aunque eficaces para establecer una base de conocimientos teóricos y habilidades básicas de análisis de circuitos, a menudo resultan insuficientes para preparar a los estudiantes para las realidades de la ingeniería del mundo real. Este enfoque, que se basa en gran medida en clases magistrales, sesiones de resolución de problemas y actividades de laboratorio programadas, fomenta un entorno de aprendizaje pasivo. Los estudiantes reciben información predigerida, lo que limita las oportunidades de desarrollar el pensamiento crítico, la investigación independiente y la capacidad creativa para resolver problemas.

Estas limitaciones se extienden tanto a las sesiones de resolución de problemas como a las actividades de laboratorio. Los conjuntos de problemas tradicionales, centrados en ejemplos bien definidos de los libros de texto, carecen de la naturaleza abierta de los escenarios del mundo real. Los alumnos pueden convertirse en expertos en la aplicación de fórmulas, pero les cuesta trasladar esos conocimientos a situaciones con datos incompletos, requisitos contradictorios y retos inesperados. Del mismo modo, las sesiones de laboratorio guionizadas dificultan el desarrollo de habilidades cruciales como la resolución independiente de problemas, la iteración del diseño y la capacidad de adaptación. Al seguir un protocolo predeterminado, los estudiantes pierden oportunidades de explorar conceptos de diseño, experimentar con soluciones alternativas y sortear problemas imprevistos, todos ellos elementos esenciales para tener éxito en la complejidad de los proyectos de ingeniería del mundo real.

Para subsanar estas deficiencias, proponemos incorporar un proyecto al plan de estudios de una asignatura de electrónica analógica. Este proyecto tendería un puente entre el conocimiento teórico y la aplicación práctica implicando activamente a los estudiantes en el diseño y construcción de circuitos. Para garantizar el éxito, este proyecto se llevaría a cabo dentro de un curso avanzado, donde los estudiantes poseen una comprensión básica de los principios de electrónica analógica que incluyen:

- Análisis de circuitos con impedancias resistivas, capacitivas e inductivas
- Conocimientos básicos de dispositivos electrónicos basados en semiconductores (diodos, transistores BJT y MOSFET)

- Conocimientos de las características principales y el análisis de amplificadores operacionales

También se considera que los estudiantes poseen una formación básica previa en simulación de circuitos y cierta experiencia trabajando con circuitos montados en protoboard. Además, para participar con éxito en este proyecto será necesario tener conocimientos básicos de resolución de problemas al ensamblar circuitos y estar familiarizado con el equipo de laboratorio.

III. Propuesta de Proyectos

El objetivo de los proyectos desarrollados es que los alumnos adquieran conocimientos en tres áreas concretas de la electrónica analógica, aunque la propuesta podría ampliarse fácilmente a otros temas. La primera es el diseño de amplificadores, donde los alumnos explorarán el diseño y construcción de circuitos de amplificación utilizando transistores o amplificadores operacionales. Esto incluye el análisis y cálculo de la ganancia dentro del ancho de banda de trabajo. En segundo lugar, se incidirá en el diseño de osciladores sintonizados, introduciendo a los estudiantes en el Criterio de Barkhausen y su aplicación en el cálculo de la frecuencia de oscilación. El objetivo es aprender a diseñar y construir un circuito oscilador sintonizado. Por último, la tercera área de interés será el filtrado de señales, donde los estudiantes adquirirán experiencia práctica en el diseño e implementación de filtros activos para la selección de la frecuencia deseada y la amplificación de la señal. Esto incluye el cálculo de la función de transferencia y el análisis de la respuesta en frecuencia del filtro.

Para sentar las bases de esta propuesta, se desarrollaron inicialmente tres proyectos distintos en el marco de un trabajo de fin de grado [9]. Esta referencia proporciona una exploración exhaustiva de los proyectos desarrollados, incluyendo análisis teóricos detallados, simulaciones empleando LTSpice y resultados experimentales. Cada proyecto refuerza los objetivos de aprendizaje básicos descritos anteriormente, a la vez que expone a los estudiantes a circuitos integrados y dispositivos de uso común empleados en electrónica analógica. Los proyectos se diseñaron intencionadamente para que fueran estimulantes y atractivos, pero manteniendo una estructura modular. Esta modularidad cumplía un doble propósito: permitir a los estudiantes analizar y ensamblar progresivamente los proyectos en bloques diferenciados y facilitar el proceso de aprendizaje al permitirles centrarse en subcircuitos individuales antes de integrarlos en el sistema más amplio. Con este planteamiento, se esperaba que los alumnos afianzaran su comprensión de los conceptos teóricos clave y adquirieran experiencia práctica en el diseño y la construcción de circuitos electrónicos

A. *Proyecto 1: Oscilador*

El primer proyecto propuesto introduce un circuito oscilador con un zumbador como salida. Este oscilador utiliza una resistencia dependiente de la luz (LDR) cuya resistencia varía en función de la intensidad de la luz incidente. En consecuencia, la frecuencia de salida del oscilador se correlaciona directamente con la cantidad de luz recibida por el sensor. El objetivo principal de este proyecto es la exploración de osciladores sintonizados.

La integración del zumbador sirve para convertir la frecuencia de onda de salida del oscilador en una frecuencia sonora audible. Para determinar las posibles frecuencias que reproducirá el zumbador, los alumnos han de profundizar en el estudio del Criterio de Barkhausen. Además, el proyecto incorpora el uso de LDRs y zumbadores, proporcionando a los estudiantes la oportunidad de adquirir experiencia práctica con estos componentes.

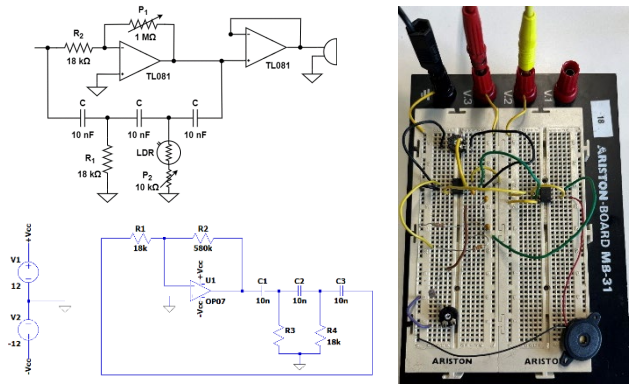


Fig. 1. Proyecto 1: esquemático (arriba izquierda), simulación (abajo izquierda) y montaje experimental (derecha).

B. *Proyecto 2: Afinador de guitarra*

El segundo proyecto desafía a los estudiantes a montar un afinador electrónico de guitarra, un dispositivo que les permite observar la diferencia de frecuencia entre una señal sonora y una frecuencia de referencia predefinida. La señal sonora se somete a un proceso de tres etapas dentro del afinador electrónico.

La primera etapa (Fig. 2) se centra en el estudio y la utilización de un micrófono electret. Los estudiantes aprenden cómo el micrófono transforma la señal sonora entrante en una señal de tensión. Además, exploran la amplificación basada en transistores, analizando la amplificación proporcionada en relación con la polarización de los transistores conseguida mediante componentes discretos.

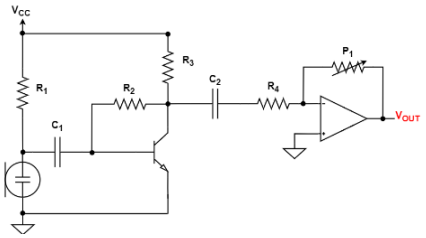


Fig. 2. Proyecto 2: esquemático de la primera etapa.

La segunda etapa utiliza un filtro paso banda activo de realimentación múltiple (MFB). Los alumnos se adentran en el estudio de la función de transferencia del filtro, con el objetivo de conseguir un ancho de banda estrecho centrado en la frecuencia de referencia. Este proceso da como resultado una señal con una amplitud directamente proporcional al grado de sintonización.

La etapa final (Fig. 3) incorpora diez LEDs y el circuito integrado LM3914 para representar visualmente el grado de sintonía. Los estudiantes adquieren una comprensión completa de la función del circuito integrado y su aplicación práctica dentro del sintonizador.

C. *Proyecto 3: Transmisor infrarrojos*

El último proyecto desarrollado se centra en el diseño e implementación de un sistema de transmisión de señales infrarrojas moduladas. Para mitigar la influencia de la luz

ambiental en la fidelidad de la transmisión, el proyecto emplea técnicas de modulación y demodulación en amplitud.

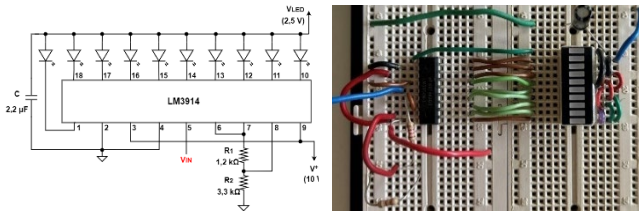


Fig. 3. Proyecto 2: esquemático (izquierda) y montaje experimental (derecha) de la tercera etapa

En la etapa de transmisión se emplean tres circuitos distintos. El primer circuito genera una onda cuadrada que sirve de señal portadora. En esta etapa se introduce el circuito integrado temporizador 555 y se explora su funcionamiento en el modo oscilador astable. El segundo circuito (Fig. 4 izquierda) se ocupa de la modulación de la señal transmitida. Utilizando un transistor, los alumnos adquirirán experiencia práctica en la multiplicación de las señales portadora y de datos. Dado que la transmisión utiliza un LED infrarrojo, se introduce un tercer circuito que incorpora un amplificador de transconductancia (Fig. 4 derecha). Este amplificador, compuesto por un amplificador operacional y un transistor, convierte la señal de tensión en una señal de corriente proporcional, adecuada para el funcionamiento del LED infrarrojo transmisor.

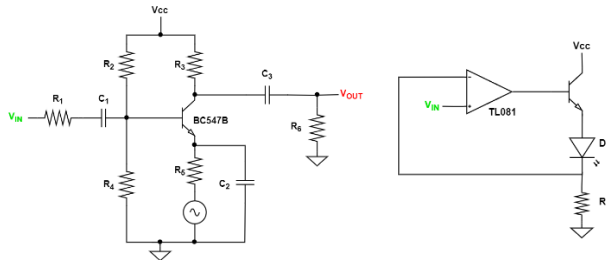


Fig. 4. Proyecto 3: esquemáticos del circuito de modulación (izquierda) y driver del LED (derecha).

La señal recibida es captada en la etapa receptora por un fototransistor. La demodulación y amplificación de la señal recibida se consiguen utilizando un filtro pasabanda activo de configuración Sallen-Key. En esta etapa los estudiantes profundizan en el análisis de la función de transferencia del filtro para determinar los elementos óptimos para conseguir las características de ancho de banda y ganancia deseadas.

IV. Implementación de la propuesta

Los autores optaron por implementar la propuesta durante el semestre de otoño del curso 2023/24 dentro de la asignatura "Sistemas Electrónicos Analógicos" [10], que se imparte en el séptimo semestre del Grado en Tecnologías Industriales, en la especialidad de Electrónica Industrial. Se trata, por tanto, de una asignatura que cursan estudiantes próximos a graduarse e incorporarse al mundo laboral. Por ello, se considera de gran importancia que, además de los conocimientos y prácticas correspondientes a los contenidos de electrónica analógica incluidos en la titulación, se haga hincapié en la adquisición de las competencias que necesitarán ejercer en su desarrollo profesional. Además, esta asignatura forma parte de un proyecto de innovación docente (dentro de la convocatoria interna de la UPNA PINNE-2022), promovido por la ETSIIIT (Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicaciones) y la coordinación docente del área de electrónica en los estudios de ingeniería. El objetivo de dicho proyecto es promover una formación más aplicada a través de metodologías activas a la formación universitaria, así como impulsar un cambio positivo en la percepción y motivación que los estudiantes de grado y máster tienen la electrónica [11].

La asignatura cuenta con sólo 30 horas lectivas, de las cuales 15 se dedicaban inicialmente al montaje y análisis de circuitos propuestos por el profesor en sesiones de laboratorio tradicionales. Por tanto, se decidió que, para el desarrollo de la actividad, se eliminaría esta parte del curso, y se dedicarían estas horas a la realización de un proyecto. No sólo eso, sino que todo el curso se desarrolló en torno al citado proyecto. Los objetivos eran, por un lado, aumentar la motivación de los alumnos y, por otro, trabajar habilidades como el trabajo en equipo, la planificación de tareas y la evaluación crítica de su ejecución, la práctica de la electrónica enfocada más al diseño que al análisis, así como en la elección de productos comerciales y la correcta interpretación de las hojas de datos. Además, en este curso había un número relativamente reducido de alumnos matriculados (28 en total), por lo que se decidió dividir la clase en cuatro grupos de 7 alumnos y que todos los grupos realizaran el mismo proyecto por separado, comparando al final los resultados y su relación con las estrategias de diseño y formas de trabajo adoptadas.

Los objetivos de aprendizaje de la asignatura incluyen la aplicación de etapas de amplificación basadas en transistores, osciladores y filtros activos. Por ello, se proporcionó a los estudiantes un diagrama de bloques (Fig. 5) que esbozaba la estructura general del proyecto. Las secciones sombreadas representan los tres módulos que los estudiantes debían diseñar a partir de componentes fundamentales (amplificadores operacionales, transistores, resistencias, condensadores, etc.). Estos módulos ofrecían a los estudiantes la oportunidad de ejercitar la libertad de diseño dentro de las limitaciones de la utilización de transistores discretos para la amplificación y filtros activos para el procesamiento de señales. El proceso de diseño fue similar al esbozado en el trabajo fin de grado, incluyendo justificación y análisis teóricos, simulaciones, construcción física en una protoboard y medición del rendimiento. Se previeron ciclos de perfeccionamiento iterativo como parte natural del proceso de diseño para lograr los resultados deseados. Para los módulos no sombreados, los estudiantes utilizaron circuitos integrados disponibles en el mercado. Este aspecto del proyecto pretendía introducirles en una gama más amplia de circuitos integrados y desarrollar sus habilidades para seleccionar los componentes adecuados basándose en las especificaciones de las hojas de datos. Además, los estudiantes adquirieron experiencia en la utilización de la información facilitada por los fabricantes, en la realización de simulaciones exhaustivas y la caracterización experimental de todo el prototipo para establecer sus rangos operativos y especificaciones de rendimiento.

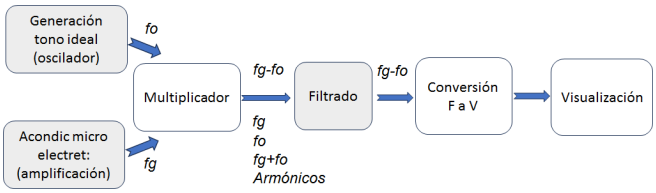


Fig. 5. Diagrama de bloques del proyecto propuesto.

En cada grupo, un alumno elegido por ellos mismos actuó como responsable encargado de la coordinación, la toma de decisiones finales, la documentación y el diálogo con el profesor. Los otros seis se dividieron en tres parejas, cada una de las cuales supervisó uno de los tres módulos principales del proyecto, de forma que los tres subgrupos tuvieron que avanzar en paralelo para implementar el prototipo final. Además, quedaba al libre albedrío de todo el grupo decidir quién y cómo se encargaba de conocer, analizar y garantizar el funcionamiento en laboratorio de los módulos comerciales. Esta división de tareas pretende emular un entorno común en la realidad del diseño electrónico empresarial, obligando a cada subgrupo a comunicar al resto cuáles son los requisitos de su módulo y sus especificaciones para conseguir, mediante la unión de elementos desarrolladas en paralelo, un prototipo final con las características deseadas. Esto obliga a los alumnos a desarrollar soft-skills como la redacción técnica de necesidades y objetivos y su comunicación, el trabajo en equipo, el establecimiento de planes de trabajo y plazos de ejecución.

Para garantizar la comprensión global de todo el sistema dentro de cada grupo, el proyecto incorporó actividades de difusión después de cada fase de diseño. Estas actividades requerían que los estudiantes presentaran sus progresos y resultados a sus compañeros de grupo para garantizar la difusión del conocimiento. Estas actividades estaban enfocadas a que todos los miembros del equipo conocieran los fundamentos y el trabajo realizado en torno a cada uno de los bloques del prototipo final, aunque no fueran la pareja directamente responsable del mismo. De este modo, los alumnos afianzaban su propia comprensión de cada módulo y se aseguraban de que todos los miembros del grupo poseían los conocimientos necesarios. Además, este enfoque fomentaba el aprendizaje colaborativo y la evaluación crítica, ya que estas presentaciones fomentaban el debate y la evaluación entre compañeros. Los estudiantes analizaron las propuestas de diseño de cada módulo y evaluaron su idoneidad dentro del esquema general del circuito. Este entorno de aprendizaje colaborativo animó a los estudiantes a aprender unos de otros y a perfeccionar su comprensión del sistema completo.

La evaluación de la asignatura se realizó en base tres partes diferenciadas. Una de ellas era el examen individual con un peso del 50% de la nota final, con preguntas teórico-prácticas y ejercicios sobre los contenidos de la asignatura. Un 10% de la nota final se obtenía con las actividades de divulgación realizadas a lo largo del semestre, normalmente en los grupos de trabajo formados para el proyecto. También se evaluaba la progresión semanal o quincenal (en función del número de sesiones de aula o laboratorio dedicadas al trabajo en grupo) del proyecto. Por último, el 40% de la nota procedía de la evaluación directa del proyecto. Para llevar a cabo esta evaluación, se elaboró una rúbrica con diez indicadores y cinco niveles de logro para cada uno de ellos. Los indicadores o criterios contenidos en la rúbrica incluían aspectos como la gestión de la información, la gestión de tareas y tiempos, la documentación del proyecto, las especificaciones técnicas alcanzadas, el nivel de autonomía y creatividad mostrado, la capacidad de interpretación y análisis crítico de los resultados, etc.

V. RESULTADOS

Para evaluar el grado de satisfacción del alumnado se realizaron dos encuestas, una el primer día de clase y otra el último. El objetivo era intentar discriminar el nivel de interés por la electrónica de los alumnos, su adherencia a la especialidad elegida y si estos parámetros se modificaban a lo largo del semestre. Dado que la propuesta se llevó a cabo durante el presente curso académico, sólo se dispone de datos de un único grupo de 28 alumnos. Las encuestas consistieron en varias preguntas con ítems dirigidos a medir la motivación de los alumnos por el estudio de la electrónica y su valoración de la metodología ABP, así como una sección de respuesta libre para dar su opinión sobre el curso. Para responder a las preguntas se utilizó una escala Likert de acuerdo, en la que los participantes eligen entre cinco posibles respuestas (1.- Totalmente en desacuerdo, 2- En desacuerdo, 3- Neutral, 4- De acuerdo, 5- Totalmente de acuerdo). La encuesta inicial arrojó una tasa de respuesta insuficiente para generar datos estadísticamente significativos. Por el contrario, la segunda encuesta obtuvo un alto índice de cumplimentación, superior al 90% de los alumnos matriculados. Por consiguiente, nuestro análisis se centrará en los resultados de la segunda encuesta.

TABLA I. PREGUNTAS SEGUNDA ENCUESTA

P1	Aprender a través del proyecto me pareció una alternativa mejor que la clase presencial.
P2	Desarrollar un proyecto contribuyó más a mi aprendizaje que las habituales sesiones guiadas de laboratorio
P3	El proyecto me pareció estimulante y desafiante.
P4	El proyecto permitió aprender y contextualizar el contenido de la asignatura
P5	Realizar el proyecto y otras actividades en grupo me resultó más estimulante y beneficioso que el estudio individual.
P6	Considero una buena idea dividir el proyecto en varios bloques a cargo de diferentes personas, para aprender a coordinarnos y comunicarnos y conseguir mayores objetivos.
P7	Escribir, completar y evaluar las actividades de autoevaluación contribuyó a mantener la asignatura al día y a un mejor aprendizaje
P8	El proyecto me estimuló a practicar habilidades que me permiten adaptarme a situaciones nuevas e inesperadas
P9	Mi interés por la electrónica ha aumentado gracias a la asignatura.
P10	La asignatura ha contribuido a mejorar mi percepción de la electrónica y de la especialidad.

La Tabla 1 muestra las diez preguntas utilizadas para la segunda encuesta y las respuestas obtenidas se presentan en la Tabla 2. El aumento de la motivación de los participantes, uno de los objetivos perseguidos, puede considerarse parcialmente conseguido, aunque todavía queda margen de mejora, ya que la P10 obtuvo una puntuación media de 3,7. Es, sin embargo, incontestable, a la luz de los resultados del, que los alumnos valoran positivamente la realización de un proyecto, tanto porque mejora su aprendizaje de la materia como porque les permite desarrollar otras habilidades. Es significativo que casi todos los comentarios positivos recibidos en la respuesta libre de esta encuesta se refieran precisamente a la introducción del proyecto. A partir de estas respuestas, también es posible percibir las dificultades que ha supuesto esta nueva metodología: el tiempo dedicado al proyecto les puede parecer excesivo y tienen dudas sobre si compensa reducir las actividades más tradicionales. Así, los alumnos echan de menos la resolución de ejercicios convencionales e incluso explicaciones teóricas, sobre todo porque les preocupa la

evaluación con el examen tradicional. Para futuros cursos, habría que plantearse cómo responder a este reto.

TABLA II RESPUESTAS A LA SEGUNDA ENCUESTA

	Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Neutral	De acuerdo	Totalmente de acuerdo	Media
P1	0	1	2	12	10	4,2
P2	1	1	2	13	8	4,0
P3	1	2	5	6	11	4,0
P4	0	2	4	9	10	4,1
P5	0	0	4	11	10	4,2
P6	0	3	6	10	6	3,8
P7	1	2	10	11	1	3,4
P8	0	1	7	9	8	4,0
P9	2	3	10	6	4	3,3
P10	0	1	10	10	4	3,7

Además de las opiniones de los alumnos, es interesante analizar los resultados académicos obtenidos (Tabla 3). Aunque en años anteriores el porcentaje de alumnos que se presentaban al examen ya era alto, este año ha aumentado, lo que puede deberse a que las horas y el esfuerzo dedicados al proyecto les hace sentirse más implicados con la asignatura y evita que la abandonen. Los resultados también son mejores, con un claro aumento del número de alumnos que aprueban la asignatura.

TABLA III RESULTADOS ACADÉMICOS

	Estudiantes presentados (% de matriculados)	Estudiantes aprobados (% de matriculados)
21/22	89	70
22/23	94	79
23/24	97	86

VI. CONCLUSIONES

Este estudio investigó el potencial de la metodología de Aprendizaje Basado en Proyectos para mejorar la experiencia de aprendizaje en cursos de Electrónica Analógica para estudiantes de Ingeniería Industrial. Los objetivos principales eran fomentar una comprensión más significativa y práctica de la materia, alineándola con las necesidades del mundo profesional, y aumentar la motivación de los estudiantes. Se diseñaron una serie de proyectos PBL en el marco de un proyecto fin de carrera para abarcar el currículo típico de estos cursos. Tras las modificaciones oportunas, uno de estos proyectos se implementó durante el semestre de otoño del curso 2023-2024 dentro de la asignatura "Sistemas Electrónicos Analógicos" ofertada a los alumnos de séptimo semestre de Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Universidad Pública de Navarra.

Los resultados, basados en encuestas a los estudiantes y en el rendimiento académico, proporcionaron pruebas de la eficacia del ABP. En comparación con los métodos tradicionales, el nuevo enfoque demostró un potencial significativo para mejorar la adhesión y el gusto de los alumnos por la electrónica, sus competencias transversales y el aprendizaje sólido y reflexivo de los contenidos curriculares de la asignatura. Sin embargo, el estudio también identificó algunos retos asociados a la transición a un entorno de aprendizaje más autónomo. Algunos estudiantes expresaron su incomodidad ante una estructura más basada en la transmisión tradicional de contenidos por parte del profesor. Para abordar estas preocupaciones y garantizar una experiencia de aprendizaje más fluida en futuras iteraciones, las fases iniciales de la implantación del ABP incorporarán apoyo y orientación adicionales para los estudiantes. Además, los métodos de evaluación, en particular los exámenes, se adaptarán para reflejar mejor los conocimientos y competencias adquiridos mediante el enfoque basado en proyectos.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en esta comunicación forma parte de la convocatoria de proyectos de innovación educativa PINNE 2022 de la Universidad Pública de Navarra.

REFERENCIAS

[1] J. Chen, A. Kolmos and X. Du, “Forms of implementation and challenges of PBL in engineering education: a review of literature.” *European J. of Eng. Education*, vol. 4, no.1, 2021, doi:. 10.1080/03043797.2020.1718615.

[2] Ghannam R, Chan C, “Teaching undergraduate students to think like real-world systems engineers: A technology-based hybrid learning approach.” *Systems Engineering.* 2023; 26,:728–741, https://doi.org/10.1002/sys.21683

[3] X. Yang, "An Approach of Project-Based Learning: Bridging the Gap Between Academia and Industry Needs in Teaching Integrated Circuit Design Course," *IEEE Transactions on Education*, vol. 64, no. 4, pp. 337-344, Nov. 2021, doi: 10.1109/TE.2021.3050450.

[4] H. Fan *et al.*, "Interdisciplinary Project-Based Learning: Experiences and Reflections From Teaching Electronic Engineering in China," *IEEE Transactions on Education*, vol. 66, no. 1, pp. 73-82, Feb. 2023, doi: 10.1109/TE.2022.3186184

[5] D. Kataria and G. Sanchez, "Design on Project-Based Learning for Analog Circuits," *2020 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, Uppsala, Sweden, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/FIE44824.2020.9273954.

[6] B. N. Savant and S. S. Pawar, "Implementation of Project Oriented Problem Based Learning in the Analog Electronics Course," *2017 International Conference on Transforming Engineering Education (ICTEE)*, Pune, India, 2017, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICTEED.2017.8585813

[7] A. Mantri, S. Dutt, J. P. Gupta and M. Chitkara, "Design and Evaluation of a PBL-Based Course in Analog Electronics," *IEEE Transactions on Education*, vol. 51, no. 4, pp. 432-438, Nov. 2008, doi: 10.1109/TE.2007.912525.

[8] Martinez, H., “Evolution of guided activities in the teaching of analog Electronics in bachelor's degree in Industrial Electronics and Automatics to Increase the Students' Motivation.” 50th Annual Conference of the European Society for Engineering Education. SEFI 2022, 19-22 September, Barcelona, Spain

[9] L. Escribano, “Desarrollo de proyectos de Electrónica Analógica para fomentar el aprendizaje activo en grados de Ingeniería”, Trabajo Fin de Grado, Universidad Pública de Navarra, 2023, https://hdl.handle.net/2454/46363

[10] https://www.unavarra.es/ficha-asignaturaDOA?languageId=100000&codPlan=242&codAsig=242712&anio=2023

[11] AM. Andueza, A. Urrutia, MJ. Erro, and J. Goicoechea, “Aplicación de metodologías activas basadas en casos reales - Colaboración Universidad-Empresa”, to be presented in TAEE24, XVI Congreso Tecnología Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica, 26-28 de junio 2024, Málaga, España.

Elaboración de Informes Audiovisuales en un Laboratorio de Electrónica Digital

Nicolás Medrano
Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
nmedrano@unizar.es

Daniel Enériz
Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
eneriz@unizar.es

Diego Antolín
Área de Electrónica
Escuela Universitaria Politécnica de la Almunia
Zaragoza, España
dantolin@unizar.es

Belén Calvo
Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
becalvo@unizar.es

***Abstract*—Este trabajo presenta la experiencia adquirida en la implementación del método de elaboración de informes en formato de video de los resultados de las actividades de laboratorio realizadas por los alumnos de la asignatura «Sistemas digitales» perteneciente al Grado en Física de la Universidad de Zaragoza, tanto desde el punto de vista del alumnado y su proceso formativo como del equipo docente y las ventajas observadas en el proceso evaluativo.**

Keywords—Experimentalidad, audiovisual, electrónica digital, laboratorio de prácticas

I. Introducción

El aumento observado en el número de estudiantes que cursan grados universitarios de carácter científico en los últimos años ha tenido como consecuencia, entre otras, la reaparición de perfiles de alumnado más experimental que los existentes en periodos anteriores. Es destacable el aumento en el interés por materias con un contenido claramente aplicado, como es el caso de las asignaturas optativas impartidas por el Área de Electrónica dentro del Grado en Física que se imparte en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza [1].

Por otro lado, la pandemia de 2020 obligó al profesorado de todos los niveles educativos a plantearse soluciones más o menos imaginativas para las nuevas condiciones de docencia. En el caso universitario, se implantaron técnicas como la elaboración y presentación online de materiales, realización de demostradores virtuales y videos formativos, dentro de la docencia no presencial; o la impartición de clases mixtas presenciales-no presenciales que redujeran el aforo de las aulas en los primeros meses tras el desconfinamiento. Del mismo modo, en muchos casos se implantó la elaboración de informes de laboratorio y trabajos de asignatura en formatos electrónicos, principalmente empleando formatos portátiles de documentos, como PDF. La necesidad de manipular documentos electrónicos, tanto por parte del estudiantado como del profesorado, nos obligó a familiarizarnos con diversas herramientas de edición audiovisual sencilla de dominio público para grabado [2] y edición [3] de video, que facilitan la realización de documentos gráficos empleando solamente dispositivos electrónicos accesibles a la gran mayoría del alumnado, como son un teléfono móvil, una tableta o un computador personal. Como consecuencia de ello, tras una reflexión sobre las oportunidades que estas herramientas ofrecen en la elaboración de documentación gráfica, el profesorado involucrado en la impartición de la asignatura optativa «Sistemas digitales» decidió en el curso 2020-2021 realizar un proyecto piloto ofreciendo a los estudiantes la posibilidad de realizar tanto sus informes de prácticas como del trabajo final, todos ellos evaluables, en formato video. Con ello se pretendía suprimir la dificultad que supone la elaboración de un informe escrito que refleje con precisión y sencillez la evolución temporal de sistemas cuyo estado cambia en función de una serie de condiciones, como son los sistemas secuenciales en electrónica digital: una descripción textual con apoyo de imágenes estáticas puede resultar incompleta y muy difícil de seguir.

Este trabajo presenta la experiencia del equipo docente de la asignatura optativa «Sistemas digitales» del Grado en Física de la Universidad de Zaragoza, en la implantación de la elaboración de informes de laboratorio mediante presentaciones audiovisuales, y la aplicación de evaluación por pares de los resultados, ponderada mediante criterios del equipo docente. La organización del trabajo presentado es la siguiente: La Sección II contextualiza el trabajo, la Sección III presenta las líneas básicas de la propuesta de proyecto, así como la metodología a seguir por parte de los estudiantes. La Sección IV describe el desarrollo práctico de la experiencia presentada a lo largo de los 4 años de experiencia. En la Sección V se presenta una breve valoración de los resultados obtenidos. Finalmente, la Sección VI propone las conclusiones del trabajo junto con algunas líneas de trabajo futuro.

II. Contexto

El Grado en Física de la Universidad de Zaragoza consta de 240 créditos, se desarrolla en cuatro años e integra cinco módulos: básico, métodos matemáticos, física clásica, estructura de la materia y técnicas físicas, además de asignaturas optativas específicas y el trabajo fin de Grado. La parte experimental del grado consta de un módulo obligatorio, Técnicas Físicas, de 24 ECTS, que se distribuye en tres asignaturas obligatorias, impartidas en los tres últimos cursos del Grado. En particular, los créditos asociados a las materias de Electrónica se centran en el análisis y diseño de sistemas de procesamiento de señales, así como técnicas e instrumentación para la adquisición y medida mediante sistemas controlados por computador (tarjetas de adquisición de datos, protocolo VISA, etc.).

Este trabajo se realiza gracias al apoyo institucional de la Convocatoria competitiva de Proyectos de Innovación de la Universidad de Zaragoza (PI_DTOST) en el año 2023 y con referencia ID 4824 con título «El video como herramienta de elaboración de informes de laboratorio en asignaturas experimentales».

Para complementar la formación experimental en el ámbito electrónico, y dentro del campo de la instrumentación, en el segundo cuatrimestre del cuarto curso del Grado en Física se oferta la asignatura optativa de «Sistemas digitales» de 5 créditos ECTS de duración (3 de sesiones teóricas, 0.5 de problemas y 1.5 de prácticas de laboratorio). Partiendo de las puertas lógicas como bloques constitutivos de sistemas digitales secuenciales y combinacionales, en la asignatura se llega hasta la descripción funcional de un microcontrolador sencillo tipo ATmega328p. Debido a las limitadas horas de que dispone la asignatura, se incide en la parte más experimental de los contenidos, potenciando las horas de presencia en el laboratorio frente a las de clase problemas. De esta forma, las sesiones de problemas se desarrollan en el laboratorio, donde se abordan los tópicos presentes en el temario desde una perspectiva más aplicada. El objetivo final es que el alumnado sea capaz de adentrarse en el empleo del microcontrolador como un sistema integrado y compacto, capaz de ejecutar procesos de monitorización, medida y actuación de manera autónoma o interactuando con un PC.

III. Metodología

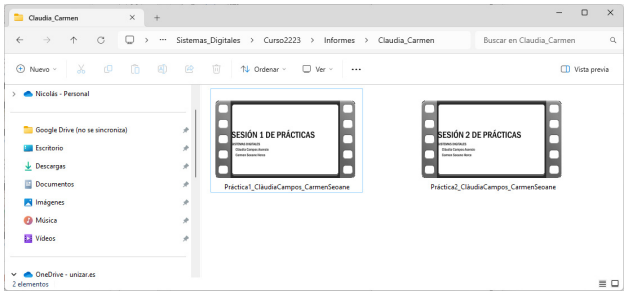
De acuerdo con la experiencia docente del equipo en otras asignaturas, y después de consensuarlo con el alumnado de la asignatura, a partir del curso 2020-2021 se ha implantado la elaboración de los informes de laboratorio y la memoria de trabajo final de la asignatura «Sistemas digitales» en formato audiovisual, extendiendo del laboratorio de simulación al físico las propuestas de otros autores [4][5][6]. Los grupos de prácticas están constituidos por dos estudiantes, permitiendo de forma excepcional la constitución de grupos de tres personas, en particular para la realización del trabajo final. Para grabar la dinámica de los sistemas construidos por los estudiantes, éstos emplean sus dispositivos móviles, grabando en video la evolución y funcionamiento de los diferentes sistemas construidos en el laboratorio. Serán esos archivos la base con la que el alumnado elaborará sus informes.

A. *Informes de prácticas de laboratorio*

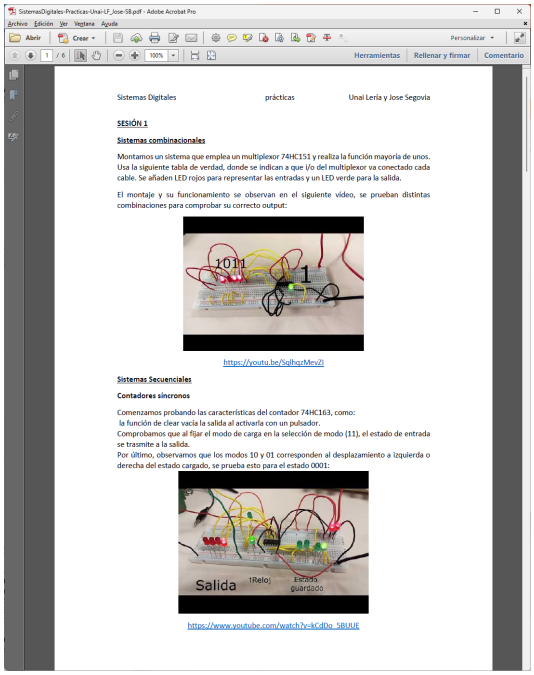
El formato de los informes de cada una de las dos prácticas de la asignatura (consistentes cada una en dos sesiones de 2.5 h de duración) es flexible, dejándose a elección de los estudiantes. Los más comunes en los tres años que se lleva a cabo la experiencia han sido (Fig. 1):

- Un único video que muestra los resultados de cada uno de los apartados de la práctica de forma consecutiva. Puede ir acompañado de un audio explicativo, cuadros de texto impresos o ambos.
- Un documento PDF con videos incrustados o con enlaces compartidos, independientes para cada apartado o subapartado. En este caso, la explicación de los videos se suele incluir en el texto incorporado en el PDF, sustituyendo las imágenes estáticas por videos breves.
- Presentación en PowerPoint con videos. Similar al caso anterior, sustituyendo documento que soporta los videos.

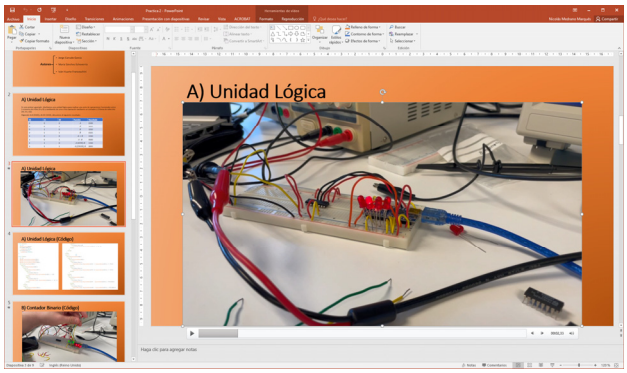
Los criterios de puntuación son similares a los existentes con anterioridad, resultando más sencilla su aplicación al disponer de una evidencia clara de que se han llevado a cabo los apartados propuestos. La puntuación de estas prácticas supone el 40 % de la nota final de la asignatura.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1. Formatos de entrega de informe más comunes: (a) video único para cada experiencia; (b) documento en formato PDF con enlaces a los videos de cada apartado; (c) presentación que combina explicaciones en texto y tablas con videos de la evolución de los sistemas.

B. *Trabajo final*

El 60 % restante de la calificación de la asignatura procede del trabajo final de la asignatura. Este debe tener una duración de 10 horas de laboratorio de trabajo autónomo, más elaboración de memoria y presentación. El profesorado de la asignatura propone una serie de proyectos que deben incluir un microcontrolador (generalmente de la familia Arduino Nano) como elemento de control, adquisición de medidas,

procesado y transmisión. En el curso 2023-2024, la oferta de trabajos propuestos incluía los siguientes:

- Medida de humedad relativa y temperatura con salida por display e indicador auditivo mediante zumbador.
- Control del *snake* sobre display con matrices led.
- Sistema de lectura del pulso cardiaco.
- Adquisición de medidas de un detector Geiger-Müller.
- Encriptación/desencriptación de mensajes mediante LFSR de 32 bits (comunicación por UART).
- Medida de humedad relativa y temperatura y transmisión por RF a un segundo módulo con representación en display.

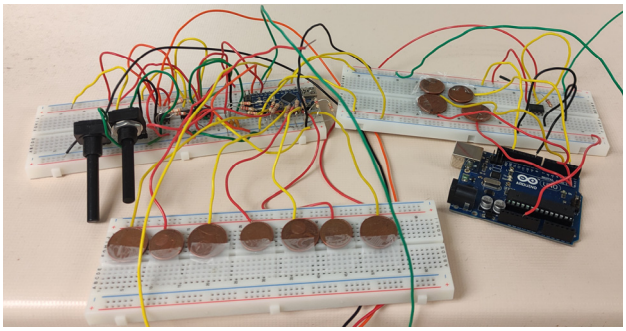
Asimismo, se ofrece a los estudiantes la posibilidad de proponer sus propios trabajos, que son aprobados si la valoración de la dificultad es adecuada (ni demasiado extenso ni demasiado simple) y se dispone del material necesario para su realización. En este último curso, las propuestas aceptadas han incluido:

- Control de riego con medida de humedad relativa de aire, suelo y temperatura, con visualización de medidas y estado por display LED.
- Generación de acordes: piano y batería (Fig. 2a).
- Ruleta de la fortuna (Fig. 2b).
- Tres en raya con dos modos de juego: contra compañero y contra el microcontrolador (Fig. 2c).

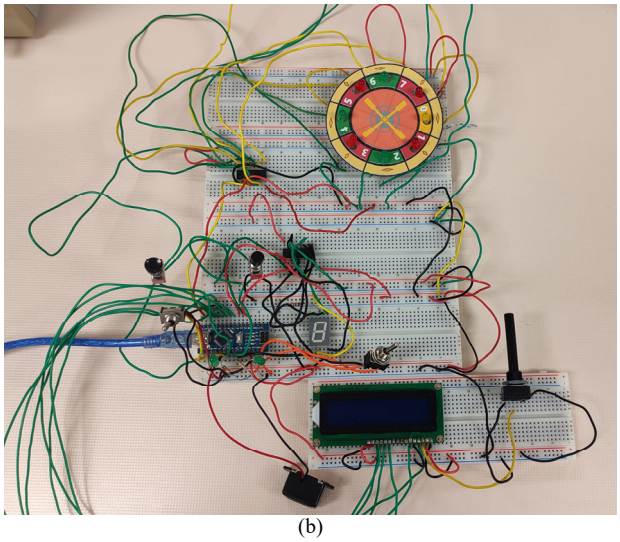
El trabajo final se presenta delante del resto del alumnado, tras lo cual pueden realizar las preguntas que consideren adecuadas. Una vez se han presentado todos los trabajos, el alumnado califica mediante la técnica de revisión por pares el trabajo, presentación y defensa del resto de los grupos con una puntuación justificada del 1 (peor) al 10 (mejor). El profesorado de la asignatura se guarda la opción de modificar la calificación en aquellos casos en los que el esfuerzo o la dificultad del trabajo no se ha mostrado adecuadamente, lo que puede dar lugar a una calificación demasiado baja (algo que ha ocurrido una única vez desde que se comenzó este proceso evaluativo). La Fig. 3 muestra imágenes de las presentaciones de los trabajos de la Fig. 2

IV. Desarrollo del proyecto

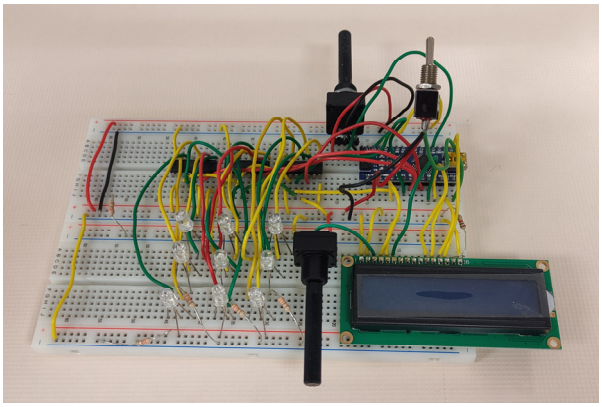
Las sesiones prácticas se programan durante el cuatrimestre de forma que los conocimientos requeridos para llevar a cabo las correspondientes actividades hayan sido presentados previamente en el aula. Las fechas correspondientes se comunican al comenzar el curso, de forma que el estudiante pueda organizar su tiempo. Los trabajos de fin de asignatura se llevan a cabo al final del cuatrimestre, en los meses de noviembre (finales), diciembre y, hasta el curso 2022-2023, comienzos del mes de enero. En ese periodo los estudiantes pueden acceder al laboratorio y al material sin restricciones horarias, salvo las impuestas por el sentido común. Para ello, basta con comunicárselo a alguno de los miembros del equipo docente, que se encargará de darles acceso. En este último curso, al haberse adelantado las fechas del periodo de evaluación no hubo posibilidad de emplear el mes de enero en la realización de los trabajos. Por ello, se ofreció la opción de que los estudiantes pudieran llevarse material a casa y seguir con los desarrollos en los periodos que



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Alguno de los proyectos finales propuestos: (a) generación de acordes; (b) ruleta de la fortuna; (c) Tres en raya con modos de juego.

les fueran más convenientes, facilitando la conciliación con el resto de sus obligaciones.

Una vez concluido el plazo de realización de los trabajos, el alumnado envía al equipo docente los informes de las sesiones de laboratorio para su calificación, así como el documento que emplearán para la presentación de su trabajo. La fecha de presentación se consensua con todo el alumnado, de manera que puedan asistir, durante el periodo de exámenes. Si bien existe una fecha de evaluación de la asignatura, marcada por el decanato de la Facultad, ésta puede no coincidir, a petición de los estudiantes.

En cuanto a la defensa de los trabajos, y dado que este método se puso en práctica durante el curso inmediatamente posterior al de la pandemia, se mantiene la presentación

mediante una reunión virtual a través de Google Meet, de forma que la no presencialidad les permite aprovechar su tiempo de estudio, desconectando de éste sólo el mínimo necesario para las presentaciones. Éstas, de una duración máxima de cinco minutos por trabajo, es seguida en un breve turno de preguntas (de 2 a 5 minutos, máximo), en la que los compañeros y compañeras efectúan las preguntas, observaciones y puntualizaciones que consideren convenientes.

Tras cerrar las presentaciones, el alumnado envía a través de correo electrónico un pequeño formulario con las calificaciones otorgadas al resto de compañeros. Se les solicita asimismo una valoración de la asignatura, en la que se les pide que indiquen qué es lo que más y menos les ha gustado, así como qué consideran que cambiarían. Esta valoración pueden enviarla en cualquier momento, una vez concluido el proceso de entrega de actas de la asignatura.

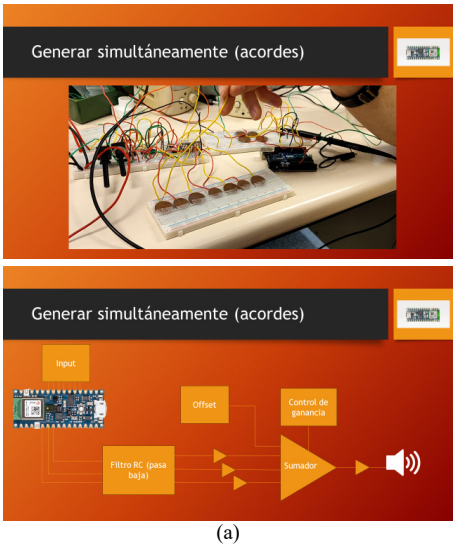
V. Resultados

Desde su implantación en el curso 2020-2021, 85 alumnos han cursado la asignatura presencialmente y participado en el sistema de realización de informes, trabajo final y su evaluación. Porcentualmente, el número de estudiantes que ha cursado la asignatura anualmente ha aumentado desde el 25 % del total de estudiantes de cuarto curso del Grado, en el 20/21, hasta el 35 % en el curso 2023-2024. La nota media de los estudiantes en la asignatura, en promedio, ha aumentado un 10 % en ese mismo periodo de tiempo. Analizando las calificaciones, ese aumento se puede justificar con que la elaboración de los videos durante la sesión de laboratorio obliga al estudiante a llevar un registro gráfico de todas las actividades que ha realizado, de manera más eficaz que al hacerlo en papel (o Excel). Es decir, prácticamente todos los informes entregados (97 %) incluyen resultados correspondientes a todos los apartados propuestos en el guion, en comparación con el 70 % obtenido en el caso de informes en formato papel o PDF. Es necesario, sin embargo, indicar que la experiencia se implantó en el segundo año de impartición de la asignatura por nuestra parte, por lo que los datos pueden estar sesgados.

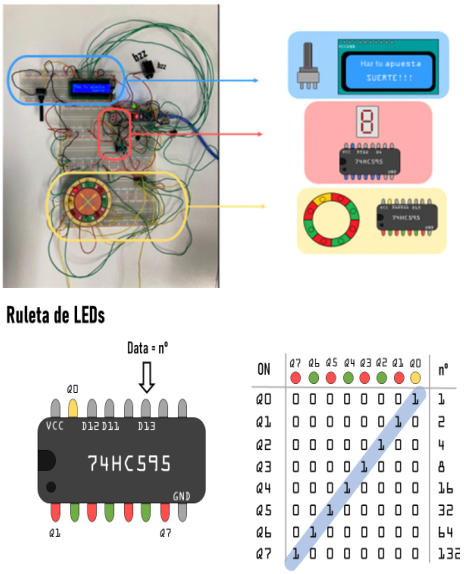
Consultados mediante pregunta de respuesta abierta sobre su grado de satisfacción con la metodología empleada, el 100 % del alumnado ha valorado muy positivamente la opción de elaboración audiovisual de las memorias. En cuanto a los motivos de esta valoración, no son únicos, varían desde la posibilidad de familiarizarse con herramientas multimedia, la mayor facilidad para explicar los procesos dinámicos de los sistemas digitales y alejarse de los modelos clásicos de informe escrito, la única opción en el resto de asignaturas del Grado. Resulta significativo, respecto a esta valoración, que mientras un gran número de estudiantes se quejan de una elevada carga experimental en el Grado en Física de Unizar, el estudiantado que cursa la asignatura de «Sistemas digitales», entre sus opciones de mejora, sugiere aumentar las horas de laboratorio. Consultados sobre este punto, la conclusión a la que se llega es que no es tanto un problema de exceso de carga experimental como un exceso de tiempo en elaboración de informes, en muchas ocasiones repetidos, que se pueden obtener y copiar de otras promociones y, muy a menudo, sin mucho sentido.

VI. Conclusiones

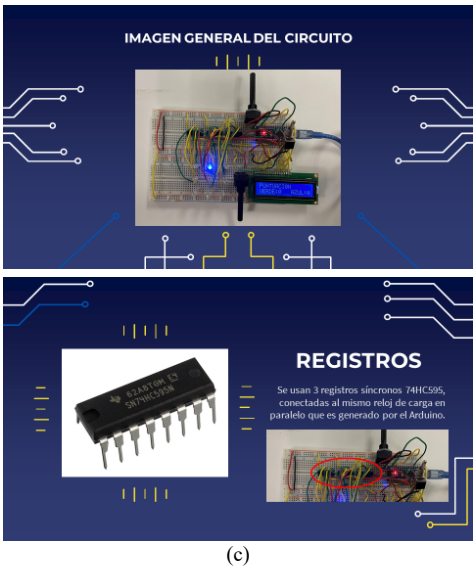
Tras la experiencia llevada a cabo en cuatro cursos consecutivos, podemos concluir que la propuesta de elaborar



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Detalles de las presentaciones de los trabajos mostrados en la Fig. 2.

los informes de las experiencias de laboratorio y trabajo final en la asignatura de «Sistemas digitales» ofrece numerosas ventajas: para el estudiante, le permite familiarizarse con herramientas de edición audiovisual gratuitas o, en muchas ocasiones, emplearlas de manera más formal. Con ello se les facilita la explicación de los procesos que ocurren en los sistemas dinámicos objeto de estudio en la asignatura, pudiendo centrarse más en cómo diseñarlos, verificarlos y registrarlos, que en cómo explicarlos mediante texto escrito e imágenes fijas. Por otro lado, el que el alumnado sepa que su trabajo se va a evaluar por pares hace que procuren realizar informes audiovisuales completos y fáciles de seguir. Con todo ello, consideramos que las calificaciones que el alumnado obtiene por su trabajo refleja mejor su esfuerzo, mejorando el proceso evaluativo.

Con respecto al cuerpo docente de la asignatura, la evaluación de los contenidos de los informes y trabajos resulta mucho más fácil (si bien no más rápida): la observación del comportamiento dinámico del sistema que se propone en cada experiencia, junto con la explicación oral o escrita de lo que se está viendo, asegura prácticamente si su funcionalidad es la adecuada o no. Además, desde que se ha implantado esta metodología se ha constatado un mayor interés en la experimentalidad de la asignatura, fundamental, según el criterio del equipo docente, en especial para futuros profesionales con el perfil propio de los graduados en Física.

Como posibles opciones de mejora, se valora intentar sistematizar qué se debe o no mostrar en los informes audiovisuales, homogeneizando de esta manera los contenidos (que no el formato), para facilitar más aún la evaluación del trabajo del alumnado. Por otro lado, se está estudiando limitar el tiempo de duración de los informes, del mismo modo que se limitan el número de páginas de los informes de otras asignaturas que imparte el Área de Electrónica en el Grado.

Referencias

[1] https://estudios.unizar.es/estudio/asignaturas?anyo_academico=2023&estudio_id=20230124&centro_id=100&plan_id_nk=447&sort=curso.

[2] https://obsproject.com/es. Último acceso: 04/04/2024.

[3] https://www.openshot.org/. Último acces: 04/04/2024.

[4] M.A. Erdmann, J.L. March, “Video reports as novel alternate assessment in the undergraduate chemistry laboratory”, Chemistry Education Research and Practice, 2014, 15, 650-657.

[5] P. Cabrera, “Uso de mini-videos como informes individuales de prácticas informáticas en una asignatura de diseño mecánico”, VII Jornadas Iberoamericanas de Innovación Educativa en el Ámbito de las TIC y las TAC. Las Palmas de Gran Canaria, 18-19 noviembre, 2021.

[6] J. Gómez-García, A. Salazar, M.A. Garrido, M.T. Gómez del Río, A. Rico, J. Rodríguez, “El video como herramienta para la evaluación de prácticas de laboratorio en asignaturas científico-técnico”, Jornadas de Innovación y TIC Educativas - JITICE'12, Móstoles, 21-23 marzo, 2012.

Recursos didácticos para los laboratorios de Electrónica Analógica

Sergio López Gregorio
Departamento Ingenería Telemática y Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación
Universidad Politécnica de Madrid
Madrid, España
sergio.lopez@upm.es

Javier Malo Gómez
Departamento Ingenería Telemática y Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación)
Universiad Politécnica de Madrid
Madrid, España
javier.malo@upm.es

Manuel Vázquez Rodríguez
Departamento Ingenería Telemática y Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación))
Universiad Politécnica de Madrid
Madrid, España
m.vazquez@upm.es

***Abstract*—Los recursos que se utilizan en la realización de las prácticas de laboratorio en asignaturas asociadas a la Electrónica Analógica resultan claves para conseguir que los estudiantes puedan adquirir las competencias que se hayan definido en las correspondientes asignaturas. La elección de cada recurso para implementar los diferentes circuitos analógicos en los laboratorios debe ser valorada desde diferentes perspectivas y no solo desde el ámbito de cada asignatura. En este trabajo se muestran diferentes recursos para el montaje de circuitos electrónicos en el marco de diferentes asignaturas relacionadas con el área de la Electrónica Analógica.**

Keywords— Electrónica Analógica, prácticas de laboratorio, laboratorios de electrónica.

I. INTRODUCCIÓN

La formación práctica llevada a cabo en los laboratorios vinculados a la enseñanza de la electrónica es esencial para que los estudiantes alcancen las competencias definidas en los títulos de Grado o Master relacionados con las ingenierías, en el ámbito de las tecnologías industriales y de la información y las comunicaciones. Por tanto, resulta clave planificar con mucha atención, considerando aspectos didácticos y de gestión, los recursos necesarios para desarrollar las diferentes prácticas que se desarrollen en los laboratorios de las asignaturas incluidas en cada título.

La disponibilidad de información relacionada con el diseño de los laboratorios en las asignaturas, que incluya aspectos relacionados con la planificación y gestión de las prácticas a desarrollar, no es muy amplia como, por ejemplo, demuestran las estadísticas basadas en la distribución temática de sesiones en diferentes congresos TAEE, donde las sesiones dedicadas al área "Laboratorios" no llegan al 4% [1]. Por otra parte, si se buscan artículos con información sobre los recursos didácticos que se utilizan en las prácticas de laboratorio que se realizan en los laboratorios de asignaturas en el área de la Electrónica Analógica, se observa que esta es más escasa que la disponible en el ámbito de la Electrónica Digital [2]. Ante la carencia de la información mencionada, la difusión de artículos en esta temática resulta de interés.

En la planificación de los laboratorios vinculados con la Electrónica Analógica, la selección de los recursos didácticos a utilizar en la implementación física de los circuitos en las prácticas es un asunto que resulta clave para que el aprendizaje de los estudiantes tenga éxito. Entre las diversas alternativas caben destacar las siguientes como las más utilizadas [3]:

- Utilización de las típicas placas de inserción (*protoboards* o *breadboards*) donde los estudiantes insertan componentes en dichas placas y mediante cables realizan las conexiones necesarias. Esta alternativa presenta como ventajas: su facilidad de uso a la hora de conectar componentes y circuitos integrados con encapsulado DIP, su bajo coste y la posibilidad de ser reutilizadas. Entre las desventajas se pueden indicar las siguientes: el tiempo de montaje necesario, la existencia de resistencias, inductancias y capacidades parásitas, la no disponibilidad de un plano de masa y la fragilidad mecánica del montaje [4].
- Utilización de módulos didácticos o kits de evaluación comerciales de diversos fabricantes. Esta alternativa presenta como principal ventaja el escaso tiempo que se dedica al montaje, pero tiene como inconvenientes la falta de versatilidad, la falta de adecuación a los contenidos de la asignatura y su coste elevado.
- Utilización de prototipos o placas *ad hoc* desarrollados en el marco de las asignaturas. Son diseñados de forma específica, con disponibilidad para tener diferentes configuraciones, para el desarrollo de las prácticas que constituyan el laboratorio. Presentan como ventajas principales la adaptación a los objetivos de aprendizaje que se definan en el laboratorio y la reducción de tiempos dedicados al montaje. Tienen como inconvenientes el tiempo de desarrollo y el coste económico en función de la complejidad de cada placa.

Ejemplos de utilización de las *protoboards* como recurso en los laboratorios se pueden encontrar en la mayoría de las asignaturas de títulos de Grado que aborden contenidos relacionados con la Electrónica Analógica. También es posible encontrar cursos *online* en abierto que las utilizan para realizar las diferentes prácticas que se proponen. En [5] se puede consultar un curso de introducción a la Electrónica Analógica desarrollado por Analog Devices donde se incluyen numerosas actividades prácticas que utilizan *protoboards* como recurso.

La disponibilidad de módulos didácticos o kits de evaluación comerciales es bastante amplia. Existen kits específicos basados en una sola placa como el kit de desarrollo ASLK PRO de la empresa Mikroe que ofrece la posibilidad de realizar pruebas de circuitos con amplificadores operacionales [6]. También existen sistemas modulares que permiten realizar, mediante la utilización de diferentes tarjetas, diversas pruebas de circuitos electrónicos analógicos como el sistema LIEBA de la empresa Edibon [7] , el kit didáctico XG201 de la compañía Exsto Tecnología [8] o el entrenador ANG-800 de la empresa Alecop [9].

La búsqueda de prototipos o placas *ad hoc* diseñados de forma específica para los laboratorios relacionados con la Electrónica Analógica no es una tarea sencilla debido principalmente a que en muchas ocasiones el uso de este tipo

de recursos no se difunde en revistas o congresos. Ejemplos representativos pueden ser un kit reconfigurable para realizar pruebas con amplificadores diferenciales [10] o los sistemas desarrollados para realizar medidas en circuitos basados en amplificadores operacionales [11], [12], [13].

La elección de los recursos a utilizar en los laboratorios no debería realizarse solo atendiendo a los contenidos de cada asignatura, de forma independiente, sino que sería recomendable tener en cuenta el conjunto de asignaturas que están interrelacionadas a nivel académico con la materia a la que están vinculadas las asignaturas. En este sentido la existencia, en el marco de la materia en la que se engloben varias asignaturas, de una figura de responsable de área sería la opción más aconsejable. De esta forma estarían coordinadas todas las acciones relacionadas con la elección de recursos como el software de simulación, la instrumentación o las placas o prototipos a utilizar.

En este artículo se pretenden mostrar los recursos didácticos elegidos para realizar el montaje de los circuitos en los laboratorios de tres asignaturas relacionadas con el área de la Electrónica Analógica que se imparten en un título de Grado de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). El artículo se ha estructurado en varios apartados. En la sección II se describe el contexto relacionado con las asignaturas vinculadas con la enseñanza en Electrónica Analógica. En las secciones III, IV y V se describen los laboratorios asociados a cada asignatura. En la sección VI se comentan los resultados y reflexiones más interesantes. Por último, se proporcionan las conclusiones del trabajo.

II. CONTEXTO

Entre las asignaturas básicas y obligatorias que se incluyen en el plan de estudios de la titulación de Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones (EC) que se imparte en la UPM, se incluyen varias en las que se imparten contenidos relacionados con la Electrónica Analógica. Se han elegido tres de ellas, de primer curso (Electrónica I), segundo curso (Electrónica Analógica I) y tercer curso (Electrónica Analógica II), para que sirvan de ejemplo a la hora de mostrar cómo se han elegido los recursos didácticos en la realización de las prácticas de laboratorio asociadas a dichas asignaturas. La secuenciación de dichas asignaturas en el plan de estudios se muestra en Fig. 1.

A continuación, respecto a cada asignatura se presenta la información docente relativa a resultados de aprendizaje y contenidos.

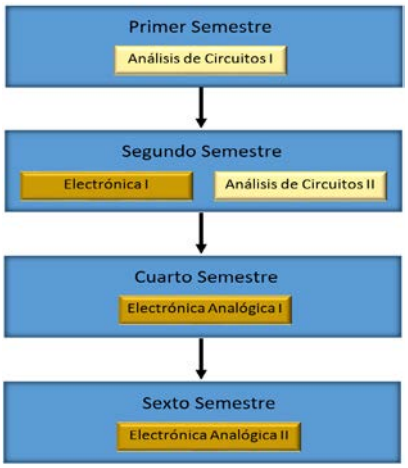


Fig. 1. Secuenciación en asignaturas del Plan de Estudios EC

A. *Asignatura Electrónica I*

La asignatura Electrónica I es una asignatura de carácter básico de 6 ECTS que se imparte en el primer curso (segundo semestre) del plan de estudios EC de la UPM. En la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación (ETSIST) esta asignatura también se imparte a otros tres títulos de Grado (Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación, Ingeniería de Sonido e Imagen e Ingeniería Telemática).

La asignatura tiene definidos como principales resultados de aprendizaje los siguientes:

- Entender las características principales de los bloques funcionales que componen un sistema electrónico básico (amplificador, atenuador, alimentación, ADC, DAC).
- Conocer la función y características básicas de los componentes electrónicos pasivos (resistor, condensador y bobina).
- Conocer la función y características básicas de los componentes electrónicos activos (diodo, transistor bipolar y unipolar).
- Entender el modelo y las propiedades básicas de los amplificadores y su implementación con amplificadores operacionales ideales.

Los contenidos teóricos resumidos de la asignatura son los siguientes:

1. Introducción a los sistemas electrónicos.
2. Componentes y dispositivos electrónicos.
3. Subsistemas electrónicos integrados.

B. *Asignatura Electrónica Analógica I*

La asignatura Electrónica Analógica I es una asignatura de carácter obligatorio de 6 ECTS que se imparte en el segundo curso (cuarto semestre) del plan de estudios EC de la UPM.

La asignatura tiene definidos como principales resultados de aprendizaje los siguientes:

- Entender el comportamiento, a nivel de modelo, de los diodos, transistores bipolares y unipolares en condiciones de trabajo de pequeña señal y frecuencias medias.
- Utilizar las técnicas de análisis de circuitos para analizar el funcionamiento de circuitos básicos con diodos, transistores bipolares y unipolares y amplificadores operacionales.
- Utilizar programas de simulación de circuitos analógicos como ayuda para analizar y diseñar circuitos basados en diodos, transistores (bipolares y unipolares) y amplificadores operacionales.
- Implementar circuitos de baja complejidad basados en diodos, transistores (bipolares y unipolares) y amplificadores operacionales.

Los contenidos teóricos resumidos de la asignatura son los siguientes:

1. Circuitos con diodos.
2. Circuitos con transistores.
3. Circuitos con amplificadores operacionales.

C. *Asignatura Electrónica Analógica II*

La asignatura Electrónica Analógica II es una asignatura de carácter obligatorio de 6 ECTS que se imparte en el tercer curso (sexto semestre) del plan de estudios EC de la UPM.

La asignatura tiene definidos como principales resultados de aprendizaje los siguientes:

- Conocer las ventajas y los inconvenientes que produce la realimentación negativa en el comportamiento de un amplificador.
- Comprender e interpretar las especificaciones y parámetros de un amplificador operacional a partir de las hojas de características del fabricante.
- Diseñar filtros activos de paso bajo y alto de cualquier orden.
- Calcular, de forma aproximada y rápida, el ancho de banda de un amplificador construido con amplificador operacional compensado en frecuencia.
- Aplicar la teoría de circuitos realimentados al cálculo de la ganancia y resistencias terminales de un amplificador realimentado negativamente y construido con amplificador operacional.
- Construir, poner a punto y caracterizar, mediante las medidas oportunas en el laboratorio, diferentes circuitos analógicos de mediana complejidad diseñados con amplificador operacional.

Los contenidos resumidos de la asignatura se indican a continuación:

1. Circuitos realimentados con Amplificador Operacional.
2. Respuesta en frecuencia de circuitos basados en el Amplificador Operacional.
3. Parámetros de los Amplificadores Operacionales comerciales.

III. Descripción Laboratorio Electrónica I

A. *Enfoque del laboratorio y recursos utilizados*

El laboratorio está concebido en esta asignatura como una actividad en la que los estudiantes comprueban de forma práctica los conocimientos teóricos que han adquirido previamente en las clases teóricas.

Respecto a la elección de los recursos a utilizar en el laboratorio se valoraron principalmente dos aspectos a nivel docente:

- Al ser una asignatura de primer curso se decidió proporcionar una continuidad respecto a los recursos utilizados en el laboratorio de la asignatura impartida en el primer semestre Análisis de Circuitos I, donde se realizan medidas sobre circuitos pasivos en continua y en alterna.
- Utilizar recursos que permitieran implementar los circuitos de cada práctica, en una sola sesión, de forma intuitiva partiendo del esquema de los mismos.

A nivel organizativo y de gestión se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- Al ser bastante elevado el número de estudiantes matriculados en la asignatura (por encima de los 350 estudiantes) el número de prácticas a realizar por los estudiantes no podía ser muy elevado para no saturar las capacidades docentes y de recursos materiales del departamento encargado de la docencia en la asignatura.
- Se deben facilitar a los estudiantes los componentes de todas las prácticas para que no tengan que realizar ningún gasto.
- El mantenimiento anual de los recursos del laboratorio debía ser sencillo para el personal técnico encargado de las tareas de gestión.

Ante los condicionantes indicados se consideró como la mejor opción para la realización de las prácticas la utilización de la típica placa de pruebas (*protoboard o breadboard*). Es una opción de bajo coste que a nivel didáctico permite, de forma bastante comprensible por los estudiantes, la implementación de los circuitos básicos correspondientes a cada práctica.

B. *Descripción básica de las prácticas y evaluación*

Debido al carácter de introducción a la electrónica de la asignatura y al elevado número de estudiantes matriculados en la asignatura, se plantean solo tres prácticas, de dos horas de duración cada una, que son independientes y que están relacionadas con los dos primeros temas de la asignatura. Los estudiantes deben preparar con antelación cada práctica realizando una lectura de cada guion y completando unas cuestiones teóricas que ayuden a comprender los resultados que se van a obtener en el laboratorio.

La primera práctica tiene dos objetivos básicos: revisar el funcionamiento de los instrumentos del laboratorio, ya que se utilizan diferentes modelos a los usados en la asignatura Análisis de Circuitos I, y afianzar los conocimientos sobre señales mediante la realización de una serie de medidas básicas sobre un sencillo circuito divisor de voltaje basado en dos resistores.

La segunda práctica aborda el estudio de circuitos básicos con diodos. Se han elegido como ejemplos un rectificador de media onda con filtro por condensador y un estabilizador Zener con la intención de mostrar el funcionamiento de una sencilla fuente de alimentación lineal, utilizando también un transformador conectado a la red eléctrica. En Fig. 2 se muestra el circuito montado en la placa de pruebas. El estudiante comprueba de forma práctica conceptos vistos en las clases de teoría relativos a la rectificación y filtrado de una señal y la existencia de un rizado acoplado a una componente continua. Por último, comprueba los beneficios de la utilización de un estabilizador con diodo Zener.

La tercera práctica está relacionada con el funcionamiento básico de los transistores. En concreto el estudiante comprueba en el laboratorio el funcionamiento de un circuito basado en un transistor MOSFET de acumulación trabajando en conmutación (observando de forma adicional el encendido y apagado de un LED) y comprueba también cómo se polariza dicho transistor en saturación. En Fig. 3 se muestran ambos circuitos montados en la placa de pruebas.

La realización de las tres prácticas mencionadas permite a los estudiantes, agrupados por parejas, la adquisición de unas destrezas básicas en cuanto al montaje de circuitos sencillos sobre placas de pruebas. Es importante destacar que la misión del profesor en el laboratorio, durante la realización de estas

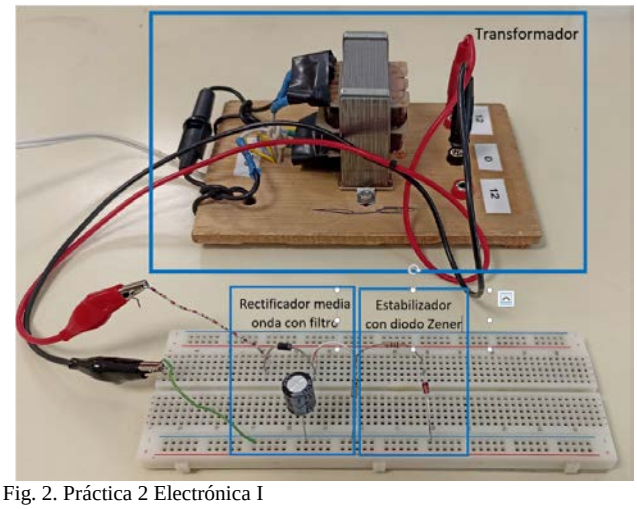


Fig. 2. Práctica 2 Electrónica I

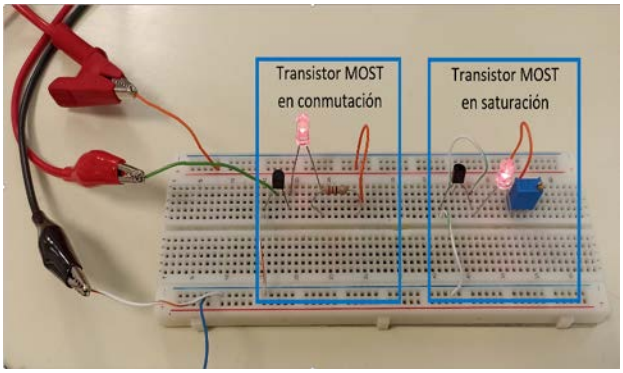


Fig. 3. Práctica 3 Electrónica I

prácticas, no es la de evaluar sino la de orientar, aconsejar y corregir los errores que se produzcan, ofreciendo pautas que ayuden a los estudiantes en todo momento.

La evaluación de las prácticas del laboratorio se realiza en una última sesión en el laboratorio donde el estudiante, mediante un examen práctico, debe demostrar lo aprendido tras la realización de las prácticas. Debido a que se programan solo tres prácticas de laboratorio en la asignatura el peso del examen práctico en la nota final de la asignatura no es muy elevado, siendo del 12%.

IV. Descripción Laboratorio Electrónica Analógica I

A. *Enfoque del laboratorio y recursos utilizados*

Al tratarse de una asignatura de segundo curso y tener en cuenta que los estudiantes ya han cursado la asignatura de Electrónica I, se consideraron varios enfoques a la hora de planificar el laboratorio de la asignatura.

El primer enfoque que se consideró fue una línea continuista respecto al utilizado en la asignatura Electrónica I, es decir, concebirlo como la realización de una serie de prácticas independientes relacionadas con cada uno de los temas de la asignatura.

El segundo enfoque que se tuvo en cuenta fue la concepción del laboratorio con la idea de implementar un sistema electrónico autónomo donde el estudiante comprendiera las técnicas básicas relativas al diseño electrónico [14]. Este tipo de enfoque pretendía, en mayor medida, aumentar la motivación del estudiante a la hora de realizar las diferentes prácticas.

Por motivos logísticos y económicos el segundo enfoque fue aplazado y, hasta el curso 2022-23 se desarrolló el laboratorio de la asignatura mediante un conjunto de prácticas independientes asociadas a cada tema de la asignatura y una práctica final basada en la implementación de un sencillo termostato electrónico. Es a partir del curso 2023-24, tras un largo periodo de casi dos años de preparación y desarrollo, cuando ha sido posible cambiar el laboratorio de la asignatura al enfoque basado en el desarrollo completo de un sistema electrónico. Sobre este enfoque se centrará todo lo expuesto a continuación.

Los recursos a utilizar, una vez resueltos los problemas logísticos y económicos, se determinaron por los siguientes aspectos docentes:

- Considerar como base las pautas generales asociadas al diseño electrónico (definición de un diagrama de bloques, diseño de cada bloque mediante su estudio teórico y simulación, el montaje y prueba de cada bloque e integración de todos los bloques comprobando el funcionamiento global del sistema).
- Facilitar el montaje y prueba de los circuitos de cada bloque evitando pérdidas de tiempo por averías a la hora de realizar las conexiones en las placas a utilizar.

A nivel organizativo y de gestión se tuvo en cuenta que el número de estudiantes matriculados en la asignatura no es muy elevado (alrededor de 90 estudiantes) y que el mantenimiento anual de los recursos no generara una carga de trabajo elevada al personal técnico.

Ante los condicionantes comentados, se eligió como la mejor opción la utilización de placas de montaje *ad hoc* que se entregarían a los estudiantes para conseguir el desarrollo del sistema electrónico propuesto. Dichas placas de circuito impreso se han diseñado para ofrecer diferentes opciones didácticas:

- Incluyen en la serigrafía los esquemas de los circuitos a montar para facilitar el seguimiento del montaje a los estudiantes.
- Permiten la inserción de los componentes que los estudiantes adquieren con antelación sobre unos pines soldados en las placas.
- Permiten configurar diversos circuitos en cada placa mediante la utilización de *jumpers*. De esa forma en cada práctica se permite el montaje y prueba, de forma independiente, de cada una de las etapas que constituyan el circuito de estudio.
- Disponen de conectores de test con el fin de facilitar la operación de los estudiantes a la hora de realizar las medidas (con cables Dupont) usando el multímetro y el osciloscopio.

B. *Descripción básica de las prácticas y evaluación*

Las prácticas que se realizan en el laboratorio están asociadas al sistema electrónico que se va a desarrollar de forma completa a lo largo del semestre. El diagrama de bloques de dicho sistema, que implementa un medidor del valor eficaz de una señal sinusoidal, se muestra en Fig. 4.

El laboratorio está compuesto de cinco prácticas y salvo en la primera y la última los estudiantes deben realizar un informe previo que debe entregarse con antelación a la

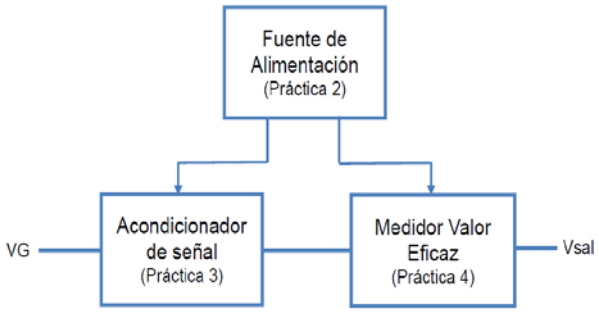


Fig. 4. Diagrama de bloques del sistema electrónico

ejecución de cada práctica. En dicho informe se debe realizar un estudio, a nivel teórico y de simulación mediante el programa OrCAD Capture CIS-Lite de Cadence, del circuito concreto que se va a montar y verificar en el laboratorio.

La primera práctica se limita a una prueba individual, de media hora para cada estudiante, en la que mediante un examen se evalúan las destrezas alcanzadas tras la realización de dos tutoriales, en horarios de libre acceso al laboratorio durante tres semanas, relacionados con el manejo de los instrumentos básicos (fuente de alimentación, multímetro, generador de señal y osciloscopio) y el programa OrCAD Capture CIS-Lite. El objetivo de esta práctica es homogeneizar el nivel de conocimientos inicial de todos los estudiantes de cara a afrontar la realización del resto de prácticas.

La segunda práctica, relacionada con el primer tema de la asignatura (Circuitos con diodos) y de dos horas de duración, tiene por objetivo el montaje y prueba de una fuente de alimentación lineal simétrica que constituye el primer bloque del sistema electrónico a construir (ver Fig. 4). En el desarrollo de esta práctica se les facilita a los estudiantes, agrupados ya por parejas, una placa donde deben insertar los componentes de forma gradual para comprobar el funcionamiento de las diferentes etapas que conforman la fuente de alimentación (etapa rectificadora con filtro y etapa estabilizador/reguladores). En Fig. 5 se muestra el montaje completo de la fuente de alimentación. En sus entradas se conectarán los cables procedentes del transformador externo y en sus salidas se obtendrá una alimentación de ± 12V.

La tercera práctica, también de una duración de dos horas, está vinculada al segundo tema de la asignatura (Circuitos con transistores) y también con la parte inicial del tema 3 (Circuitos con amplificadores operacionales). Tiene por objetivo el montaje y prueba de dos circuitos amplificadores, uno de ellos basado en un transistor bipolar y el otro en un sencillo no inversor con amplificador operacional. Ambos circuitos podrán ser elegidos para implementar el bloque

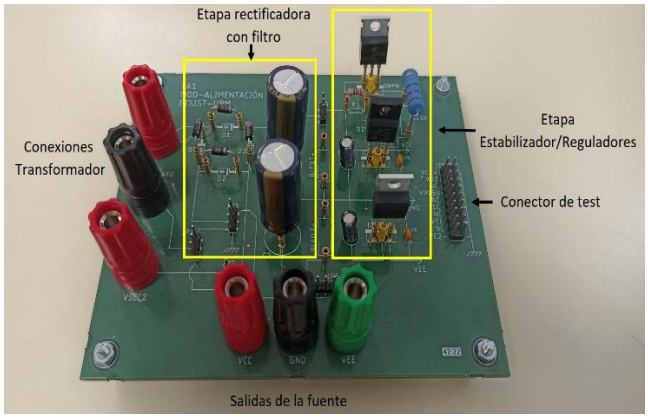


Fig. 5. Práctica 2 EAI (Fuente de alimentación)

"Acondicionador de señal" del sistema electrónico a construir (ver Fig. 4). A los estudiantes se les facilita ahora una nueva placa donde podrán realizar el montaje, en primer lugar, de un amplificador en emisor común y, después, de un amplificador no inversor. En ambos circuitos se comprobará la ganancia de cada etapa y la influencia de la carga en cada uno de ellos. En Fig. 6 se muestra el montaje completo de los circuitos.

La cuarta práctica está planificada para realizarse en dos sesiones con una duración total de cuatro horas. Está asociada con los contenidos teóricos abordados en el tema 3 de la asignatura (Circuitos con amplificadores operacionales). El objetivo de esta práctica es el montaje y prueba de un circuito medidor del valor eficaz de una señal sinusoidal mediante dos alternativas de diseño. En la primera alternativa se considera la opción de obtener el valor eficaz de una señal sinusoidal haciendo uso de una etapa rectificadora de onda completa de precisión junto a una etapa, conectada en serie, basada en un filtro paso bajo con ganancia. En la segunda alternativa se plantea la obtención del valor eficaz de la señal sinusoidal mediante la conexión de una etapa capaz de medir el valor de pico de una señal junto a una etapa, conectada en serie, con la funcionalidad de un amplificador inversor. En ambas alternativas, se proponen cuestiones relacionadas con el diseño de los circuitos debiendo calcular el valor de determinados componentes y se insiste en el montaje y prueba de las etapas correspondientes de forma independiente y posterior conexión de las etapas de forma conjunta. A los estudiantes se les facilita una nueva placa para facilitar el montaje de ambos circuitos. El enunciado de la práctica guía a los estudiantes en todo momento para verificar convenientemente el funcionamiento de cada etapa (indicando además la configuración de los respectivos *jumpers*). En Fig. 7 se muestra el montaje completo de los circuitos.

La quinta práctica del laboratorio, de una duración de dos horas, está planificada con un doble objetivo. Por un lado,

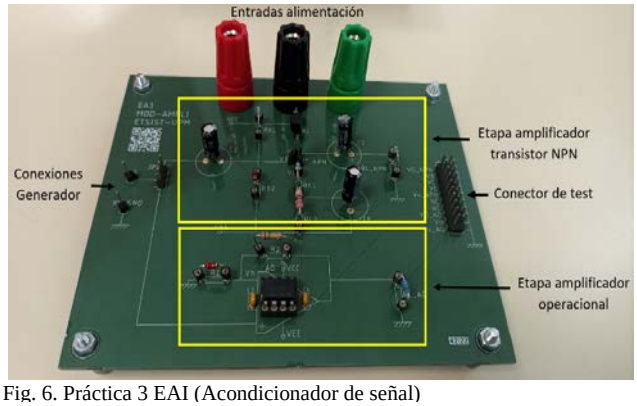


Fig. 6. Práctica 3 EAI (Acondicionador de señal)

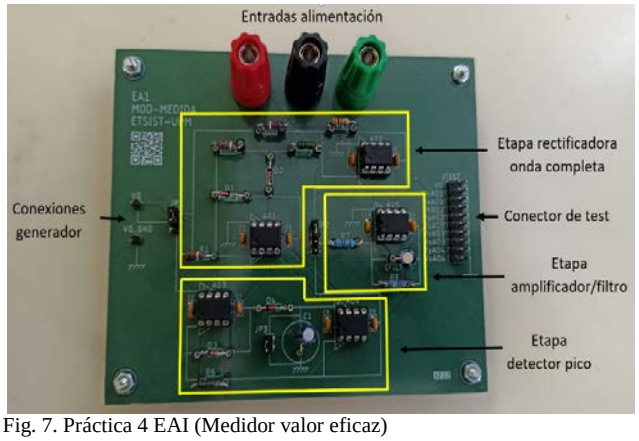


Fig. 7. Práctica 4 EAI (Medidor valor eficaz)

cada pareja de estudiantes debe realizar la integración del sistema electrónico completo cuyo diagrama de bloques se presentó al comienzo del laboratorio (ver Fig. 4) y, por otro lado, cada estudiante de forma independiente, debe completar una breve prueba práctica para determinar el grado de conocimiento adquirido sobre el funcionamiento del sistema electrónico completo. En Fig. 8 se muestra el montaje del sistema electrónico completo en funcionamiento realizando la medida del valor eficaz de una señal sinusoidal de 1V de amplitud.

Respecto a la evaluación de cada práctica el profesor valora la entrega del informe previo, el desarrollo llevado a cabo por los estudiantes en el laboratorio y la entrega del documento *Control de resultados* donde se han incluido las medidas y formas de ondas que se han obtenido junto a las justificaciones aportadas por los estudiantes. El peso global del laboratorio en la calificación final de la asignatura es del 30% siendo necesario obtener una calificación superior o igual a cuatro puntos para poder tener en cuenta la nota obtenida en la evaluación de los contenidos teóricos.

V. Descripción Laboratorio Electrónica Analógica II

A. Enfoque del laboratorio y recursos utilizados

Al tratarse de una asignatura de tercer curso y tener en cuenta que los estudiantes ya poseen los conocimientos impartidos en las asignaturas de Electrónica I y Electrónica Analógica I se decidió abordar un enfoque para el laboratorio que tuviera en cuenta los siguientes aspectos docentes:

- Los estudiantes deben adquirir competencias de más alto nivel en la materia de Electrónica Analógica que las adquiridas en asignaturas previas.
- Proporcionar al estudiante cierta flexibilidad y la posibilidad de adaptarse a diferentes metodologías de trabajo.
- Integrar en la medida de lo posible conocimientos de otras materias.
- Seguir en todo momento las pautas necesarias para realizar el desarrollo de un sistema electrónico.
- Generar como resultado final un "producto útil" del que se sintiera creador el estudiante con la intención de conseguir la máxima motivación.

Atendiendo a dichos aspectos se consideró como la mejor opción concebir el laboratorio con la idea de implementar de forma completa una aplicación electrónica donde el estudiante fuera el conductor de todo el proceso de desarrollo de la misma.

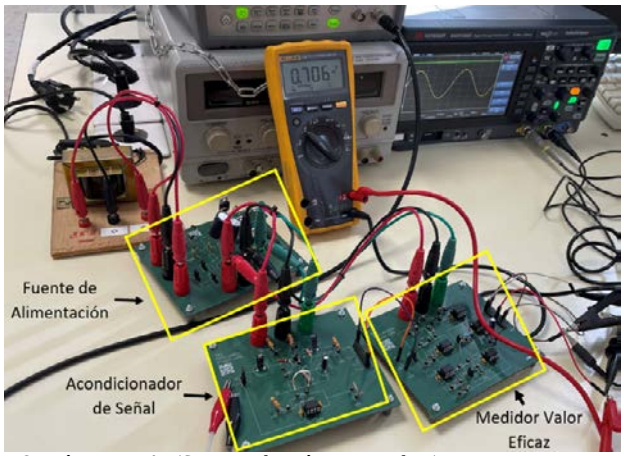


Fig. 8. Práctica 5 EAI (Sistema electrónico completo)

A nivel organizativo y de gestión se consideró que no fuera elevada la carga de trabajo para el personal técnico encargado del mantenimiento del laboratorio y que el alcance económico para los estudiantes no fuera muy elevado.

Para que los estudiantes puedan implementar la aplicación electrónica se desarrollaron placas de circuito impreso que, mediante el uso de *jumpers* y *switches*, facilitan el diseño secuencial, permitiendo verificar cada una de las etapas que forman parte de los circuitos de cada práctica. Los estudiantes adquieren las placas y los componentes que se soldarán sobre ellas en el servicio de publicaciones de la ETSIST a un coste de unos 50 euros.

B. Descripción básica de las prácticas y evaluación

El laboratorio está compuesto de dos prácticas que los estudiantes, trabajando en parejas, deben preparar con antelación mediante la realización de un informe previo que contenga los análisis teóricos y los resultados de las simulaciones realizadas. Para revisar posibles errores se facilita una solución del informe previo y para ayudar a preparar las medidas a realizar en el laboratorio se proporcionan una serie de videos. En las sesiones presenciales se realiza un breve examen escrito sobre los contenidos del informe previo. Con posterioridad a la realización de cada práctica se entregará un documento denominado *Memoria* que incluirá los resultados obtenidos y los comentarios y justificaciones que se consideren oportunos por parte de los estudiantes.

La primera práctica tiene programada una dedicación de tres sesiones presenciales de dos horas de duración cada una y 14 horas de trabajo autónomo fuera o dentro del laboratorio. En esta práctica los estudiantes realizan la caracterización de un amplificador de mediana potencia para señales de audio sobre la placa correspondiente que han adquirido. A lo largo de la práctica se realiza el montaje y prueba de las tres etapas que constituyen el amplificador:

- La etapa de entrada con ganancia de tensión unidad y que establecerá la respuesta en baja frecuencia del amplificador. La salida se conecta a un resistor variable que actuará como control de volumen del amplificador de audio.
- La etapa intermedia que establecerá la ganancia máxima y la respuesta en alta frecuencia del amplificador.
- La etapa de potencia que proporcionará algo más de 2,5 W sobre una carga de unos 8 Ω (altavoz).

En Fig. 9 se muestra el amplificador de audio desarrollado al finalizar la primera práctica.

La segunda práctica tiene asignada la misma dedicación que la indicada para la práctica 1 y está planificada para abordar la implementación de un sistema de comunicación óptico para señales de audio. La comunicación óptica se puede realizar de dos formas diferentes: mediante el uso de LEDs infrarrojos en el emisor y fotodiodo en el receptor o mediante fibra óptica de plástico.

Los estudiantes en las placas correspondientes realizan el montaje y prueba, de forma secuencial, del circuito Emisor y del circuito Receptor. El circuito Emisor se desarrolla mediante tres etapas: una etapa adaptadora, un modulador FM

Fig. 9. Práctica 1 EAII (Amplificador de audio) [2]

y un circuito excitador doble (para LEDs infrarrojos y para el LED utilizado para la fibra óptica). El circuito Receptor se realiza mediante cuatro etapas: amplificadores de transimpedancia para fotodiodos, un regenerador de señal, un demodulador FM y un filtro activo. En Fig. 10 se muestran los circuitos emisor y receptor desarrollados en la segunda práctica. Al finalizar la práctica se completa la aplicación electrónica conectando a la salida del receptor el amplificador de audio desarrollado en la primera práctica.

Respecto a la evaluación de cada práctica el profesor valorará el informe previo, la memoria con los resultados obtenidos y el desarrollo llevado a cabo por los estudiantes en el laboratorio. Además de la evaluación de las prácticas se realiza una prueba final donde se evalúan los contenidos teóricos y prácticos asociados a las prácticas realizadas. El peso global del laboratorio en la calificación final de la asignatura es del 30% siendo necesario obtener una calificación superior o igual a cuatro puntos para poder tener en cuenta la nota obtenida en la evaluación de los contenidos teóricos.

VI. Resultados y Reflexiones

Una vez descritos los recursos didácticos y actividades prácticas de las asignaturas Electrónica I, Electrónica Analógica I y Electrónica Analógica II es conveniente reflexionar sobre determinados aspectos relevantes a nivel docente asociados a cada una de las anteriores asignaturas.

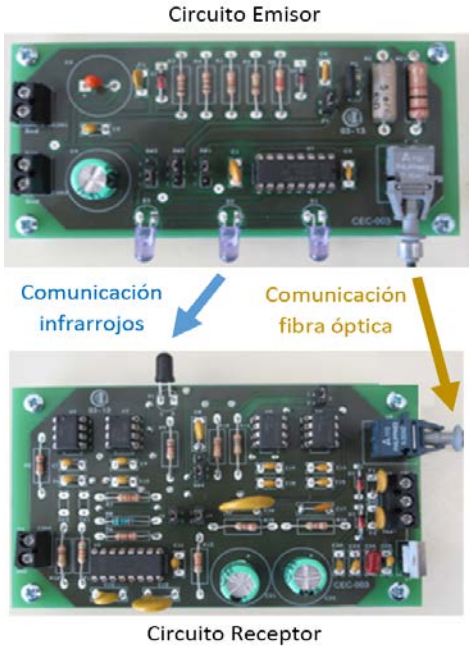


Fig. 10. Práctica 2 EAII (Emisor y receptor) [2]

En la asignatura Electrónica I el desarrollo de las prácticas en el laboratorio por parte de los estudiantes no resulta ser muy satisfactorio. La planificación de prácticas donde se conectan los componentes mediante cables en las *protoboards* no supone ningún inconveniente para los estudiantes y permite una sencilla implementación de los circuitos basados en diodos y transistores. Sin embargo, el rendimiento de los estudiantes es bastante bajo como demuestran los resultados académicos obtenidos por los estudiantes, con una tasa media de aprobados en el laboratorio alrededor del 40% durante los últimos cursos académicos. Entre las causas asociadas a este bajo rendimiento se pueden destacar las siguientes:

- Existe un alto abandono en el laboratorio debido, entre otras causas, a que el peso asignado al examen de laboratorio es de solo el 12%.
- La productividad académica de los estudiantes en el desarrollo de cada práctica es bastante baja debido a la escasa o nula preparación de las prácticas con antelación a la sesión presencial.
- La destreza en el manejo de los instrumentos es muy baja, a pesar de haber trabajado ya con modelos similares en la asignatura previa de Análisis de Circuitos I.

La solución a estos problemas no es sencilla, teniendo en cuenta que el elevado número de estudiantes matriculados, y cada curso se valoran posibles opciones de mejora, pero la mayoría de ellas resultan infructuosas ya que existe otro problema de orden superior como es la baja asistencia de los estudiantes a las clases de teoría. Esta circunstancia, desgraciadamente un mal que comparten muchas más asignaturas y que se padece también en numerosas universidades, hace muy difícil encontrar la clave para mejorar el aprendizaje y el rendimiento de los estudiantes.

En el laboratorio de la asignatura Electrónica Analógica I se intenta paliar el problema del bajo rendimiento en Electrónica I con la realización de un tutorial sobre el manejo de los instrumentos de laboratorio en la primera práctica. Respecto a la nueva planificación que se ha planteado para el curso 2023-24 con la utilización de placas de inserción *ad hoc*, dejando de lado las *protoboards*, se pueden trasladar, finalizada la fase de realización de todas las prácticas y a la espera de obtener las calificaciones finales, las siguientes mejoras respecto a la anterior planificación del laboratorio:

- Se ha conseguido incorporar, en una asignatura de segundo curso, la implementación por bloques de un sistema electrónico autónomo.
- Se han eliminado los problemas de cableado y averías asociados a la utilización de las *protoboards*, disponiendo los estudiantes de más tiempo para la realización de medidas y obtención de conclusiones relacionadas con el funcionamiento de los circuitos. La mayoría de los estudiantes han finalizado cada una de las prácticas, circunstancia muy positiva ya que cuando se utilizaban las *protoboards* no ocurría.
- El profesorado ha tenido una actividad más productiva en el laboratorio ya que ha podido dedicar tiempo a poder explicar conceptos o técnicas de medida y no limitarse, casi en exclusiva como ocurría anteriormente, a revisar averías en los circuitos debidas al cableado o fallos en las *protoboards*. A

modo de ejemplo, cabe destacar que en la práctica 4 se ha podido explicar el funcionamiento del modo de adquisición "Single" del osciloscopio para justificar la respuesta temporal de las dos alternativas utilizadas para obtener el valor eficaz de una señal sinusoidal.

En cuanto al esfuerzo necesario para realizar todos los cambios efectuados relacionados con la utilización de placas de inserción *ad hoc* es importante destacar lo siguiente:

- Se tuvo que realizar una planificación a largo plazo. En concreto desde la concepción de las nuevas placas hasta conseguir su puesta a punto han transcurrido casi dos cursos académicos.
- Se necesitó el apoyo del personal técnico asociado a los laboratorios. Con su ayuda se pudieron preparar todas las placas para cada una de las prácticas.
- Se tuvo que esperar al momento adecuado para disponer de la partida económica necesaria para la fabricación de las placas de circuito impreso y la compra de materiales.

En la asignatura de Electrónica Analógica II el desarrollo del laboratorio se considera satisfactorio desde varias perspectivas. Si se tienen en cuenta los resultados académicos la tasa media de aprobados en el laboratorio en los últimos cursos está situada alrededor del 75%. Por otra parte, si se tienen en cuenta las encuestas que se realizan al final de la impartición de la asignatura, los estudiantes ante las preguntas sobre su satisfacción y aprendizaje percibido manifiestan respuestas muy positivas.

En cuanto a la decisión de utilizar como opción de aprendizaje la realización de una aplicación electrónica que implementan de forma completa los estudiantes, conviene destacar un hecho que se produce en la última sesión presencial del laboratorio. Una vez finalizada la implementación de los circuitos emisor y receptor de la segunda práctica se realiza una prueba final que resulta muy llamativa para los estudiantes. Dicha prueba consiste en conectar, por un lado, una fuente de audio en el emisor (por ejemplo, procedente de la salida para auriculares de un teléfono móvil) y, por otro lado, el amplificador de audio desarrollado en la primera práctica, junto con un altavoz, en la salida del receptor. Los estudiantes observan el funcionamiento completo de la aplicación, provocando incluso fallos en la comunicación óptica colocando la mano u objetos entre el emisor y el receptor y "sienten" cierta satisfacción al comprobar que todo el sistema ha sido desarrollado por ellos.

VII. Conclusiones

El trabajo presentado muestra la línea de planificación que se ha desarrollado, desde una perspectiva global y considerando aspectos docentes y de gestión, a la hora de seleccionar los recursos didácticos más adecuados a utilizar en tres asignaturas vinculadas al área de la Electrónica Analógica en el título de Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones que se imparte en la UPM.

Es importante destacar los diferentes enfoques que se han tenido en cuenta en el diseño de cada laboratorio tratando de conseguir, por un lado, una adaptación adecuada al nivel de las competencias definidas en cada asignatura y, por otro, el mayor nivel de motivación posible entre los estudiantes. La secuencia de utilización de recursos descrita en este trabajo, comenzando por el uso de *protoboards* (enfoque de circuitos electrónicos independientes), continuando con prototipos de inserción *ad-hoc* (enfoque de sistema electrónico autónomo) y finalizando con placas de circuito impreso para soldar los componentes (enfoque de aplicación electrónica) puede ser un ejemplo a tener en cuenta a la hora de diseñar laboratorios de asignaturas en cualquier título de Grado donde se impartan contenidos asociados con la Electrónica Analógica.

Por último, con este trabajo también se pretende contribuir a incrementar la difusión de experiencias relacionadas con los laboratorios de asignaturas relacionadas con la Electrónica Analógica ya que, desde nuestro punto de vista, existe una carencia al respecto.

Referencias

[1] M.Blazquez y otros, "TAEE, marcador de la divulgación científica" Libro actas XIV Tecnologias Aplicadas a la Ensenanza de la Electronica, pp. 355–361, 2020.

[2] J. Malo, I. Anton, and J. Arriaga, "Laboratory practice "advanced analog electronics" Proceedings of XI Tecnologias Aplicadas a la Ensenanza de la Electronica (Technologies Applied to Electronics Teaching) (TAEE). IEEE, pp. 1-7, 2014.

[3] C. Quintans y otros, "Convertidor electrónico dc-dc reductor configurable para ensayos de laboratorio", Libro actas XV Tecnologias Aplicadas a la Ensenanza de la Electronica, pp. 64–71, 2022.

[4] W. Kester, "Breadboarding and Prototyping Circuits". Available: https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/studentzone/studentzone-november-2016.html

[5] Eelctronics I and II. Analog Devices University Program. Available: https://wiki.analog.com/university/courses/electronics/text/electronics-toc

[6] Analog Sistem Lab kit PRO. Mokroe Available: https://www.mikroe.com/aslk-pro-kit

[7] Sistema LIEBA. Edibon. Available: https://www.edibon.com/es/laboratorio-de-electronica-y-electricidad-basica#descripciongeneral

[8] Kit didáctico XG201. Exsto Tecnologia. Available: https://zamtsu.com/product/kit-didactico-de-electronica-analogica-xg201-exsto/

[9] Entrenador electrónica analógica ANG-800. Alecop. Available: https://alecop.com/electronica-general/

[10] J. Salvado, J. Oliveira, G. Martins, "Differential amplifier kit to support the laboratory classes of electronics for telecommunications" EDULEARN14 Proceedings, pp. 5406-5416. 2014.

[11] Á. Gómez-Márquez y otros "Reconfigurable prototype for the experimental characterization of operational amplifiers in electronics labs", INTED2023 Proceedings, pp. 6223-6232. 2023.

[12] I. M. Pandiev, "Laboratory Systems for Measuring Static and Dynamic Parameters of the Basic Circuit Configurations Employing Op-Amps," 13th National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, pp. 1-4, 2022.

[13] R. Costa, P. Portela, G. R. Alves, M. C. Felgueiras and C. Viegas, "An Alternative Way of Teaching Operational Amplifiers Using a Reconfigurable and Expandable Kit," in IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologias del Aprendizaje, vol. 16, no. 3, pp. 307-317, Aug. 2021.

[14] C.J. Jiménez, A. López , C. Leon, "Metodologia de diseño electrónico dentro de prácticas obligatorias de laboratorio". Pixel-Bit. Revista de Medios y Educación [en linea]. no. 37 , pp. 19-27, 2010. Available: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=36815118002

Experiencias docentes para llevar el emprendimiento al aula. Formación entre iguales.

C. Rus-Casas
Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática. Escuela Politécnica Superior de Jaén
Universidad de Jaén (España)
crus@ujaen.es
orcid.org/0000-0002-6982-4054

J.D. Aguilar-Peña
Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática. Escuela Politécnica Superior de Jaén
Universidad de Jaén (España)
jaguilar@ujaen.es

D. Eliche-Quesada
Departamento de Ingeniería Química y de los Materiales
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Universidad de Jaén (España)
deliche@ujaen.es

J. L. Sánchez-Jiménez
Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática. Escuela Politécnica Superior de Jaén
Universidad de Jaén (España)
jlsanche@ujaen.es

M.D. La Rubia
Departamento de Ingeniería Química y de los Materiales
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Universidad de Jaén (España)
mdrubia@ujaen.es

***Abstract*— Este trabajo destaca la importancia de fomentar la cultura emprendedora en estudiantes universitarios mediante proyectos desarrollados en el aula. Se busca motivar y formar a futuros emprendedores, desarrollando habilidades prácticas y conocimientos empresariales. El enfoque principal es la introducción de mentores en emprendimiento, con perfiles afines a los estudiantes, para adquirir la competencia en "emprendimiento" a través de conferencias, reuniones de coworking y el empleo de redes sociales. La experiencia ha sido satisfactoria, fortaleciendo las colaboraciones entre la universidad, empresas y centros tecnológicos. La presencia de mentores ha motivado a los estudiantes a participar en iniciativas emprendedoras y orientar sus trabajos de las asignaturas hacia ideas innovadoras.**

Keywords— Mentorización, experiencia docente, emprendimiento.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe una clara apuesta por el fomento de la cultura emprendedora en estudiantes de Universidad para lo cual se vienen estableciendo programas y proyectos desarrollados en el aula [1]. Estos planes, pretenden motivar y formar a futuros emprendedores, impartiéndoles conocimientos específicos sobre materias empresariales y promoviendo, de un modo práctico, el desarrollo de habilidades para el emprendimiento, como la iniciativa, la creatividad, la responsabilidad, la toma de decisiones o el trabajo en equipo. Desde hace años, se observa una correlación sólida entre el fomento del espíritu emprendedor y los resultados económicos en términos de crecimiento, innovación, creación de empleo, cambio tecnológico e incremento de la productividad. Este punto de vista ha suscitado un creciente interés por desarrollar programas educativos que fomenten y potencien el espíritu empresarial [2-5]. Las universidades del siglo XXI puedan convertirse en importantes motores del desarrollo tecnológico y de crecimiento económico. La inclusión en los programas académicos de disciplinas específicas relacionadas con la creación de empresas, la creación de unidades de apoyo al autoempleo y al desarrollo de programas de emprendimiento universitarios, o los talleres de creatividad y emprendimiento son algunos ejemplos de iniciativas desarrolladas en el seno de las universidades con el objetivo de animar a los estudiantes a crear empresas [5].

Los títulos de grado en ingeniería y el emprendimiento están relacionados en varios aspectos importantes. El ingeniero actual además de aplicar principios científicos y técnicos para diseñar, construir y mantener estructuras, máquinas, sistemas y procesos debe ser capaz de identificar oportunidades de negocio, desarrollar soluciones innovadoras y comercializar productos y servicios. Los ingenieros pueden ser considerados como impulsores de la innovación tecnológica que será fundamental para el éxito de muchos emprendimientos tecnológicos. Además, los emprendedores con formación en ingeniería pueden: transformar las ideas en productos o servicios que son técnicamente sólidos y comercialmente viables; también están preparados para planificar, ejecutar y controlar proyectos empresariales, asegurando que se completen dentro del presupuesto y el plazo previsto.

En resumen, los títulos de grado en ingeniería y el emprendimiento están intrínsecamente relacionados, ya que los ingenieros están bien posicionados para identificar oportunidades, desarrollar soluciones innovadoras y llevar productos y servicios al mercado. La formación en ingeniería proporciona una base sólida en resolución de problemas, pensamiento analítico y trabajo en equipo interdisciplinar, que son habilidades fundamentales para el espíritu emprendedor. Esta relación se ha vuelto cada vez más importante en un entorno empresarial impulsado por la tecnología y la innovación [6-10].

Tras varias ediciones de Proyectos de Fomento de Cultura Emprendedora y algunos casos de éxito con estudiantes de ingeniería, los autores de este trabajo han considerado en el curso académico 2022-2023 introducir la figura de MENTOR en emprendimiento en la experiencia docente. El objetivo de este trabajo es incorporar la formación entre iguales con la figura del mentor en la formación en emprendimiento. El mentor tratará de acercar la formación en emprendimiento al aula. Su colaboración se centra en asesorar, impulsar y acompañar a estudiantes de distintas titulaciones de Grado y Máster en sus ideas de negocio, TFG y TFM. Además, el trabajo muestra cómo la formación entre iguales ha podido ser dinamizada mediante un grupo de Facebook para facilitar la formación fuera del aula.

II. Características de las herramientas utilizadas en la experiencia docente

En esta sección se muestra en primer lugar las características de la mentorización y cuáles son las cualidades que han servido en la selección de los mentores incorporados a la experiencia docente. A continuación, se mostrarán las características que han hecho de la elección de las redes sociales el vehículo para dinamizar la interacción entre los mentores y el grupo de clase. Así como las características de Facebook, para ser seleccionada en este trabajo.

A. Los mentores y su selección

La mentorización de estudiantes, es un proceso donde individuos con experiencia y conocimientos en un área específica, ofrecen orientación y apoyo a aquellos que desean aprender y desarrollarse en dicho área. El propósito de la mentorización es facilitar el crecimiento y el logro de objetivos profesionales y personales de las personas mentorizadas, proporcionándoles habilidades, conocimientos y perspectivas necesarias para su desarrollo. Esto es una práctica que ha ganado reconocimiento en diversos ámbitos, incluido el académico [11, 12].

En el ámbito académico, la mentorización se ha implementado con el fin de favorecer la integración de los alumnos en el contexto universitario y mejorar su rendimiento académico [13-15]. Y se plantea conceptualmente como una mentorización instrumental se centra en proporcionar al mentorizado las habilidades y recursos necesarios para alcanzar el éxito en un contexto específico, y de otro lado se puede realizar una mentorización socioemocional que se enfoca en brindar apoyo social y emocional al estudiante [16, 17].

Un mentor en el ámbito de la formación debe poseer una serie de cualidades que lo hagan efectivo en su rol de guía y facilitador del aprendizaje. Un mentor en un aula de formación debe cumplir requisitos como:

- El mentor debe demostrar interés tanto en el tema que está enseñando como en el progreso y desarrollo de los estudiantes. Esta motivación debe promover tanto el conocimiento como el crecimiento personal y profesional.
- Un mentor experimentado debe ser capaz de aportar una perspectiva estratégica que enriquezca el aprendizaje de los estudiantes. Debe cuestionar de manera crítica y objetiva para identificar aspectos críticos y áreas de mejora.
- El mentor debe adoptar una actitud pasiva, donde escuche más de lo que hable y permita que los estudiantes desarrollen sus propias ideas y análisis. Su función es proporcionar orientación y abrir nuevas vías de exploración, sin eclipsar al estudiante mentorizado.
- Es fundamental que el mentor sea capaz de entender y empatizar con las necesidades y situaciones individuales de los estudiantes. Además de transmitir sus conocimientos de manera clara y comprensible.

En resumen, desde el punto de vista de nuestra experiencia en formación en emprendimiento será una persona que acompaña en el desarrollo y crecimiento de tu negocio, independientemente de la etapa en la que se encuentre, sino también como una persona cercana que comparte sus enseñanzas para proporcionar una guía clara sobre los pasos a dar para alcanzar los objetivos propuestos [18-20].

Por todo ello, se ha pensado en perfiles cercanos a los estudiantes que han participado en este proyecto, (profesionales de la ingeniería, antiguos alumnos de UJA, rango de edad 30-40…etc) Fig. 1.

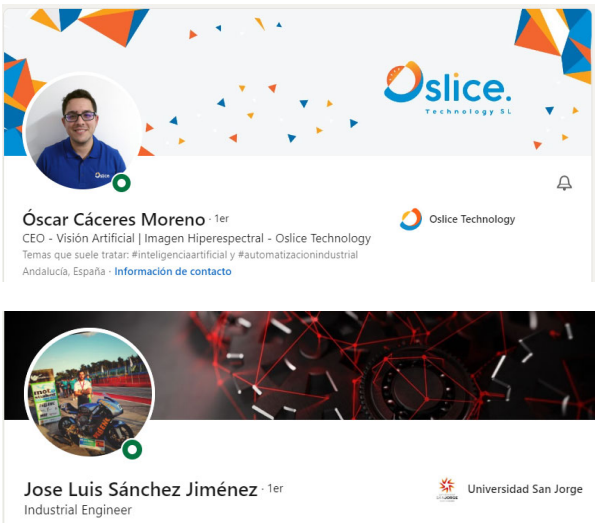


Fig. 1. Los mentores que formarán en emprendimiento.

Con esta selección se busca que el alumnado se vea identificado en los mentores y acepten de forma más directa y sencilla sus consejos y recomendaciones.

B. Las redes sociales en la formación y el uso de Facebook en la formación.

Internet y las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) han facilitado la creación de grupos con intereses comunes en redes sociales, que se han convertido en herramientas útiles para el aprendizaje continuo [21].

Estas plataformas ofrecen entornos creativos con diversas herramientas (sonidos, archivos, imágenes, videos, etc.), promoviendo el autoaprendizaje, la retroalimentación y el contacto con expertos. Además, son altamente utilizadas por los estudiantes, siendo una parte integral de su vida cotidiana, donde comparten información, interactúan y fortalecen sus relaciones sociales, contribuyendo a la construcción de su identidad y aprendizaje[22-24]. Las redes sociales en internet pueden clasificarse en genéricas (como Facebook, Instagram y Twitter), profesionales (como LikedIN y ResearchGate), y temáticas (como Pinterest y YouTube), cada una con su enfoque específico. En el ámbito universitario, se han llevado a cabo diversas experiencias exitosas en disciplinas como Ciencias Sociales, Humanidades, Comunicación, Periodismo, Ciencias e Ingenierías, que han sido bien recibidas por los estudiantes implicados[25-27].

En este trabajo se ha utilizado la red social Facebook. La elección de Facebook como herramienta para este estudio se fundamenta en varias razones. En primer lugar, se destaca su facilidad de uso y la disponibilidad de una amplia gama de aplicaciones que pueden ser útiles para los propósitos del estudio. Además, se considera que no se requieren conocimientos avanzados en informática para utilizar esta

plataforma, lo que la hace accesible para la mayoría de los estudiantes participantes. Facebook se puede decir que es una red social generalista de uso masivo, lo que la hace adecuada para este estudio. Asimismo, se respalda la elección de Facebook debido al uso de esta herramienta durante varios cursos consecutivos por el profesorado en la formación sobre emprendimiento. El grupo generado en Facebook para la actividad cuenta con gran número de usuarios registrados, así como una alta tasa de visitas, además de destacar que los estudiantes se mantienen en el grupo a pesar de haber finalizado la asignatura [28].

El perfil demográfico de los usuarios de Facebook, principalmente en personas de entre 25 y 50 años. Este rango de edad es superior al perfil del alumnado participante en el estudio, pero en general ellos cuentan con perfil en esta red y al asociarlo a su formación los estudiantes no plantean ninguna oposición a su uso.

Desde este enfoque, el presente trabajo presentará los resultados derivados del uso de la red social Facebook con el propósito de servir como canal de comunicación entre el mentor y el estudiantado. Esta herramienta permite una dinámica de aprendizaje y enseñanza, así como de fomentar la generación de conocimiento colaborativo entre los estudiantes de ingeniería. Se busca, además, determinar el grado de uso y utilidad percibida por los alumnos en relación con la mejora y facilidad de su proceso de enseñanza-aprendizaje.

En esta línea, se han diseñado actividades, orientadas por los mentores con un enfoque emprendedor y empresarial para complementar la formación de los estudiantes y que además estén relacionadas con la asignatura del grado de ingeniería electrónica industrial, instrumentación electrónica. Este enfoque tiene como objetivo primordial fomentar la cultura emprendedora entre los estudiantes, dotándolos de herramientas y habilidades relevantes para su futuro profesional.

Los resultados obtenidos de la utilización de Facebook como plataforma de aprendizaje colaborativo y emprendimiento en el ámbito de la ingeniería se presentan en las secciones siguientes, brindando una visión integral de los beneficios y desafíos asociados con esta modalidad de enseñanza.

III. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

La experiencia ha sido realizada durante el curso 22/23 con 35 alumnos, que cursan el Grado en Ingeniería Electrónica Industrial. La asignatura implicada en la experiencia es Instrumentación electrónica. Se trata de una asignatura obligatoria de tercer curso que se imparte en el segundo cuatrimestre. La experiencia involucra a profesorado de varias áreas de conocimiento, que mantienen reuniones de coordinación y plantean la metodología más adecuada para realizar el proyecto, tras una amplia documentación del tema [29, 30] Fig. 2.

Como se puede observar en la Fig. 2, en la primera etapa, al inicio del cuatrimestre, se presenta la iniciativa en el aula. La actividad por parte del estudiantado comenzará en la segunda parte del primer trimestre, a finales de marzo. En este momento el estudiantado ya tiene los suficientes conocimientos de la asignatura. El estudiante habrá visto en el aula todos los conceptos de instrumentación electrónica generales y cada uno de los elementos que forman la cadena

Fig. 2. Esquema de la metodología seguida.

de medida: sensores, acondicionamiento de señal, filtrado, multiplexación, conversión de señal y las características de los sistemas de adquisición de datos.

La formación en emprendimiento se plantea al alumnado como una actividad relacionada con la asignatura, pero voluntaria. El alumno podrá conseguir un punto extra de la nota final, que se aplica sólo si el alumno tiene una nota superior a 5 puntos.

El profesor además de explicar las herramientas que se usarán para la formación en emprendimiento: Una serie de actividades propuestas por los mentores y que les servirán para completar uno de los trabajos de la asignatura aportando el matiz de innovación, convertir en idea de negocio el proyecto que propongan y hacer una idea técnicamente viable.

La asignatura seleccionada, instrumentación electrónica tiene un gran potencial en el ámbito del emprendimiento por aspectos como:

- La innovación tecnológica: Los conceptos y elementos de instrumentación electrónica presentan avances tecnológicos que van a permitir la creación de instrumentación más precisa, compacta y versátil. Un emprendedor puede aprovechar estas innovaciones para desarrollar dispositivos y sistemas de medición más eficientes y avanzados.
- Demanda en diversos sectores: La instrumentación electrónica tiene aplicaciones en una amplia gama de industrias, como la salud, la industria automotriz, la energía, la manufactura, la investigación científica, entre otras. Esto significa que hay una demanda constante de nuevos dispositivos y sistemas de medición adaptados a las necesidades específicas de cada sector.
- Tendencias de digitalización: Internet de las Cosas (IoT) y la digitalización de procesos en diferentes industrias, hacen necesaria una creciente demanda de sensores y dispositivos electrónicos para recopilar y analizar datos en tiempo real. Los emprendedores

pueden aprovechar estas tendencias para desarrollar soluciones innovadoras que mejoren la eficiencia y la competitividad de las empresas.

- Impacto social y medioambiental: La instrumentación electrónica puede contribuir a la resolución de problemas sociales y medioambientales. Por ejemplo, la monitorización de la calidad del aire y del agua, el control y seguridad en entornos laborales, la optimización de procesos industriales para reducir el consumo de energía y materiales, entre otros. Los emprendedores pueden desarrollar soluciones innovadoras que generen un impacto positivo en la sociedad y el medio ambiente, al tiempo que crean oportunidades de negocio rentables.

Los mentores tratarán de guiar al alumnado para que resalte en sus proyectos estos cuatro aspectos. Se cuenta con mentores con experiencia que van a contribuir a la formación en emprendimiento del alumnado. La red social Facebook, se ha empleado para organizar y diseminar las actividades en grupos fuera del aula y fomentar la interacción con los mentores.

Los mentores que han participado en esta actividad han sido estudiantes del centro de los grados ingeniería industrial especialidad mecánica y electrónica.

Entre las actividades planteadas se han solicitado búsqueda de información sobre emprendimiento en grupo (ayudas, convocatorias, herramientas, etc) para poder poner en marcha su negocio. Los alumnos se han organizarán en grupos de 3-4 alumnos máximo y han participado en los temas propuestos y comentado los post compartidos con los compañeros. A continuación, se muestran las instrucciones dadas al alumnado.

Cada mentor realiza 4 intervenciones (una cada 15 días aproximadamente) y además contesta las dudas que se planteen. Las cuatro intervenciones serían intentando captar la atención del grupo y transmitiendo su experiencia en el ámbito del emprendimiento.

En la primera intervención ambos mentores se presentan visibilizando aspectos como su formación y su experiencia laboral ligada al emprendimiento. En la segunda intervención tratan de mostrar al alumnado el aspecto social-ambiental del emprendimiento contando en primera persona cómo afecta a una empresa en la que se desarrollan profesionalmente el cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible, ODS. En la tercera intervención proponen al alumnado que incorporen en el proyecto final de la asignatura el matiz que podría hacer de ese proyecto una idea viable de negocio. Además, el alumnado debe incorporar el cumplimiento de alguno de los ODS para que sea una empresa sostenible socialmente, económicamente viable y respetuosa con el medio ambiente. Finalmente en mayo los mentores lanzan un post de despedida contando algunos servicios que han usado de las administraciones para poner en marcha sus empresas, premios que hayas conseguido en el ámbito del emprendimiento.

En la última etapa de la actividad se evaluarán los resultados del proyecto.

IV. Resultados

Los resultados de este trabajo van a ser presentados desde dos puntos de vista. Por un lado, la monitorización del uso de las redes sociales y análisis del comportamiento de los alumnos a lo largo del proyecto (frecuencia de participación, horario, temas de interés. etc.).

Se ha realizado un seguimiento de la participación en las actividades del alumnado utilizando las herramientas de Facebook.

Fig. 3. Monitorización de la actividad en el grupo de Facebook durante la experiencia de mentorización en emprendimiento.

En la actividad ha participado el 80% de la clase. Se han constituido 6 grupos de 4 alumnos. En la Fig. 3 se muestra de un lado (a y b) la actividad del grupo de Facebook en el periodo de tiempo en que los mentores interactúan con el grupo. En esta imagen destaca que los 6 grupos de estudiantes han estado muy activos y han interactuado no solo entre ellos sino también con los demás grupos de clase.

En la Fig. 3-c se muestra el número medio de veces al día que los miembros del grupo publican, comentan o reaccionan en el intervalo de fechas especificado de la actividad, así como el horario de la actividad. En ambos gráficos se pone de manifiesto que el estudiantado aprovecha para hacer esta actividad en su momento de menor actividad académica o de ocio. Esto es claramente una ventaja del uso de Facebook ya que el estudiantado a través de sus dispositivos móviles completa su formación de forma natural.

De otro lado se muestran los resultados del cuestionario facilitado por el Vicerrectorado de Transferencia del

Conocimiento, Empleabilidad y Emprendimiento que financia el proyecto. Los alumnos pueden elegir una puntuación del 1 a 4, siendo 4 la más favorable

1.Motivos por los que has participado en esta actividad

Tengo intención de emprender 2.72

Adquirir nuevos conocimientos 3.15

Incrementar el Curriculum 3.01

2. Considero que el emprendimiento es una salida laboral Media: 3.15

3. Te ha sido útil la actividad para conocer recursos, herramientas, entidades de emprendimiento Media: 3.03

Los resultados obtenidos con la encuesta del Vicerrectorado muestran que los alumnos otorgan una nota de notable a la actividad que se les ha planteado y la consideran útil para su futuro profesional

V. Conclusiones

Hoy en día, los cambios económicos y sociales de la sociedad ponen de manifiesto la importancia de desarrollar el espíritu empresarial y la creatividad. Las universidades, y los empresarios de éxito, como modelos para los estudiantes, como mentores, pueden desempeñar un papel importante en la educación empresarial de los jóvenes y en el fomento de su espíritu emprendedor. Desde este punto de vista, nuestro estudio ha investigado la influencia de la incorporación de un mentor en la formación en emprendimiento en el aula.

Las pautas indicadas por los mentores en el grupo de Facebook han permitido que los estudiantes conozcan aspectos como las fuentes de ideas empresariales, los contextos y las razones para crear una empresa y las principales fuentes de financiación. Las características de los mentores seleccionados representan una fuente de inspiración y motivación para que los estudiantes se conviertan ellos mismos en empresarios. Un buen mentor en el ámbito de la formación debe combinar un interés por el crecimiento de los estudiantes, una visión estratégica que enriquezca el aprendizaje, una conducta pasiva que fomente la autonomía y la exploración, y una capacidad de empatía que facilite la comprensión y el desarrollo personal y profesional de los estudiantes mentorizados.

Tampoco hay que pasar por alto como el uso de la red social permite al estudiantado formarse fuera del periodo académico. Esto proporciona a la actividad gran flexibilidad ya que el estudiante puede elegir la hora y día en la que completa su formación en emprendimiento.

Agradecimientos

Al Vicerrectorado de Transferencia del Conocimiento, Empleabilidad y Emprendimiento de la Universidad por la concesión del proyecto: Estrategias para fomentar el acercamiento entre los estudiantes de Máster y el emprendimiento, en la XII Convocatoria de Proyectos de Fomento de la Cultura Emprendedora para el curso 2023/2024.

Referencias

[1] Plan for the Promotion of Entrepreneurial Culture in the Public Educational System of Andalusia.https://www.juntadeandalucia.es/boja/2011/137/1. (accedido el 30/03/2024)

[2] Padilla Martínez, M. P., Loor Sandoval, E. L., & Guamanquispe Vargas, T. M. (2019). "Análisis del Emprendimiento Universitario desde la Perspectiva de la Universidad Pública" "Caso Facultad de Ciencias Administrativas". Ciencia Digital, 3(2), 43-59. https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v9i2.374

[3] Reyes, J., Sánchez, M. y Mejía, R. (2019). Influencia de la formación universitaria en las actitudes emprendedoras. Revista CEA, 5(10), 117-133. DOI: https://doi.org/10.22430/24223182.1240.

[4] Mueller, S. Increasing entrepreneurial intention: Effective entrepreneurship course characteristics. Int. J. Entrep. Small Bus. 2011, 13, 55–74.

[5] Barba-Sánchez, V.; Atienza-Sahuquillo, C. The development of entrepreneurship at school: The Spanish experience. Educ. Train. 2016, 58, 783–796.

[6] Rogowski, Michael Being an entrepreneur involves taking risks and fulfilling visions International Paperworld IPWIssue 10, Pages 23 - 242004

[7] C. Rus-Casas, L. Hontoria, G. Jimenez-Castillo, F. J. Munoz-Rodriguez, y J. D. Aguilar-Pena, «Teaching experiences. Developing the transversal skill of entrepreneurship in the classroom», Proc. - 2020 14th Technol. Appl. to Electron. Teach. Conf. TAEE 2020, 2020, doi: 10.1109/TAEE46915.2020.9163753.

[8] M.D. La Rubia, J.S. Bueno-Rodríguez, C. Rus-Casas, J.D. Aguilar-Peña, D. Eliche Quesada , «Self-diagnosis of entrepreneurial attitudes: creativity and innovation in engineering students», en International Conference on Education and New Learning Technologies, 2021, pp. 2200-2204. doi: 10.21125/edulearn.2021.0493

[9] M. D. La Rubia, C. Rus-Casas, S. Bueno-Rodriguez, J. D. Aguilar-Pena, y D. Eliche-Quesada, «Study of the entrepreneurial attitudes of STEM students», IEEE Access, vol. 9, pp. 112005-112018, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3103118.

[10] La Asociación Global de Investigación en Emprendimiento(GERA). Global Report 2022/2023 del Global Entrepreneurship Monitor. https://gem.ufm.edu/wp-content/uploads/2023/09/Reporte-Nacional-GEM-Guatemala-2022-2023.pdf (accedido el 30/03/2024)

[11] Ibáñez García, A.; Gallego Álvarez, T.; García Román, M.D.; Guillén Martín, V.M.; Tomé Merchán, D.; Castro Zamudio, S. University Mentoring Programmes for Gifted High School Students: Satisfaction of Workshops. Sustainability 2020, 12, 5282. https://doi.org/10.3390/su12135282

[12] J. Burgos Bardales y R. Burgos Bardales, «Mentoring y formación integral en el estudiante universitario», YACHAQ, vol. 7, n.º 1, pp. 91–106, dic. 2023.

[13] G. Nabi, A. Walmsley, and I. Akhtar, "Mentoring functions and entrepreneur development in the early years of university," Studies in Higher Education, vol. 46, no. 6, pp. 1159–1174, Jun. 2021, doi: 10.1080/03075079.2019.1665009.

[14] A. Yüksel and E. Bahadır-Yılmaz, "The effect of mentoring program on adjustment to university and ways of coping with stress in nursing students: A quasi-experimental study," Nurse Educ Today, vol. 80, pp. 52–58, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.nedt.2019.06.006.

[15] J. Fayram, N. Boswood, Q. Kan, A. Motzo, and A. Proudfoot, "Investigating the benefits of online peer mentoring for student confidence and motivation," International Journal of Mentoring and Coaching in Education, vol. 7, no. 4, pp. 312–328, Jan. 2018, doi: 10.1108/IJMCE-10-2017-0065.

[16] E. Soltovets, O. Chigisheva, and A. Dmitrova, "The role of mentoring in digital literacy development of doctoral students at British universities," Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education, vol. 16, no. 4, 2020, doi: 10.29333/ejmste/117782.

[17] L. Schenk, M. Sentse, M. Lenkens, G. E. Nagelhout, G. Engbersen, and S. Severiens, "Instrumental Mentoring for Young Adults: A Multi-Method Study," J Adolesc Res, vol. 36, no. 4, pp. 398–424, Jul. 2021, doi: 10.1177/0743558420979123.

[18] R. D. Robnett, P. A. Nelson, E. L. Zurbriggen, F. J. Crosby, and M. M. Chemers, "The Form and Function of STEM Research Mentoring: A Mixed-Methods Analysis Focusing on Ethnically Diverse Undergraduates and Their Mentors," Emerging Adulthood, vol. 7, no. 3, pp. 180–193, Jun. 2019, doi: 10.1177/2167696818758734.

[19] C. A. Smith, S. Beltman, J. Dinham, T. J. Dobinson, and J. Jay, "Supporting undergraduate university students through instrumental mentoring," Australian Journal of Teacher Education (Online), vol. 45,

no. 1, pp. 82–98, Jan. 2020, [Online]. Available: https://search.informit.org/doi/10.3316/ielapa.190689846482871

[20] J.L. Sánchez-Jiménez, F.J. Muñoz-Rodríguez, J.I. Fernández-Carrasco, J.D. Aguilar-Peña, M.D. La Rubia, C. Rus-Casas (2023) Mentoring as a tool for research initiation, EDULEARN23 Proceedings, pp. 3816-3823. doi: 10.21125/edulearn.2023.1034

[21] S. Roses, M. Gómez Aguilar, P. Farias. "Uso académico de redes sociales: análisis comparativo entre estudiantes de Ciencias y de Letras". Historia y Comunicación Social. Vol. 18. Nº Especial Diciembre. 667-678. 2013.

[22] N. Abuín. "Las redes sociales como herramienta educativa en el ámbito universitario" Revista Electrónica de ADA-Madrid. 3, (3); 199-205. 2009.

[23] D. Buckingham, J. Bautista Martínez-Rodríguez, J. "Jóvenes interactivos: nueva ciudadanía entre redes sociales y escenarios escolares". En: Revista Comunicar, nº 40. 2013

[24] M. López Zapico, J. Tascón, "El uso de Twitter como herramienta para la enseñanza universitaria en el ámbito de las ciencias sociales. Un estudio desde la Historia Económica". En: TESI, vol. 14, nº2. 2013.

[25] M. Túnez, J. Sixto. "Las redes sociales como entorno docente: Análisis del uso de Facebook en la docencia universitaria". En: Píxel-Bit, Revista de Medios y Educación, nº 41, p. 77-92. 2012.

[26] R. Martínez, F. Corzana, J. Millán. "Experimentando con las redes sociales en la enseñanza universitaria en ciencias". En: Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias, vol. 10, nº 3, p. 394-405. 2013.

[27] A. De Miguel. "El Facebook para la docencia en ingeniería marítima". En: Actas del Congreso Internacional de Docencia Universitaria e Innovación, celebrado en Barcelona en julio de 2012.

[28] Rus-Casas C, Eliche-Quesada D, Aguilar-Peña JD, Jiménez-Castillo G, La Rubia MD. The Impact of the Entrepreneurship Promotion Programs and the Social Networks on the Sustainability Entrepreneurial Motivation of Engineering Students. Sustainability. 2020; 12(12):4935. https://doi.org/10.3390/su12124935

[29] Muñoz Bonilla, H. A., & Vasco Gutiérrez, D. F. (2024). Desarrollo empresarial en la educación superior: un análisis de la relación entre la creatividad y la madurez tecnológica en emprendimientos universitarios. Educatio Siglo XXI, 42(1), 89–114. https://doi.org/10.6018/educatio.559901

[30] Al Koliby, Ibraheem Saleh;Al-Hakimi, Mohammed A.;Zaid, Mohammed Abdulrahman Kaid;Khan, Mohammed Farooque;Hasan, Murad Baqis;Alshadadi, Mohammed A. Green entrepreneurial orientation and technological green innovation: does resources orchestration capability matter? 2024, Vol. 37, Issue 1, pages 45 – 70. DOI: 10.1108/BL-06-2023-0199 Emerald Publishing Limited

Formación en ingeniería con proyectos reales, ABP. Diseño de espacios para el aprendizaje.

P. Gómez Vidal
Departamento de Ingeniería Eléctrica.
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Universidad de Jaén (España)
pvidal@ujaen.es
orcid.org/0000-0002-3147-2962

Juan I. Fernández-Carrasco
Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática.
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Universidad de Jaén (España)
jifernan@ujaen.es

F.J. Muñoz Rodríguez
Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática.
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Universidad de Jaén (España)
fjmunoz@ujaen.es

G. Jiménez-Castillo
Departamento de Ingeniería Eléctrica.
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Universidad de Jaén (España)
gjimenez@ujaen.es
orcid.org/0000-0002-5370-7283

C. Gilabert-Torres
C. Robles-García
Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática.
EPSJ Universidad de Jaén (España)
gilabert@ujaen.es
crobles@ujaen.es

C. Rus-Casas
Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática.
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Universidad de Jaén (España)
crus@ujaen.es
orcid.org/0000-0002-6982-4054

***Abstract*— En los últimos años, los títulos de grado han afrontado evaluaciones exhaustivas para garantizar la calidad y relevancia de la formación universitaria. Las agencias de calidad universitaria supervisan procesos de acreditación que involucran a diversos actores, y aseguran la transparencia y reconocimiento internacional. Estos procedimientos enriquecen las titulaciones al propiciar análisis y colaboración en la implementación de contenidos. En el ámbito de la ingeniería, se destaca la importancia del diseño de espacios educativos, enfocados en la integración de proyectos reales. En este trabajo se presenta la experiencia de utilizar instalaciones fotovoltaicas como proyectos de ingeniería, desarrollando competencias específicas y promoviendo habilidades clave en la gestión de proyectos industriales. La transformación de espacios de aprendizaje mediante proyectos reales se postula como esencial para una formación más completa y efectiva en ingeniería.**

Keywords—Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP), Proyectos de ingeniería, innovación educativa, experiencia docente.

I. Introducción

En los últimos años, las Universidades deben someter periódicamente a sus títulos de grado a diferentes procesos de evaluación y verificación cuya superación les permite seguir impartiendo dichos títulos. Durante el proceso, la agencia de calidad científica y universitaria correspondiente somete al título de grado a un proceso en el que intervienen todos los colectivos implicados en la formación del grado. Las acreditaciones y certificaciones están compuestas por fases que finalizan con la implantación de los programas, siempre que se cumplan unos principios de calidad, relevancia, transparencia, reconocimiento y demás requisitos establecidos por las agencias acreditadoras[1]. Estos procesos enriquecen las titulaciones de grado ya que se genera un espacio para el análisis y puesta en común tanto de contenidos como de la forma en la que se implementan en el aula. Se puede decir que la educación superior está sometida a unos procesos que favorecen la evolución del entorno educativo [2].

Esta evolución del entorno educativo que busca la calidad debe ir adaptándose a los problemas de la sociedad [3]. En este sentido, es necesario que la formación de grado capacite a los alumnos en la búsqueda de soluciones para abordar los desafíos medioambientales y energéticos a los que se enfrenta la sociedad. Es en este ámbito, en el que la formación en energías renovables debe ir ganando terreno a otro tipo de titulaciones que no tengan tanta relación con la resolución de problemas de la sociedad actual.

Sin duda la formación no puede permanecer ajena a las directrices que se están marcando desde la unión europea con políticas que apoyan al cambio climático y a la sostenibilidad energética [4]. Además, la situación geopolítica, y su impacto en los mercados de energía, ha llevado a los Estados miembros de la Unión Europea a tomar medidas urgentes para reducir su dependencia de los combustibles fósiles [5]. Desde la perspectiva de la formación en ingeniería, esto implica un aumento significativo en la demanda de profesionales con experiencia en energías renovables, eficiencia energética y tecnologías relacionadas. Los ingenieros especializados en estas áreas jugarían un papel crucial en el diseño, la implementación y la gestión de proyectos destinados a promover las energías renovables, reducir el consumo energético y mejorar la seguridad energética de la UE.

En el caso de España las políticas que incentivan las energías renovables están siendo muy efectivas [6]. En 2023, la generación de energía renovable, en especial la fotovoltaica, experimentó un crecimiento significativo. Según datos publicados por Red Eléctrica, en el año 2023 la contribución de las energías renovables a la generación eléctrica nacional alcanzó el 50,3%, un 15,1% más que el año anterior. En el caso de la fotovoltaica, sin contar el autoconsumo, su producción eléctrica aumentó un 38%, alcanzando los 37.332 GWh lo que supone un nuevo récord de generación anual y un máximo de participación en el mix nacional con un 14,0 %. [7].

Este crecimiento exponencial destaca la importancia de aprovechar las fuentes de energía limpia y sostenible para mitigar los impactos del cambio climático y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. En este contexto, la formación universitaria desempeña un papel fundamental al proporcionar a los futuros profesionales los conocimientos y habilidades necesarios para innovar, investigar y desarrollar

tecnologías fotovoltaicas más eficientes y económicas. La educación superior no solo impulsa la investigación y el desarrollo en este campo, sino que también cultiva una fuerza laboral capacitada y comprometida con la transición hacia un sistema energético más sostenible y resiliente [8].

Este aumento en la adopción de energías limpias subraya la necesidad de que la formación universitaria en el campo de las energías renovables no solo se enfoque en aspectos técnicos y científicos, sino que también incorpore una comprensión profunda de los problemas socioeconómicos y ambientales asociados. Los estudiantes y profesionales en formación deben estar capacitados para abordar estos problemas de manera integral, considerando no solo los aspectos técnicos de la generación de energía renovable, sino también su impacto en las comunidades locales, la economía y el medio ambiente. De esta manera, la formación universitaria en energías renovables no solo contribuye al avance de la tecnología, sino que también promueve una perspectiva interdisciplinaria y comprometida con la búsqueda de soluciones sostenibles para la sociedad.

Diversas instituciones universitarias en España, atentas a la creciente necesidad de profesionales capaces de abordar los retos tecnológicos actuales, han desarrollado una variedad de titulaciones enfocadas en la creación de un sistema energético sostenible. Se trata de titulaciones como el Grado en Ingeniería de la Energía, el Grado en Ingeniería de Energías Renovables y la Ingeniería en Energía, el Grado en Ingeniería Energética, el Grado en Ingeniería de Recursos Energéticos, el Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética y el Master en Ingeniería de los Sistemas Fotovoltaicos. Estos programas formativos abordan aspectos técnicos, científicos y socioeconómicos relacionados con la energía, proporcionando a los estudiantes las herramientas necesarias para abordar los desafíos del sector energético y contribuir al desarrollo de soluciones sostenibles.

Conscientes de esto, en la Universidad de Jaén, se han diseñado espacios para el aprendizaje en el ámbito de las energías renovables en dos títulos de grado en ingeniería industrial que desempeñan un papel crucial en la formación académica, especialmente en disciplinas como la ingeniería. De esta forma los grados en Ingeniería Eléctrica y el Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial presentan asignaturas dentro de sus planes de estudio que completan la formación en el ámbito de la energía solar fotovoltaica y otras energías renovables.

El objetivo de este trabajo es mostrar la propuesta llevada a cabo por un grupo de profesores para incorporar proyectos reales de ingeniería, implantados en el campus universitario como espacios de aprendizaje para la formación en ingeniería. Esto permitirá llevar al aula un aprendizaje basado en proyectos (ABP) en el que el proyecto real debe estructurarse como un espacio para la enseñanza y el aprendizaje en el aula. Este objetivo está en línea con el espíritu de formación de las memorias de grado en ingeniería industrial en las que proyectos basados en situaciones del mundo real presentan a los estudiantes desafíos auténticos que pueden encontrar en su futura carrera profesional. Esto les permite anticipar y abordar problemas reales, preparándolos mejor para su incorporación en la industria en el caso de la ingeniería.

Este trabajo se ha estructurado en tres secciones: en la primera sección se contextualiza el estudio y se señala el objetivo de la comunicación; en la segunda sección se presenta el entorno académico de las titulaciones en las que se han diseñado los espacios de aprendizaje en energía solar fotovoltaica usando proyectos reales; en la tercera sección se describen las instalaciones que corresponden a los proyectos reales, la valoración del alumnado al uso de herramientas que completan su formación y ejemplos del diseño realizado para el uso en la formación como resultado de la conexión de los proyectos con las asignaturas de los grados; y por último, se recogen las conclusiones más relevantes de la experiencia docente.

II. Entorno académico

La Escuela Politécnica Superior de Jaén, con una trayectoria centenaria en la formación en ingeniería industrial organiza sus grados siguiendo la Orden CIN/351/2009, de 9 de febrero, por la que se establecen los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial. Además, establece que los dos primeros cursos académicos el alumnado tenga una oferta de materias comunes con el resto de grados de la rama industrial ofertados (ingenierías Mecánica, Electrónica Industrial y de Organización Industrial). Esto tiene una componente importante en la organización del centro y además hace posible que el alumnado pueda modificar su elección de grado, si así lo desea, si una vez iniciados los estudios comprueba que su perfil se adapta mejor a otra especialidad.

El centro presenta una formación con un importante componente práctico y con asignaturas actualizadas en función de los avances de la tecnología y las demandas de la sociedad. Esto garantiza al alumnado una buena integración en el mercado laboral y una fácil adaptación a los continuos cambios que acontecen en este campo de la Ingeniería. Las titulaciones poseen el Certificado Sello Internacional de Calidad EUR-ACE. A continuación, se presentan las asignaturas de los grados en ingeniería eléctrica e ingeniería electrónica industrial de la EPSJ de la UJA, en las que se usarán, en la formación en ingeniería, proyectos reales relacionados con instalaciones fotovoltaicas [8][9].

La experiencia docente está relacionada con los cursos 3 y 4 en los que el estudiantado cursa asignaturas específicas de cada especialidad y propias de la mención o intensificación de sus estudios.

A. Grado en Ingeniería Eléctrica (GIE) EPSJ-UJA.

En este apartado se tiene una descripción del Grado en Ingeniería Eléctrica (GIE), el cual habilita para ejercer la profesión regulada de Ingeniero Técnico Industrial especialidad en Electricidad [5]

Esta profesión se centra en todo lo referente a la generación, distribución, control y uso de la energía eléctrica. Actualmente, y según los informes de empleabilidad, se encuentra en auge creciente ante la demanda social de una utilización eficiente, limpia y sostenible de los recursos energéticos, que pasa necesariamente por el desarrollo e implantación de nuevas realidades como el vehículo eléctrico, las fuentes renovables o la gestión inteligente de las redes eléctricas, aspectos que comprende este grado.

Las asignaturas de 3 y 4 curso del GIE aportan la formación específica de la especialidad. En la experiencia docente se pueden involucrar las asignaturas como

instalaciones de baja y alta tensión, de tercero y de cuarto curso sistemas eléctricos de potencia y centrales eléctricas II. Estas asignaturas, tienen capítulos que pueden ser candidatos a utilizar los datos de los proyectos reales para la formación del alumnado. Además de las asignaturas, Tabla I, optativas de cuarto curso. Se trata de asignaturas específicas de las menciones del grado: Instalaciones Eléctricas, Generación Eléctrica con Energías Renovables y Sistemas Eléctricos.

TABLA I ASIGNATURAS DE LAS MENCIONES DEL GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.

Mención	Asignaturas	Créditos
Instalaciones eléctricas y	**Protecciones Eléctricas**	6
	Tecnología de la Iluminación	6
	Eficiencia y Ahorro Energético	6
	Topografía y Construcción	6
	Técnicas de la ingeniería Gráfica Aplicadas a la ingeniería eléctrica	6
Generación Eléctrica con Energías Renovables	**Integración en la red de sistemas de energía renovables**	6
	Generación de Energía Eléctrica con Energías Renovables	6
	Recursos Hidroeléctricos	6
	Tecnología Eléctrica de los Sistemas Fotovoltaicos	6
Sistemas Eléctricos	**Protecciones Eléctricas**	6
	Integración en la red de sistemas de energía renovables	6
	Automatización de Sistemas Eléctricos	6
	Smart Grids. Redes Eléctricas Inteligentes	6
	Explotación y planificación del sistema eléctrico	6

Además de las asignaturas de la tabla, el alumnado puede elegir la asignatura Prácticas de empresa, que se podrá asociar a todas las menciones. De las 14 asignaturas optativas ofertadas el alumnado debe escoger 5 asignaturas, organizadas en forma de mención o no para completar los 240 créditos del grado. Señaladas en negrita se encuentran las asignaturas relacionadas con las instalaciones fotovoltaicas reales.

B. Grado en Ingeniería Electrónica Industrial (GIEI) EPSJ-UJA.

En éste grado el alumnado adquiere formación en Tecnología Electrónica y Automática Industrial, según la Orden CIN/351/2009. Abarca lo referente a la integración de sistemas electrónicos en la industria, el control y la automatización de los procesos de producción, robótica, microprocesadores, comunicaciones industriales, sensorización, instrumentación y programación industrial [6].

En esta titulación, las asignaturas que se relacionan con la experiencia docente es la asignatura de tercer curso, "Introducción a los sistemas fotovoltaicos". Esta asignatura trata de imprimir en el título la formación en este campo ya que los docentes implicados del centro cuentan con una amplia trayectoria en los sistemas fotovoltaicos y los dispositivos eléctricos y electrónicos que los componen. Además de las asignaturas de Electrotecnia Avanzada y Electrónica de Potencia, que son asignaturas de tercer y cuarto curso respectivamente.

Las menciones en el GIEI permiten al alumnado elegir las asignaturas optativas según tres menciones, (tabla II): Sistemas Electrónicos, Automática y Sistemas Fotovoltaicos.

TABLA II ASIGNATURAS DE LAS MENCIONES DEL GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRONICA INDUSTRIAL.

Mención	Asignaturas	Créditos
Sistemas Electrónicos	Programación	6
	Sistemas de Adquisición de Datos	6
	Sistemas Digitales	6
	Electrónica Aplicada a la Iluminación del automóvil	6
	Tecnología Electrónica y desarrollo de Prototipos Electrónicos	6
	Microelectrónica	6
Automática	Programación	6
	Sistemas de Adquisición de Datos	6
	Visión por computador	6
	Robótica Industrial	6
	Modelado y control de Máquinas eléctricas	6
	Domótica e Inmótica	6
Sistemas Fotovoltaicos	Programación	6
	Sistemas de Adquisición de Datos	6
	Instalaciones Fotovoltaicas	6
	Electrónica aplicada a los Sistemas Fotovoltaicos	6
	Gestión y mantenimiento de Sistemas Fotovoltaicos	6
	Tecnología Eléctrica de los Sistemas Fotovoltaicos	6

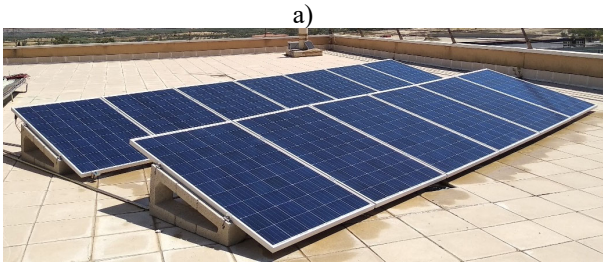
Como en el caso del GIE a las asignaturas de esta tabla se une la asignatura Prácticas de empresa que puede estar asociada a todas las menciones. De esta forma el alumnado cuenta con 14 asignaturas optativas, de las cuáles debe escoger 5. Aunque, como se indica en la tabla, si se quiere obtener una mención se deben elegir todas de la misma mención. Se han marcado en negrita en la tabla II, las asignaturas que están relacionadas con los proyectos reales de sistemas fotovoltaicos.

III. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO Y RESULTADOS OBTENIDOS

Este trabajo se enmarca dentro de un proyecto de innovación docente en el que se pretenden desarrollar herramientas para apoyar la enseñanza y el aprendizaje de los estudiantes de grado en ingeniería. Las propuestas del proyecto tienen en cuenta en la amplia experiencia de los autores en la elaboración de recursos docentes que fomentan el aprendizaje activo del estudiantado [11-16]. Además, en los últimos años se ha tratado de conectar la formación en sus diferentes niveles: grado, máster y estudios de doctorado. En este sentido, se han generado recursos con los resultados de proyectos de investigación que podrán ser usados en la formación de estas etapas [17-19].

En este trabajo se muestra la propuesta de incorporar a la formación de 10 asignaturas en el caso del GIE y 8 asignaturas en el caso del GIEI proyectos reales de ingeniería. Para ello, los docentes plantean utilizar la experiencia obtenida en instalaciones fotovoltaicas reales (Fig. 1) como ejemplos de proyecto de ingeniería para abordar la formación en estas asignaturas de dos de los grados en la Universidad de Jaén. Para ello será necesario establecer una relación entre las partes de cada uno de los proyectos reales y los contenidos de las asignaturas propuestas.

a)



b)

c)

Fig. 1. Fotografías de los proyectos de ingeniería. a) proyecto UNIVER, b) Proyecto del laboratorio de ingeniería eléctrica y c) instalaciones de Endesa en las cubiertas del campus destinadas al autoconsumo de la UJA.

En la Fig. 1, se muestran tres fotos de los proyectos de ingeniería que hay en el Campus de las lagunillas destinados tanto a la producción energética como a la formación del alumnado. Se destaca la Fig. 1.a en la que se aprecia una imagen de lo que en su momento fue conocido como proyecto "UNIVER" (Universidad Verde). Esta instalación forma parte de un proyecto europeo en el marco del programa THERMIE de la Unión Europea. El proyecto fue un hito en las instalaciones fotovoltaicas ya que, con sus 200 kWp y en el momento de su construcción, se trataba de una de las mayores instalaciones fotovoltaicas ubicadas en un lugar de pública concurrencia.

En la Fig. 2, se muestra un esquema de la metodología necesaria para adaptar un proyecto de ingeniería para poder ser usado en la formación. En una primera etapa se debe conocer el proyecto de la instalación para mostrarlo como ejemplo en el aula.

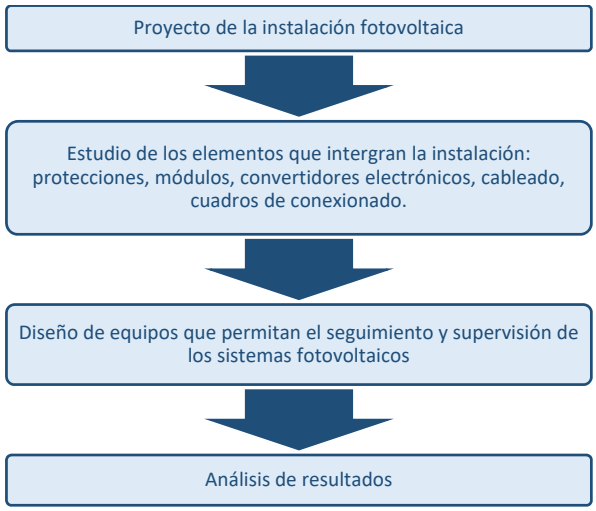


Fig. 2. Esquema de la metodología del diseño de espacios para el aprendizaje.

En la segunda etapa de la metodología se analiza la función de los distintos elementos que forman la instalación que pueden ser estudiados de manera aislada y como parte del proyecto. En esta etapa se podrá hacer consciente al alumno de aspectos como la separación entre las filas de módulos que componen el generador, cálculo de secciones de conductores o las protecciones empleadas en las instalaciones. Estos contenidos se usarán en la formación de asignaturas como: Protecciones eléctricas, Generación de energía eléctrica con energías renovables, Instalaciones fotovoltaicas o Tecnología eléctrica de los sistemas fotovoltaicos.

En esta etapa se pueden estudiar las protecciones, los módulos, los convertidores electrónicos, el cableado y los cuadros de conexión. Estos contenidos se usarán en la formación de asignaturas como: Generación de energía eléctrica con energías renovables, Instalaciones fotovoltaicas o Electrónica aplicada a los sistemas fotovoltaicos. En la tercera etapa se estudian los elementos que integran la monitorización de las instalaciones. En este sentido se abordará conceptualmente conceptos de instrumentación electrónica, sensórica, sistemas de adquisición de datos y comunicaciones. Todos estos equipos además deben de ser programados y se pueden ver en la formación de asignaturas como: Sistemas de adquisición de datos, Electrónica aplicada a los sistemas fotovoltaicos o Instalaciones fotovoltaicas.

En el último bloque del esquema se realiza el análisis de resultados. Este es el bloque más importante ya que va a permitir al alumnado determinar si el diseño se ha realizado correctamente y algunos de los eventos que pueden suceder en este tipo de instalaciones.

La formación será efectiva si se preparan una serie de materiales que hagan posible al docente estudiar el proyecto de forma ordenada en el aula. Para ello en los próximos cursos académicos se deben diseñar los materiales con sus correspondientes guiones prácticos que planifiquen adecuadamente el uso de estas instalaciones.

Actualmente, la instalación de la Fig. 1 b) ha sido la primera en la que se ha aplicado la metodología planteada en este trabajo. En las Fig. 3 y Fig. 4, se muestra una captura de

pantalla de la aplicación desarrollada en Labview que permite conocer los valores de las variables medidas en la instalación. El entorno de programación proporciona los valores eléctricos de las variables. De esta forma, de manera sencilla el alumnado podrá acceder a los datos de la instalación, así como a los valores de funcionamiento de la misma. Con el análisis de los datos medidos en las instalaciones fotovoltaicas se podrán establecer además estrategias que mejoren el diseño de instalaciones y diseñar protocolos de supervisión y mantenimiento de las instalaciones.

Los datos reales obtenidos permitirán al alumnado conectar los métodos de cálculo teóricos con las consideraciones que se deben tener en cuenta en estos proyectos reales. Todos estos conceptos se pueden incluir en asignaturas como: Gestión y mantenimiento de Sistemas fotovoltaicos, Sistemas de adquisición de datos, Tecnología eléctrica de los sistemas fotovoltaicos o Introducción a los sistemas fotovoltaicos.

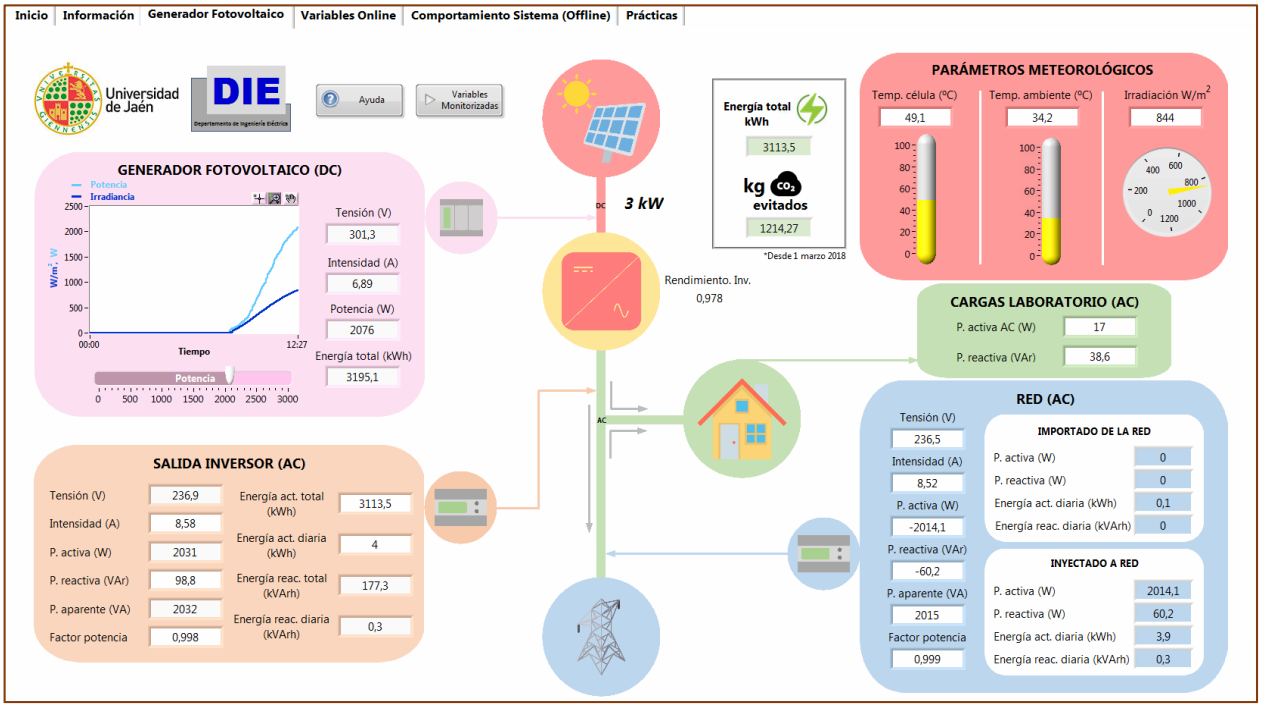


Fig. 3. Captura de pantalla del Sistema de monitorización de la instalación b).

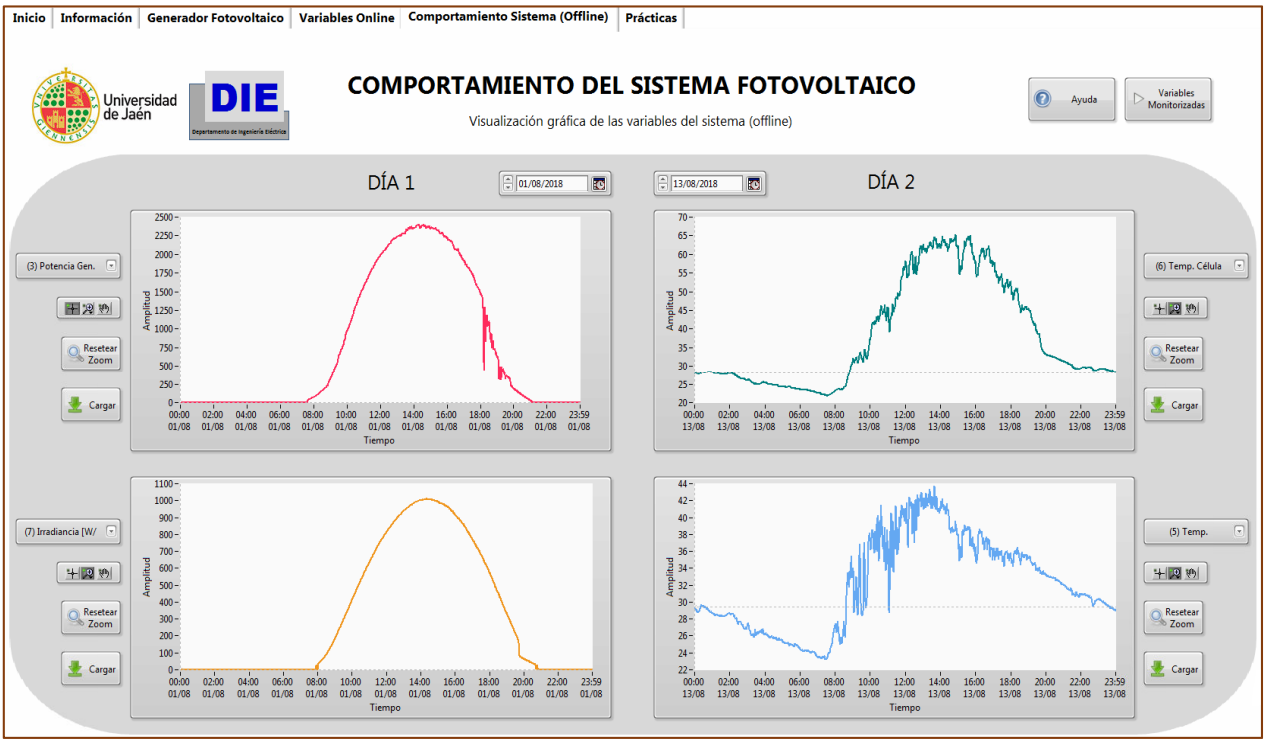


Fig. 4. Captura de pantalla de la evolución de las variables en el Sistema de monitorización de la instalación b).

Como resultados de la experiencia se puede decir que el estudiante adquiere competencias de forma separada en las asignaturas que tienen relación con las partes del proyecto y de forma conjunta se le proporciona la competencia en proyectos como habilidad fundamental para el ingeniero industrial.

En la formación en el ámbito de las instalaciones fotovoltaicas lo habitual es tomar programas de simulación como, por ejemplo: Pspice [11], PVsys [20, 21], o Homer [20] para realizar la formación práctica del alumnado. Incluso que el profesorado implicado en la formación desarrolle entornos de programación o aplicaciones para poder formar al alumnado de una manera más sencilla [14]. Ambas opciones harán posible que el alumnado pueda simular diferentes escenarios de funcionamiento que de otra forma sería muy complicado.

En ambos casos el alumnado tendrá una imagen ideal de la respuesta de las instalaciones. Si se usa como espacio de aprendizaje la instalación real el estudiante conocerá de primera mano eventos que suceden en el día a día de las instalaciones como por ejemplo la bajada del rendimiento de las instalaciones, con la suciedad o la alteración en la generación eléctrica cuando se tiene un día nublado. Estos hechos permitirán al estudiante adquirir una serie de resultados de aprendizaje que de otra forma no son posibles si no se cuenta con datos de proyectos reales.

Para evaluar la percepción del alumnado ante esta propuesta se ha planteado a un grupo de estudiantes de grado y alumnos que actualmente realizan su trabajo fin de grado que valoren dos cuestiones. Las cuestiones deben ser valoradas de 1 a 5, siendo 1 la menos favorable y 5 la más favorable Fig. 5.

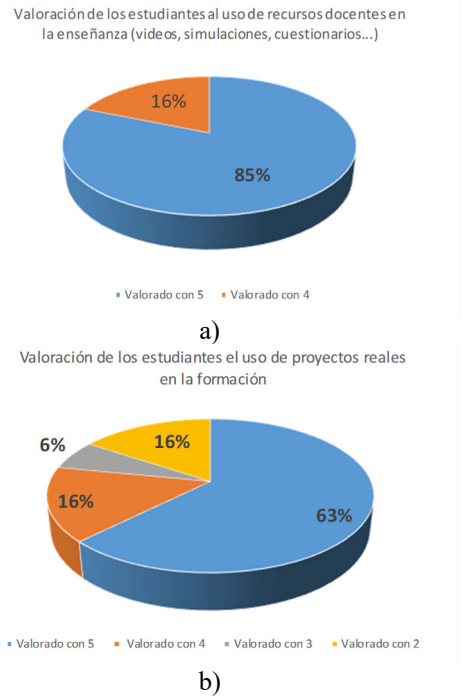


Fig. 5. Valoración de los estudiantes. a) al uso de recursos docente b) al uso de instalaciones reales en la formación

Como se puede apreciar en la figura 5 a) en 85% de los encuestados otorgan una valoración de 5 al hecho de que el profesorado integre en la formación el uso de videos, simulaciones y otros recursos docentes. De otro lado en la figura 5 b) el 79% de los estudiantes encuestados otorgan una nota de 4 o 5 al hecho de que se incorporen instalaciones reales en la formación en ingeniería.

Desde el punto de vista del profesorado el alcanzar el objetivo propuesto en el trabajo, proyectos reales de ingeniería implantados en el campus universitario como espacios de aprendizaje para la formación en ingeniería, hace que se consigan unos resultados que permiten favorecer aspectos como:

- La coordinación del profesorado de los departamentos de ingeniería eléctrica e ingeniería electrónica y automática. Se garantiza una enseñanza de calidad si además el profesorado está al día de las tendencias de todos los elementos que integran el proyecto para mostrar en el aula como se implementarían en un nuevo proyecto.
- Aparecen nuevas colaboraciones entre departamentos y grupos de investigación, para identificar áreas de mejora en la formación en energía solar fotovoltaica.

IV. Conclusiones

Durante varios cursos académicos y a través de algunos de los miembros del equipo de investigación ENIAS se han diseñado aplicaciones que permiten interactuar con las instalaciones que componen proyectos reales de ingeniería de instalaciones fotovoltaicas. Con estas herramientas estará al alcance del alumnado la posibilidad de evaluar el funcionamiento de los generadores fotovoltaicos en su conjunto o en parte de los mismos. Esto permitirá realizar una formación de calidad ya que se cuenta con datos reales de funcionamiento y no con datos procedentes de programas de simulación.

Esta iniciativa ha tenido una buena acogida por parte del alumnado ya que el 79% de los estudiantes encuestado valoran con 4-5 la incorporación de proyectos reales en la formación. En este sentido se puede decir que esta propuesta será positiva tanto para el estudiantado como para el profesorado ya que ha conseguido el diseño de espacios educativos nuevos en los que la integración de proyectos reales puede ser la clave para una formación en ingeniería más completa y efectiva. Con estos proyectos de ingeniería, no solo se habrá contribuido a la reducción de la huella de carbono del campus universitario, sino que también servirán como un caso de estudio y ejemplo de buenas prácticas en el uso de energías renovables en el ámbito educativo y de la investigación.

El trabajo que se presenta, se puede considerar como un trabajo en proceso que debe ser completado con la evaluación de los materiales ya desarrollados para el estudio de la instalación fotovoltaica Fig. 1b) en el aula. La evaluación del impacto en la formación del alumnado. Así como la elaboración de nuevos materiales que permitan incorporara el resto de proyectos reales presentes en el campus en la formación en las diferentes asignaturas de los GIE y GIEI.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Plan de Innovación y Mejora Docente (MIMED-UJA 2021) la concesión del proyecto ABPSF - Aprendizaje Basado en Proyectos y Problemas (ABP) con el apoyo de píldoras formativas y herramientas software en asignaturas de Energías Renovables (referencia: PIMED42_202123), junto al apoyo recibido por el programa

que financia los Proyectos orientados a la transición ecológica y digital. (Subvención nº TED2021-131137B-IO0 ("Contribución a la Transición Ecológica del Sector Industrial a través del Autoconsumo Fotovoltaico"). y el programa Investigo, (2022-c23-i01-p03.s0020-0000590) que ha sido financiado por la Unión Europea–con fondos Next Generation EU.

REFERENCIAS

[1] Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación (2022). Resultados de aprendizaje y procedimientos de aseguramiento de la calidad para la evaluación, certificación y acreditación de enseñanzas e instituciones, conforme al RD 640/2021 y al RD 822/2021. División de Evaluación de Enseñanzas e Instituciones. http://www.aneca.es/Documentos-y-publicaciones/ANECA-al-dia (accedido el 01/04/2024)

[2] Página de ANECA para la evaluación de los títulos de grado y máster. https://www.aneca.es/grado-master-universitario-verifica (accedido el 01/04/2024)

[3] Página de ANECA en la que se proponen los libros blancos corresopondientes a los títulos de grado y máster https://www.aneca.es/libros-blancos-verifica (accedido el 01/04/2024)

[4] Politicas de apoyo a la generación de energía de la UE Pacto Verde https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es (accedido el 01/04/2024)

[5] Orden ITU/1434/2023, de 26 de diciembre, PERTE de Descarbonización Industrial en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia y se realiza la convocatoria anticipada del año 2024. https://www.boe.es/eli/es/o/2023/12/26/itu1434 (accedido el 01/04/2024)

[6] Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.html (accedido el 01/04/2024)

[7] Informe annual de Red eléctrica de España https://www.ree.es/es/estadisticas-del-sistema-electrico-espanol/informe-anual (accedido el 01/04/2024)

[8] Sustainable Development Goals. Goal 7: Ensure access to affordable, secure, sustainable and modern energy. United Nations (https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/) (accedido el 01/04/2024)

[9] Memoria de Título Oficial Graduado o Graduada en Ingeniería Eléctrica por la Universidad de Jaén. Ministerio de Educación, cultura y deporte. Gobierno de España. Diciembre 2015. https://eps.ujaen.es/grados/grado-en-ingenieria-electrica (accedido el 01/04/2024)

[10] Memoria de Título Oficial Graduado o Graduada en Ingeniería Electrónica Industrial. Universidad de Jaén. Ministerio de Educación, cultura y deporte. Gobierno de España. Diciembre 2015. https://eps.ujaen.es/grados/grado-en-ingenieria-electronica-industrial

[11] J.D. Aguilar et al. "B-learning of photovoltaics systems using OrCAD PSPICE: Work in progress". Frontiers in Education Conference (FIE) IEEE, 1- 4, pp. 22-25, Oct. 2014 (doi: 10.1109/FIE.2014.7044211).

[12] J. D. Aguilar-Peña, F. J. Muñoz-Rodríguez, C. Rus-Casas, M. Romero-Moreno and P. J. Pérez-Higueras, "Educational tools in order to promote the self-learning. Practical case of study: Dimex SFCR," 2014 XI Tecnologias Aplicadas a la Ensenanza de la Electronica (Technologies Applied to Electronics Teaching) (TAEE), Bilbao, Spain, 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/TAEE.2014.6900131.

[13] R. Dorado, E. Torres-Jiménez, C. Rus-Casas and M. Jiménez-Torres, "Mobile learning: Using QR codes to develop teaching material," 2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE), Seville, Spain, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/TAEE.2016.7528363.

[14] C. Rus-Casas, L. Hontoria, M. Jiménez-Torres, F. J. Muñoz-Rodríguez and F. Almonacid, "Virtual laboratory for the training and learning of the subject solar resource: OrientSol 2.0," 2014 XI Tecnologias Aplicadas a la Ensenanza de la Electronica (Technologies Applied to Electronics Teaching) (TAEE), Bilbao, Spain, 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/TAEE.2014.6900129.

[15] F. J. Muñoz-Rodriguez, G. Jiménez-Castillo, C. Rus-Casas, J. I. F. -. Carrasco and E. F. Fernández, "Web app for a remote electronics instrumentation lab," 2014 XI Tecnologias Aplicadas a la Ensenanza de la Electronica (Technologies Applied to Electronics Teaching) (TAEE), Bilbao, Spain, 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/TAEE.2014.6900130.

[16] J. D. Aguilar-Peña, F. J. Muñoz-Rodríguez, C. Rus-Casas and J. I. Fernández-Carrasco, "Blended learning for photovoltaic systems: Virtual laboratory with PSPICE," 2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE), Seville, Spain, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/TAEE.2016.7528366.

[17] Snytko, F. J. Muñoz-Rodríguez, C. Rus-Casas, J. I. Fernández-Carrasco and G. Jiménez-Castillo, "A challenge for the beginning of research: sensors and their experimental data," 2022 Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (XV Technologies Applied to Electronics Teaching Conference), Teruel, Spain, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/TAEE54169.2022.9840724.

[18] C. Rus-Casas, F. J. Muñoz-Rodríguez, P. Roncero-Sánchez, J. I. Fernández-Carrasco and J. D. Aguilar-Peña, "End-of-degree project as an initiation to research," 2022 Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (XV Technologies Applied to Electronics Teaching Conference), Teruel, Spain, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/TAEE54169.2022.9840610.

[19] J. J. Garrido-García, C. Rus-Casas, F. J. Muñoz-Rodríguez, J. I. Fernández-Carrasco and G. Jiménez-Castillo, "Study of the implementation of photovoltaic self-consumption systems in educational centres," 2022 Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (XV Technologies Applied to Electronics Teaching Conference), Teruel, Spain, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/TAEE54169.2022.9840611.

[20] Ait Omar, Oumaima, EL Fadil, Hassan, El Fezazi, Nour Eddine, Oumimoun, Zakaria, Ait Errouhi, Ahmed and Choukai, Oumaima. "Real yields and PVSYST simulations: comparative analysis based on four photovoltaic installations at Ibn Tofail University" Energy Harvesting and Systems, vol. 11, no. 1, 2024, pp. 20230064. https://doi.org/10.1515/ehs-2023-0064

[21] S. Kumar, P. Upadhyaya, and A. Kumar, "Performance Analysis of Solar Energy Harnessing System Using Homer Energy Software and PV Syst Software," in 2019 2nd International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC), 18-19 Oct. 2019 2019, pp. 156-159, doi: 10.1109/PEEIC47157.2019.8976665.

DEMOSTRADORES 4 – SESIÓN DE DEMOSTRADORES

Aprendizaje de diseño digital basado en proyectos: Uso de leds RGB

Carlos Jesús Jiménez-Fernández
Dpto. Tecnología Electrónica
Universidad de Sevilla
Instituto Microlectrónica de Sevilla
IMSE-CNM CSIC/US
Sevilla, España
cjesus@imse-cnm.csic.es

Carmen Baena Oliva
Dpto. Tecnología Electrónica
Universidad de Sevilla
Instituto Microlectrónica de Sevilla
IMSE-CNM CSIC/US
Sevilla, España
baena@imse-cnm.csic.es

Pilar Parra Fernández
Dpto. Tecnología Electrónica
Universidad de Sevilla
Instituto Microlectrónica de Sevilla
IMSE-CNM CSIC/US
Sevilla, España
parra@imse-cnm.csic.es

Manuel Valencia Barrero
Dpto. Tecnología Electrónica
Universidad de Sevilla
Instituto Microlectrónica de Sevilla
IMSE-CNM CSIC/US
Sevilla, España
manolov@imse-cnm.csic.es

***Abstract*— El aprendizaje de diseño digital a nivel RT mejora con trabajos prácticos, desarrollables en laboratorio. Estos trabajos, si se eligen convenientemente, pueden resultar altamente motivadores. Mediante FPGA y placas de desarrollo se dispone de una herramienta muy adecuada para la realización de diseños de variada complejidad. En esta comunicación se presenta una experiencia desarrollada en la asignatura Diseño Digital Avanzado (4º curso de Grado) consistente en la programación de un anillo de 16 leds RGB que usa el protocolo WS2812B. Estos diseños van aumentando de forma gradual de complejidad y permiten comprobar de forma visual el funcionamiento del sistema desarrollado.**

Keywords*— *Aprendizaje basado en proyectos, Diseño digital, LED RGB, FPGA.

I. Introducción

Las asignaturas de diseño digital en últimos cursos de Grado en titulaciones electrónicas permiten utilizar lenguajes de descripción de hardware y dispositivos FPGA como plataforma para probar de forma experimental los circuitos diseñados. En esta comunicación se trata de la asignatura Diseño Digital Avanzado del cuarto curso del Grado de Ingeniería Electrónica Industrial, impartida en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Sevilla, donde se imparten los conceptos más importantes del diseño digital [1]. Se enseña cómo realizar la descripción de circuitos digitales usando el lenguaje de descripción de hardware VHDL y la forma de implementarlos sobre dispositivos FPGA (en nuestro caso de Xilinx).

Esta idea tiene muchas ventajas. Una de ellas es la utilización de un único entorno de CAD para el diseño, la verificación y la programación de los dispositivos. Además, se dispone de placas de desarrollo, que incluyen junto con la FPGA elementos de visualización e interfaz que permiten introducir valores a las entradas y ver resultados en las salidas. Este software es ofrecido de forma gratuita para uso docente por los fabricantes de FPGA. Por todo esto la enseñanza de diseño digital mediante lenguajes de descripción de hardware, (por ejemplo VHDL) y FPGA es una alternativa con un coste aceptable y, sobre todo, muy práctica que se hace muy interesante para los alumnos.

El alumno dispone de acceso a laboratorios de electrónica digital dotados de suficientes placas de desarrollo como las Nexys4-DDR de Digilent [2].

En este trabajo se presenta una experiencia docente en la que se propone utilizar un anillo de 16 LED WS2812B [3] en distintas configuraciones cada una de las cuales es más elaborada. De esta forma, cada variante presenta un aumento de complejidad respecto a la precedente. Asimismo también se hace uso de elementos externos de la placa Nexys4-DDR como pulsadores, conmutadores y puertos Pmod. Los circuitos deben ser sintetizables.

La asignatura se plantea de forma muy práctica. Se desarrolla en sesiones de dos horas en las que se realiza una presentación teórica y un laboratorio en el que aplican lo visto en la teoría. Los alumnos van realizando laboratorios en los que van haciendo el diseño de pequeños circuitos. Conforme avanza la asignatura estos laboratorios van subiendo un poco de complejidad y se va reduciendo el tiempo destinado a la teoría. Pero en el tiempo destinado a los laboratorios (un máximo de dos horas que es lo que dura cada sesión) no es posible realizar diseños que tengan una mínima complejidad.

Una solución para este problema es la realización de un diseño en varias sesiones. Pero para que esta solución sea interesante debe tener varias características: por un lado, cada una de las partes debe ser autocontenida: debe tener un objetivo de diseño que se pueda conseguir en una sesión de laboratorio. También debe diseñarse de modo que se consiga una construcción paulatina de la funcionalidad a realizar.

En este caso se propone trabajar sobre un mismo dispositivo pero realizando distintos diseños que poco a poco van aumentando de complejidad.

Respecto a la actividad en los laboratorios, esta es individual. Los alumnos poseen conocimientos básicos del entorno de diseño Xilinx ISE Webpack y saben trabajar con

cartas ASM como herramienta de descripción de sistemas digitales.

La estructura de esta comunicación es como sigue: en el segundo apartado se explica la metodología de trabajo planteada. En el apartado III se presentan las configuraciones propuestas y los resultados. En el IV se resumen las conclusiones.

II. Metodología de Trabajo

La metodología que se propone consiste en realizar varios diseños que utilizan un anillo de 16 LED WS2812B de modo que cada uno aumenta en complejidad basándose en el diseño anterior.

Los diseños se realizan mediante lenguaje de descripción de hardware VHDL utilizando el entorno de diseño de Xilinx y son verificados mediante simulación funcional para comprobar la correcta generación de la salida. Posteriormente, se programa la placa Nexys4-DDR a la que se conecta el anillo de LED a través del puerto Pmod y se comprueba de forma experimental el funcionamiento correcto del diseño.

El primer diseño consiste en el encendido y apagado de un único LED del anillo con un color determinado. Este diseño sirve como base para los siguientes.

Fig. 1. Forma de introducir ceros y unos.

La segunda propuesta de diseño consiste en el encendido simultáneo de los 16 LED del anillo con diferentes colores.

En el tercer diseño se plantean tres objetivos. En primer lugar se propone encender todos los LED con un color básico (azul, rojo o verde puros) y a continuación ir disminuyendo su intensidad. El segundo objetivo consiste en ir incrementando gradualmente la intensidad de un segundo color a la vez que se disminuye la del primero. Por último, en la tercera variante se propone modificar el diseño para mostrar alguna forma más compleja de encendido donde participen los 3 colores.

Finalmente el cuarto diseño, consiste en el encendido de un único LED que se debe desplazar por el anillo.

El control del encendido y de los colores que muestran los LED RGB del anillo, se realiza mediante un protocolo serie. Cada LED tiene, además de las señales de alimentación y tierra, una entrada de datos y una salida de datos. La programación del color de cada LED se realiza con 24 bits, 8 bits para programar la intensidad del color verde, 8 bits para el color rojo y 8 bits para el color azul ("Fig. 1"). Cada color se programa empezando siempre por el bit más significativo.

Una cadena de 24 datos programa un LED. Los datos recibidos son transmitidos a su salida de datos sin modificación. De esta forma se pueden programar un número ilimitado de LED conectados en serie. Cuando la entrada está a cero un tiempo mayor de 50 µs se considera terminada la programación ("Fig 2").

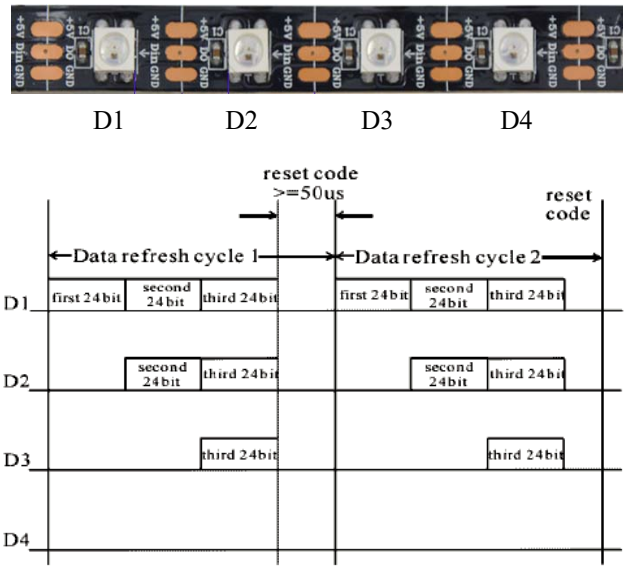


Fig. 2. Programación de los diodos LED

La transmisión de los ceros y los unos sigue una codificación en la que se definen por el tiempo que están en alto y en bajo la señal conectada a la entrada serie. Se sigue un esquema como el que se muestra en la "Fig. 3". Un cero se programa fijando la entrada a '1' durante un tiempo T0H = 400 ns y a '0' durante T0L = 850 ns. Para programar un uno ha de fijarse la entrada a '1' durante T1H = 800 ns y a '0' durante T1L = 450 ns.

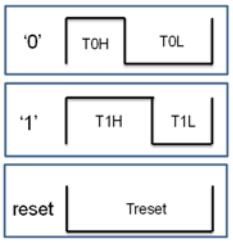


Tabla de tiempos	
T0H	400 ns
T0L	850 ns
T1H	800 ns
T1L	450 ns
Treset	> 50 us

Fig. 3. Programación de '0' y '1' en el código de color

A continuación, se detallan los cuatro diseños propuestos.

III. Diseños Propuestos

Las prácticas propuestas a los alumnos se construyen a partir de una primera que es un diseño simple y que sirve como base para construir las siguientes por fases.

A. Práctica 1: Encendido de un único LED

El objetivo de este laboratorio es encender y apagar un único LED del anillo. Para ello, se elegirá un color y se construirá una máquina de estados (descrita mediante una carta ASM) que gobernará el funcionamiento. Para la temporización de la salida se proporciona a los alumnos la documentación del anillo de LED WS2812 donde se

encuentra la información que hemos presentado en el apartado anterior.

El alumno ha de crear un proyecto donde defina un módulo VHDL que tendrá como entradas una señal de reloj (*clk*), una señal de puesta a cero asíncrona y activa en alta *(reset*), una señal de inicio de la configuración de los leds (*init*) y una señal (*sel*) que indique si se va a encender el led (*sel* = '1') o a apagar (*sel* = '0'). Asimismo tendrá como salida una señal *dato_rgb*. Todas las señales son de un solo bit.

Además de las especificaciones anteriores se proporcionan sugerencias de cómo hacer el diseño, utilizando un esquema basado en una carta ASM. Por ejemplo, declarar una constante de 24 bits para definir el color elegido (*color*), y otra a 0 para apagar el LED (*apaga)* y a una variable llamada *color_act* en la que almacenar el valor con el que encender/apagar el led.

También se sugiere declarar cuatro constantes tipo integer: *t0h, t0l, t1h* y *t1l*, que corresponden al número de ciclos de reloj necesarios para contar el tiempo. Estos valores se almacenarán en un contador *cont_v* que se irá decrementando. Un segundo contador (*cont_bits*) es necesario para contar los 24 bits que hay que suministrar al LED.

En la "Fig. 4" se muestra la carta ASM que describe el funcionamiento. Consta de 5 estados. En el estado S0 se espera a que la entrada *init* se ponga a '1'. A continuación se inicializa cont_bit a 23. También se inicializa la variable *color_act* con el color a mostrar en función de la entrada *sel*.

En S1 se establece a '1' la salida *dato_rgb*. El número de ciclos en que permanece a 1 dependerá de si el valor del led es un '0' o un '1' y esto se establece en el *cont_v*.

En S2, se irá decrementando en *cont_v* mientras se mantiene la salida activa. Tras esto, se pone la salida *dato_rgb* a '0' y se inicializa de nuevo *cont_v*.

En S3 se decrementa de nuevo *cont_v* y se comprueba si hay que seguir con el resto de bits o se ha llegado al final. Si no se han puesto los 24 bits, se decrementa el contador de bits, se desplaza hacia la izquierda el registro que almacena los bits RGB (*color_act*) y se vuelve al estado S1.

Por último, en SF se mantiene la salida a 0 y se espera a que *init* se ponga a '0' antes de volver al estado inicial.

Una vez que el diseño de la carta ASM se traslada al código VHDL, se simula y se verifica.

Para implementar el diseño en la placa Nexys4-DDR se añade al proyecto el fichero de configuración de pines, conectando la entrada de reloj *clk* a la señal de reloj de la placa, el *reset* al botón central (btnc) y la entrada *init* al botón superior (btnu). La entrada *sel* se asocial al switch cero (sw0) y la salida *dato_rgb* a pin 4 del pmod JC (jc<4>).

En la "Fig. 5" se muestra una foto con el LED encendido como resultado de la práctica.

B. Práctica 2: Encendido de los 16 leds del anillo RGB en colores diferentes.

El objetivo de este laboratorio es encender los 16 LED del anillo con colores diferentes. Los colores a mostrar se almacenarán en una memoria ROM. Se partirá del diseño realizado en el laboratorio anterior.

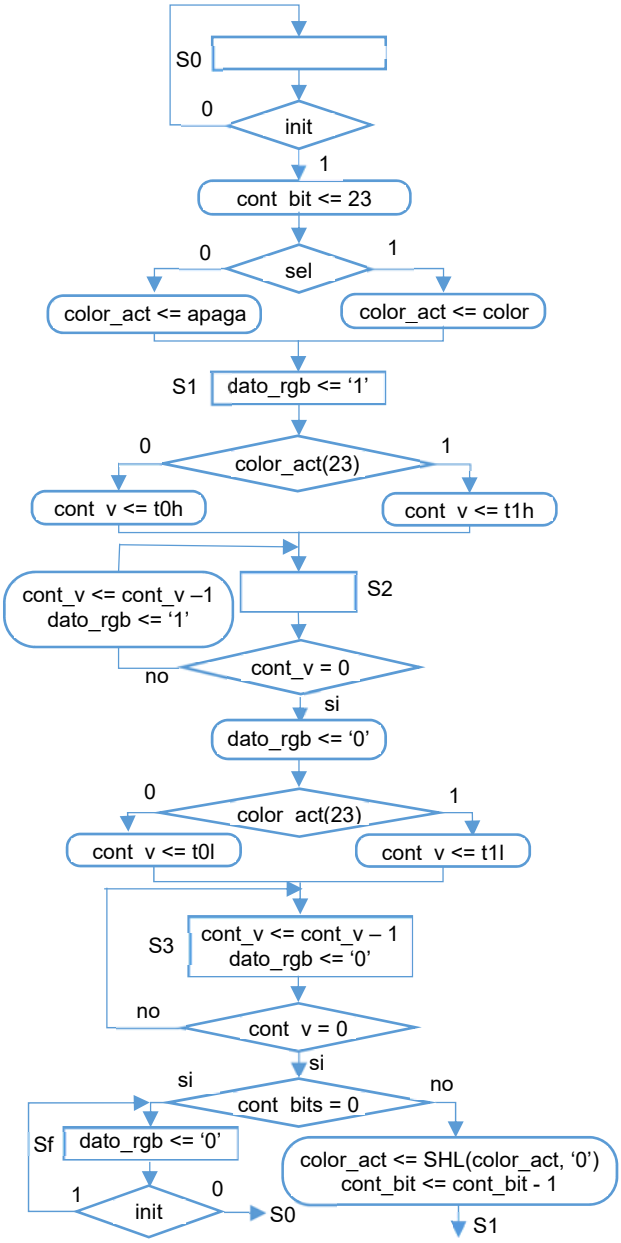


Fig. 4 Carta ASM de la práctica 1

Fig. 5. Foto con el resultado de la Práctica 1

El alumno debe crear un nuevo proyecto. El módulo a crear tendrá las mismas entradas y salidas que el realizado en la práctica anterior.

Las modificaciones a realizar son las siguientes:

Se creará una constante que será un array de 16 filas de 12 bits. Cada fila contendrá el color que se va a visualizar en el correspondiente LED del anillo. En la fila 0 se pondrá el color que se quiera encender en el LED 0, en la fila 1 el color del LED 1 y así sucesivamente. Se define cada fila con 12 bits porque sólo contiene los cuatro bits menos significativos de cada color dado que los cuatro bits más significativos se van a fijar a cero.

Se añade una nueva señal (*cont_led*) que almacena el número del LED que se está encendiendo en cada momento. Se eliminará la constante "*color*" que contenía el único color a mostrar en la práctica anterior aunque se mantiene la constante "*apaga*" que sí se va a utilizar.

En la carta ASM anterior hay que hacer algunas modificaciones. Cuando se active la señal *init*, se debe poner la nueva señal *cont_led* a cero. Como se ha dicho esta señal indica el LED que se está encendiendo (toma los valores de 0 a 15). Si la entrada *sel* = '0' se cargará en la señal "*color_act*" el valor de la constante "*apaga*", pero si *sel* = '1' se cargará la fila cero de la memoria ROM. Hay que tener en cuenta que hay que cargar en "*color_act*" los 24 bits del color sabiendo que los 4 bits más significativos son siempre cero y que la fila de la memoria ROM sólo contiene los 4 bits menos significativos de cada color.

Los estados S1 y S2 no necesitan cambios. En el estado S3 hay que introducir una nueva acción condicional. Si se ha terminado de escribir el bit actual (*cont_v* = 0) y se ha pasado por todos los bits (*cont_bits* = 0) del color, a continuación se incrementa *cont_led* y se repite el procedimiento hasta que *cont_led*=15 lo que indica que se ha leído completamente la ROM y, por tanto, se han encendido todos los LED del anillo. Finalmente, se alcanza el estado Sf.

Una vez que el diseño de la carta ASM se traslada al código VHDL, se simula y se verifica.

Para implementar el diseño en la placa Nexys4-DDR se añade al proyecto el fichero de configuración de pines tal y como se hizo en la práctica anterior dado que las entradas y salidas son las mismas.

En la "Fig. 6" se muestra una foto con el anillo completo encendido en colores diferentes para cada LED que es el objetivo de esta práctica.

Fig. 6. Foto con el resultado de la Práctica 2

C. Práctica 3: Encendido y degradación del color en los 16 leds del anillo RGB.

El objetivo de este laboratorio es encender todos los LED del anillo con un color y que este vaya modificándose a lo largo del tiempo.

Se proponen tres versiones para la modificación del color original. En la primera, se partirá de un color básico, por ejemplo rojo, y se irá degradando hasta su apagado total. En la segunda, a la vez que se degrada el color elegido se va incorporando y aumentando en intensidad un segundo color, y en la tercera se da libertad al alumno para que proponga una gradación usando una combinación de los tres colores.

El alumno debe crear un nuevo proyecto partiendo del diseño realizado en el laboratorio anterior (lab_rgb2) y al final de la práctica, tras la simulación, se probará el funcionamiento del diseño experimentalmente. El módulo a crear tendrá las mismas entradas y salidas que el realizado en la práctica anterior.

Las modificaciones a realizar son las siguientes:

Para la primera versión, se modifica el diseño de la práctica 2 para que todos los LED se carguen con el mismo color. Se escogerá un color básico (rojo, verde o azul).

Se creará una nueva señal llamada *color_inicial* que almacenará el color elegido y será el que se asigne a la variable *color_actual* cada vez que haya que empezar a programar un nuevo led.

Dado que la placa trabaja a una frecuencia de 100MHz para que la degradación sea apreciable para la visión humana es necesario ralentizar el reloj con que trabaja la carta ASM para lo que se debe introducir en el código un *prescaler*.

Cuando se terminan de escribir los 16 LED con el color elegido, hay que a pasar a la fase de degradado. Para ello se decrementa en una unidad el valor del color correspondiente a *color_inicial*. Por ejemplo, si el color vale hex0F0000 debe pasar a valer hex0E0000. Así se continuará hasta llegar al total apagado del anillo. Durante este proceso las señales *cont_bit* y *cont_led* deben ir actualizándose.

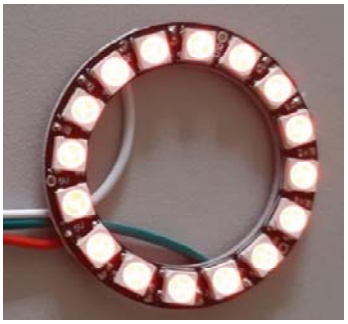
En la versión 2, a la vez que se degrada el color básico inicial se incorpora otro color básico por lo que, en cada iteración, habrá que decrementar el valor de uno e incrementar el del otro. Por ejemplo, si inicialmente el color vale hex0F0000 debe pasar a valer hex0E0100, después hex0D0200, hex0C0300 y así sucesivamente.

En la versión 3, el alumno hará otra modificación, en este caso de libre elección, para que los colores que se muestren incorporen también cambios en el tercer color básico.

Para cada versión, una vez que el diseño de la carta ASM se traslada al código VHDL, se simula y se verifica.

Para implementar los diseños en la placa Nexys4-DDR se añade al proyecto el fichero de configuración de pines tal y como se hizo en las prácticas anteriores dado que las entradas y salidas vuelven a ser las mismas.

En la "Fig. 7" se muestra una foto de las situaciones inicial y final de la versión 2 de esta práctica. En (a) se muestra la situación inicial en que se parte del color básico rojo y en (b) se observa el resultado final en que se ha degradado totalmente el color rojo y ha sido sustituido por el color básico azul.



(a)

(b)

Fig. 7. Fotos con los resultados de la Práctica 3

D. Práctica 4: Rotación de un color en los 16 leds del anillo RGB

El objetivo de este laboratorio es rotar un color por el anillo de LED. Se proponen dos versiones, la primera consiste en encender un solo LED del anillo con un color y rotarlo de LED en LED y en la segunda serán dos los LED que se enciendan y roten en sentidos opuestos. Se partirá de los diseños realizados en las dos últimas prácticas.

El alumno debe crear un nuevo proyecto en el que incorporará las siguientes modificaciones:

Se añade una nueva señal (*cont_iter*) que almacena el número del LED que se tiene que encender. Se trabajará sólo con dos valores, uno el del color que va rotando y otro que servirá para apagar el led.

En la descripción de la carta ASM hay que añadir un nuevo estado (Sd) para tomar decisiones tras encender un LED. En este caso se modificaría el estado s3 de forma que si no es el último led, se incrementa *cont_led*, se pone *cont_bit* a 23 y se va al estado Sd. Si es el último led se incrementa *cont_iter* y se va al estado Sf.

En el estado Sd se comprueba si *cont_iter* = *cont_led*. En caso que así sea se carga en *color_actual* el color a visualizar. Si no es así, *color_actual* se carga con ceros. Se incrementa *cont_led* y se va a S1.

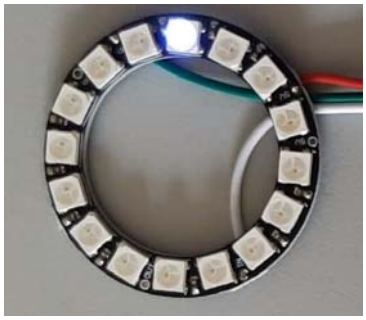
En el estado Sf, se permanece el tiempo necesario para que el encendido dure suficiente tiempo para que sea apreciable para la vista.

En la versión 2, se modifica el diseño para que sean dos LED los que se enciendan en distinto color y vayan circulando por el anillo cada uno en un sentido. Para ello es necesario crear una nueva variable *cont_iter2*. La variable *cont_iter* se incrementa, mientras que *cont_iter2* se decrementa. Cuando los LED que van rotando lleguen a la misma posición del anillo (*cont_iter* = *cont_iter2*) el color debe ser la OR de los dos colores implicados.

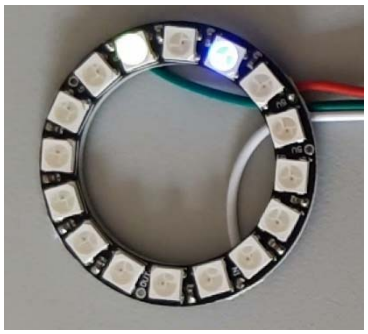
Para cada versión, una vez que el diseño de la carta ASM se traslada al código VHDL, se simula y se verifica.

Para implementar los diseños en la placa Nexys4-DDR se añade al proyecto el fichero de configuración de pines tal y como se hizo en las prácticas anteriores dado que las entradas y salidas vuelven a ser las mismas.

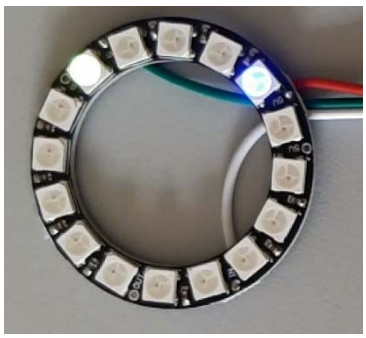
En la “Fig. 8” se muestra una foto (a) del resultado de la versión 1 de la práctica 4, donde existe un único diodo encendido mientras que en el resto de las fotos (b,c y “Fig. 9”)



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. Fotos con los resultados de la Práctica 4

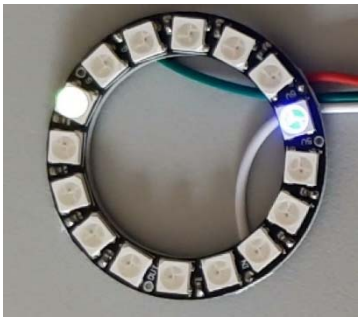


Fig. 9. Foto resultado Práctica 4

se visualiza el resultado de la versión 2, donde dos diodos encendidos van recorriendo el anillo en sentidos opuestos.

IV. Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto una metodología orientada al aprendizaje de diseño digital a nivel RT. Mediante FPGA y placas de desarrollo se dispone de una herramienta muy adecuada para la realización de diseños de variada complejidad.

Se han presentado cuatro prácticas en las que se ha procurado ofrecer una propuesta atractiva para los alumnos lo que supone una motivación importante. En concreto, cada alumno ha partido de unas especificaciones que, a partir de la primera práctica, han permitido ir construyendo las siguientes aumentando en cada una el nivel de complejidad progresivamente.

Uno de los problemas de las prácticas que se desarrollan en varias sesiones es que no todos los alumnos van al mismo ritmo. Algunos son capaces de terminarlas en el tiempo correspondiente a una sesión de laboratorio pero otros no. En ese caso, algunos alumnos tienen que seguir trabajando para terminar el objetivo anterior antes de enfrentarse al siguiente.

Esto tiene difícil solución. En general los alumnos, aunque con retraso, van terminando los laboratorios.

Finalmente, se puede concluir que se ha alcanzado un buen nivel en los trabajos y un alto grado de satisfacción tanto entre los alumnos como en el profesorado.

Reconocimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital, a través del proyecto USECHIP TSI-069100-2023-1, de la convocatoria de Cátedras PERTE-Chip, cofinanciada con fondos europeos del Mecanismo de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

Referencias

[1] Puede consultarse el proyecto docente en el enlace: https://www.us.es/estudiar/que-estudiar/oferta-de-grados/grado-en-ingenieria-electronica-industrial/2010034 (accedido en marzo 2024).

[2] Pueden consultarse las especificaciones de la placa de desarrollo Nexys4 en: https://reference.digilentinc.com/reference/programmable-logic/nexys-4-ddr/reference-manual

[3] Datasheet del anillo de LED: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/WS2812B.pdf

Empleo de arquitecturas abiertas (RISC-V) como plataforma demostradora en la docencia de electrónica digital

José-Miguel Galeas-Merchán, José-Borja Castillo-Sánchez, Juan-Antonio Rodríguez-Fernández, Martín González-García
Department of Electronic Technology, Telecommunications Research Institute (TELMA). University of Malaga
{jgaleas,jocasa,jarodriguez,martin}@uma.es

***Abstract*—En este trabajo se presenta la conveniencia de adoptar herramientas y arquitecturas abiertas (open source) en la formación relativa a la electrónica digital, a lo largo de todo el recorrido formativo, partiendo de las estructuras más básicas (circuitos combinacionales y secuenciales) hasta llegar al diseño de sistemas complejos, como un microprocesador/microcontrolador, ya sea mediante la descripción de su arquitectura basada en bloques, o mediante el uso de lenguajes de descripción hardware (HDL). En esta línea, se demuestra la posibilidad de alcanzar un prototipo viable de procesador RISC-V sencillo completamente compatible con la ejecución de código compilado mediante un toolkit estándar para la ISA (*Instruction Set Architecture*) RISC-V.**

***Index Terms*—*Open Source*, RISC-V, *schematic*, HDL, FPGA.**

I. Introducción

La enseñanza de la electrónica digital requiere la descripción e ilustración de conceptos teóricos que facilitan el entendimiento del desarrollo de las tecnologías propias de esta disciplina. Para facilitar dicho entendimiento, estos conceptos teóricos son demostrados en muchos casos con dispositivos comerciales que resuelven problemas más o menos complejos del ámbito de la electrónica digital. En este sentido es habitual describir características propias de dispositivos y plataformas comerciales para que el estudiantado acceda a dichas tecnologías. Sin embargo, por razones obvias de protección intelectual e industrial, en la mayoría de los casos es difícil, si no imposible, conocer los detalles particulares de la implementación de dichos dispositivos, por lo que el aprendizaje se limita al uso y no a la comprensión de cómo se diseñan e implementan dichas tecnologías. En este trabajo se ilustra cómo se puede adoptar una arquitectura *open source* para habilitar una docencia más completa que permita entrar en detalle, no sólo en el cómo se usan, sino también en el cómo se diseñan estas arquitecturas. Concretamente se propone la implementación de un procesador basado en el conjunto de instrucciones de uso libre RISC-V [1].

En el ámbito de las titulaciones de ingeniería especializadas en la docencia de la electrónica es habitual seguir un camino *bottom-up*, comenzando en los primeros cursos con los fundamentos de la electrónica digital, presentando los ladrillos básicos (puertas lógicas) con los que se irán construyendo estructuras cada vez más complejas a medida que se avanza hacia la obtención del título de ingeniería. La idea de este trabajo es que desde los primeros cursos ya se vaya introduciendo la idea de que los sistemas complejos no son más que agrupaciones masivas de elementos sencillos, que, en conjunto, son capaces de realizar tareas complejas en espacios de tiempo acotados. Esta forma de aprendizaje por bloques promueve el empleo de metodologías similares al aprendizaje basado en proyectos (*Project Based Learning*), metodologías que han demostrado favorecer tanto la adquisición de conocimientos como el interés del alumno hacia los contenidos [2] [3] [4].

La idea que plantea este proyecto, es decir, el uso de plataformas reconfigurables para modelar arquitecturas empotradas como forma de aprendizaje en la electrónica digital, ya ha sido estudiada previamente en la literatura, con éxito reconocido. Ejemplos de ello pueden encontrarse en [5] y [6]. Tanto [4] como [7], pueden servir como referencia para la motivación de esta contribución pues, haciendo uso de lenguajes de descripción hardware, simulan [7] e implementan [4] arquictureas de procesamiento de tipo MIPS como metodología de aprendizaje

Este trabajo se estructura de la siguiente forma: en primer lugar, se describen el diseño de microcontrolador propuesto y las herramientas utilizadas. Seguidamente, se explica cómo se puede usar este prototipo como elemento conductor a lo largo de las materias en un grado típico de ingeniería electrónica. Finalmente, se presenta un prototipo de sistema completo que puede ser usado de forma transversal en la comprensión y asentamiento de dichas materias.

II. La arquitectura RISC-V como hilo conductor

Los procesadores son unas estructuras digitales lo suficientemente complejas como para ser útiles para ilustrar todo el camino de aprendizaje en una titulación de ingeniería electrónica. Su complejidad no es intrínseca, sino que surge como consecuencia de la conexión de una serie de componentes más sencillos, permitiendo que su arquitectura pueda ser construida parcialmente antes incluso de llegar a comprender su globalidad.

De este modo, antes de abordar el diseño de un procesador, es importante conocer conceptos más generales relacionados con el diseño de elementos más simples, como operadores aritméticos y lógicos (ALUs), registros, memorias, unidades de control, etcétera. Será durante las primeras materias del

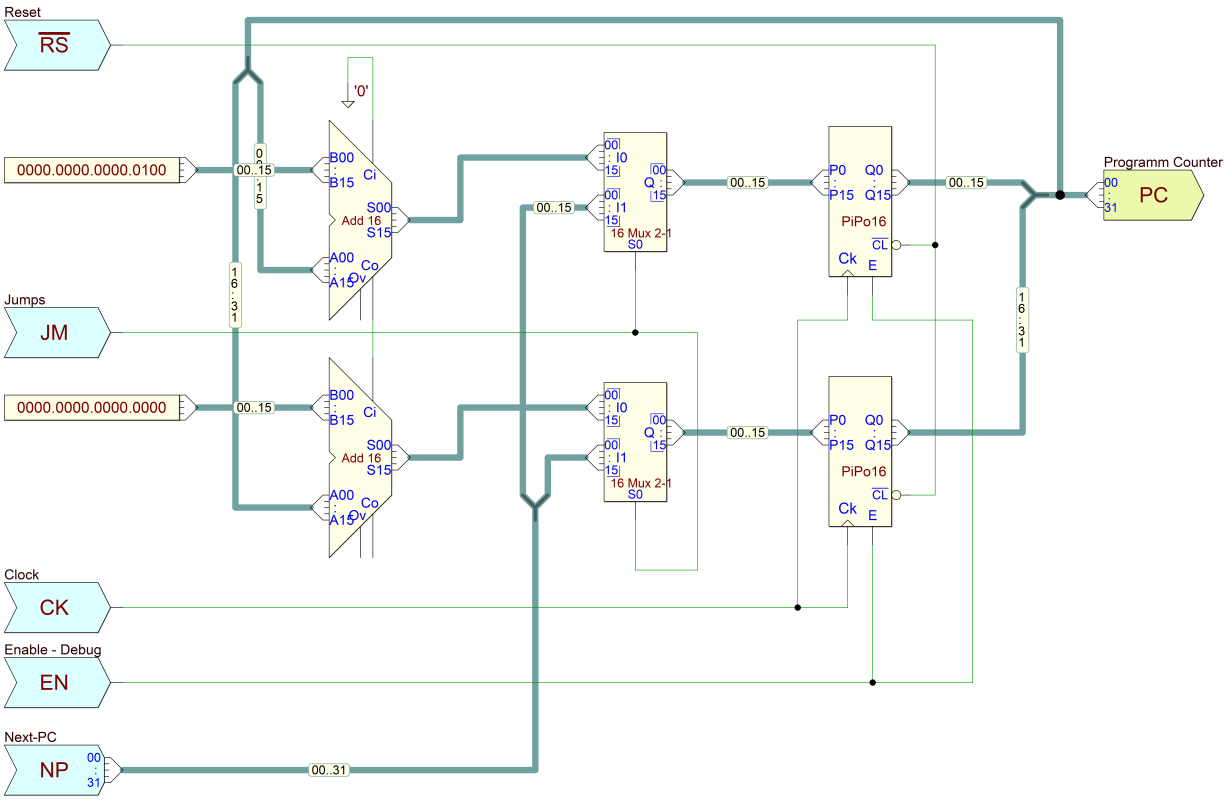


Fig. 1. Contador de programa implementado en Deeds.

grado cuando se presentarán estas estructuras. Inicialmente se presentará el diseño lógico basado en puertas, lo que permite comprender el carácter físico de la electrónica digital. Posteriormente se describirán los bloques funcionales más comunes que resuelven tanto las tareas combinacionales como las secuenciales más habituales. Estos bloques funcionales serán los ladrillos necesarios para construir sistemas digitales más complejos. Este nivel de diseño se puede abordar de dos formas diferentes y complementarias: mediante un diseño jerárquico usando primitivas más básicas y mediante la descripción de las conexiones de dichas primitivas mediante el esquema del circuito que lo implementa, o mediante el uso de lenguajes de descripción hardware. El uso de esquemas ayuda a comprender el carácter modular de la electrónica digital y los requisitos temporales implicados en el desarrollo de sistemas más complejos. Por otro lado, los lenguajes de descripción de hardware permiten describir diseños complejos de forma muy eficiente y compacta, aunque pueden alejar al diseñador de la perspectiva más física del diseño. Para abordar el diseño jerárquico basado en esquemas se propone usar la herramienta Deeds, desarrollada por un equipo docente de la universidad de Génova, dirigido por el profesor Giuliano Donzellini [8]. Esta herramienta permite describir circuitos digitales mediante bloques funcionales, incluye un simulador interactivo con el que observar dinámicamente el comportamiento de dichos circuitos, y un simulador temporal (con modelos de retardos ficticios, pero usables) para observar el comportamiento de dichos circuitos a lo largo del tiempo. Esta herramienta contiene modelos de los bloques funcionales más comunes en distintos "sabores" (diferentes tamaños de datos, versiones con interfaces en bus o con los bits individuales) y permite el diseño de bloques jerárquicos (sólo un nivel) así como la inclusión de elementos externos procedentes de extensiones propias (incluidas al instalar Deeds) para añadir máquinas de estados, incluso un modelo reducido de microprocesador completamente funcional con una ISA propia. En la figura 1 se muestra parte del esquema del módulo Contador de Programa del RISC-V propuesto.

Se pueden observar registros (2xPiPo16) para guardar el puntero a la dirección de memoria de programa que se ejecuta en cada momento, un sumador para calcular la posición de la siguiente instrucción contigua (que será la actual + 4) y multiplexores para decidir si se trata de una ejecución lineal (en cuyo caso se carga el puntero actual + 4) o de un salto (en cuyo caso se carga un valor externo proporcionado por otro módulo que calcula la dirección destino según la instrucción decodificada).

En este esquema se evidencian conceptos relativos al diseño RTL (*Register Transfer Logic*), como la actualización síncrona de los registros y el cálculo (combinacional) del próximo contenido de dichos registros.

Paralelamente, una descripción HDL (en este caso en

VHDL) puede ilustrar una estrategia diferente, pero equivalente, para resolver el mismo problema, tal y como se muestra en el listado 1.

```
-- program counter
process(clk, reset)
begin
    if reset = '1' then
        pc <= (others => '0');
    elsif rising_edge(clk) then
        pc <= next_pc;
    end if;
end process;

-- next program counter
br_tgt_pc <= std_logic_vector(signed(pc) +
             signed(imm));
jalr_tgt_pc <= std_logic_vector(signed(src1_value) +
             signed(imm));
next_pc <= br_tgt_pc when taken_br = '1' esle
             br_tgt_pc when is_jal = '1' else
             jalr_tgt_pc when is_jalr = '1' else
             std_logic_vector(unsigned(pc) + 4);
```

Listing 1. Contador de programa modelado mediante VHDL.

Con el fin de disponer de un procesador funcional construido desde cero, se ha optado por adoptar el conjunto de instrucciones (ISA) de RISC-V por consistir en una ISA de uso público. Esto ha permitido diseñar una arquitectura compatible con dicha ISA capaz de ejecutar código compilado mediante herramientas de construcción (*toolkits*) compatibles con dicha ISA [9]. Concretamente, la ISA implementada es la más sencilla relativa a un procesador de 32 bits con datos enteros (RV32I). En cuanto a la arquitectura, se trata de una sencilla implementación monociclo, suficiente para ilustrar los conceptos básicos de arquitectura de un procesador, pero sin las complejidades inherentes a mejoras relacionadas con estructuras en *pipeline*, virtualización o sistemas complejos de memoria caché, que sí pueden encontrarse en otras implementaciones libres como [10] y [11], pero que quedan fuera del ámbito de este trabajo. La idea es que durante toda la formación el estudiantado tenga un diseño único en mente en el que poder entrenar las competencias que va adquiriendo en cada asignatura, permitiéndole disponer de un hilo conductor que le ofrece un enfoque global de la electrónica digital.

III. Materias relacionadas con la electrónica digital

Usando el caso concreto del plan de estudios del título de Grado en Ingeniería Electrónica de Telecomunicación impartido de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad de Málaga, se pretende mostrar la utilidad de la adopción de estas estrategias en la docencia. Las conclusiones extraídas son, por supuesto, extrapolables a otras titulaciones, con los ajustes pertinentes en cada caso.

El Grado en Ingeniería Electrónica de Telecomunicación consta de 240 créditos repartidos en 4 cursos. Es el resultado de la modificación de un título previo y actualmente sólo se imparte el primer curso, lo que ofrece una oportunidad muy interesante para adaptar las estrategias docentes a este nuevo modelo. De todas las materias a impartir, existe un notable conjunto de asignaturas (que suman casi 60 créditos ECTS) relacionadas directa o indirectamente con la electrónica digital, y que se pueden beneficiar del enfoque de este trabajo. El primer contacto con la Electrónica Digital aparece en el primer semestre del primer curso en la asignatura Fundamentos de Electrónica, dónde se presentan los fundamentos del Álgebra de Boole y su aplicación para resolver sencillos problemas de diseño lógico mediante el empleo de puertas, así como algunas técnicas sencillas de optimización. En este punto, la herramienta Deeds resulta de gran utilidad para mostrar el funcionamiento de los circuitos digitales simples mediante la simulación interactiva. Seguidamente, en el segundo semestre del mismo curso, en la asignatura Electrónica Digital se pasa del diseño basado en tablas de verdad a un diseño más intuitivo usando el sentido físico de las señales y la funcionalidad pretendida de los bloques funcionales más comunes, fundamentales más adelante para diseñar sistemas digitales de mayor complejidad. Así mismo, se introduce el diseño RTL con sus limitaciones y ventajas, así como las restricciones temporales implicadas en su estructura. Adicionalmente, en el contexto de esta asignatura, se introduce por primera vez el concepto de HDL. Concretamente se presentan la sintaxis y los casos de uso más simples de empleo de VHDL en la descripción de sistemas digitales.

La siguiente asignatura relacionada es Microcontroladores y Microprocesadores, impartida en el segundo semestre del segundo curso. Si bien es demasiado pronto para que se entiendan todos los aspectos relacionados con la arquitectura de estos sistemas, disponer de un modelo ya implementado con el que poder experimentar puede permitir al profesorado diseñar interesantes actividades docentes. Al tratarse de un sistema completamente funcional, podría usarse como modelo para cubrir parte de las explicaciones de la asignatura en lugar de emplear dispositivos comerciales cuya complejidad podría dificultar la adquisición de las competencias pretendidas en esta asignatura. Existen dos asignaturas más de esta temática que extienden la comprensión de los sistemas basados en microprocesadores y microcontroladores. En estas asignaturas se introducen conceptos como la arquitectura superescalar, el pipeline y la memoria caché, así como el soporte de sistemas operativos, tanto de propósito general como de tiempo real. Todos estos conceptos son susceptibles de ser testeados sobre posibles ampliaciones futuras del procesador RISC-V propuesto.

El siguiente curso (tercero), durante el primer semestre, se imparte Electrónica Digital 2. En esta asignatura se amplían las competencias adquiridas en la primera parte, profundizando en el diseño de pequeños sistemas digitales que podrían usarse como periféricos de un sistema basado en microprocesador o microcontrolador como pueden ser la UART, controladores de buses habituales como I2C, I2S o CANBUS, temporizadores, *watchdogs*, etc. También resulta importante profundizar en esta asignatura en aspectos físicos relacionados con el uso de sistemas digitales como el consumo, los retardos, la compatibilidad entre familias y los estándares en los puertos de E/S. En esta asignatura se abordará el diseño basado en esquemas de bloques funcionales, haciendo hincapié en la conectividad y

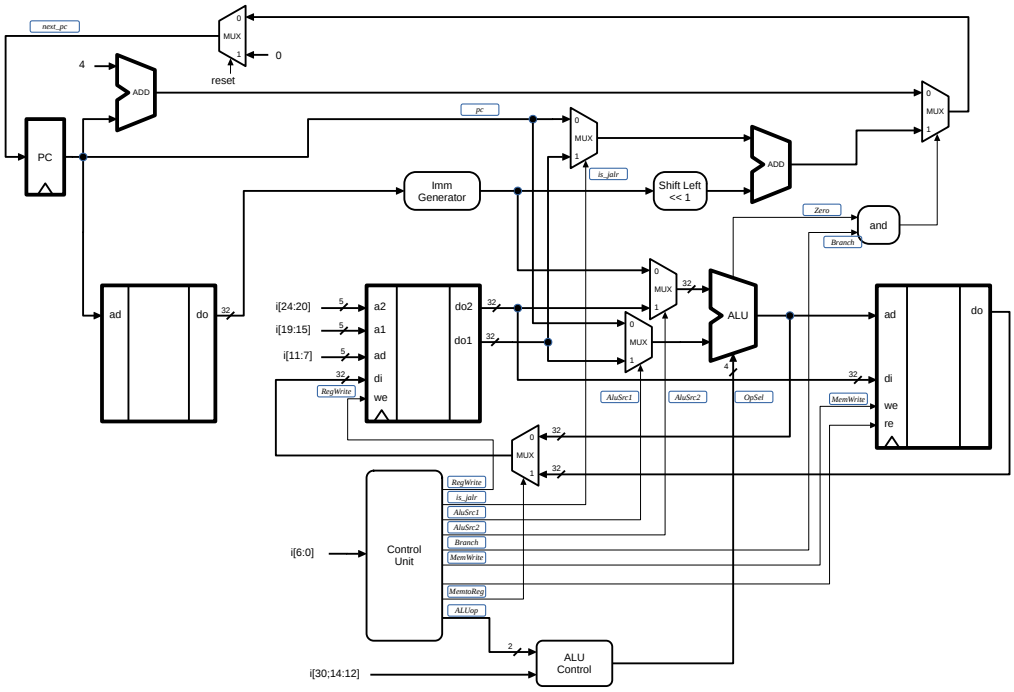


Fig. 2. Arquitectura del sistema RISC-V propuesto.

modularidad de dichos sistemas. La herramienta Deeds seguirá siendo de gran importancia en esta asignatura. Algunos de los periféricos diseñados podrían ser incorporados al RISC-V propuesto.

Simultáneamente a la asignatura de Electrónica Digital 2 se imparte Diseño Microelectrónico 1, donde se presentan los fundamentos de las tecnologías de fabricación y de diseño de circuitos integrados. Se presentan los dispositivos configurables (FPGAs) y se profundiza en los lenguajes de descripción hardware (HDLs). En el semestre siguiente, dentro de Diseño Microelectrónico 2, se presentan estructuras complejas de procesamiento incluidas en un solo chip (*System on Chip*, SoC). Nuestro diseño basado en RISC-V puede ser una oportunidad para realizar interesantes experimentos de expansión e integración de soluciones más complejas.

Finalmente, en el primer semestre del cuarto curso, se imparte la asignatura Sistemas en Chip basados en Arquitecturas Abiertas cuyo objetivo es básicamente el diseño y la implementación de microarquitecturas monociclo compatibles con el ISA RISC-V, así como el estudio de todo el microsistema necesario para la correcta fabricación, testeo y configuración de dichos sistemas.

Como se ha demostrado, existe una gran variedad de materias que se pueden beneficiar de disponer de un modelo usable de CPU basada en código abierto.

IV. Implementación del modelo del procesador RISC-V

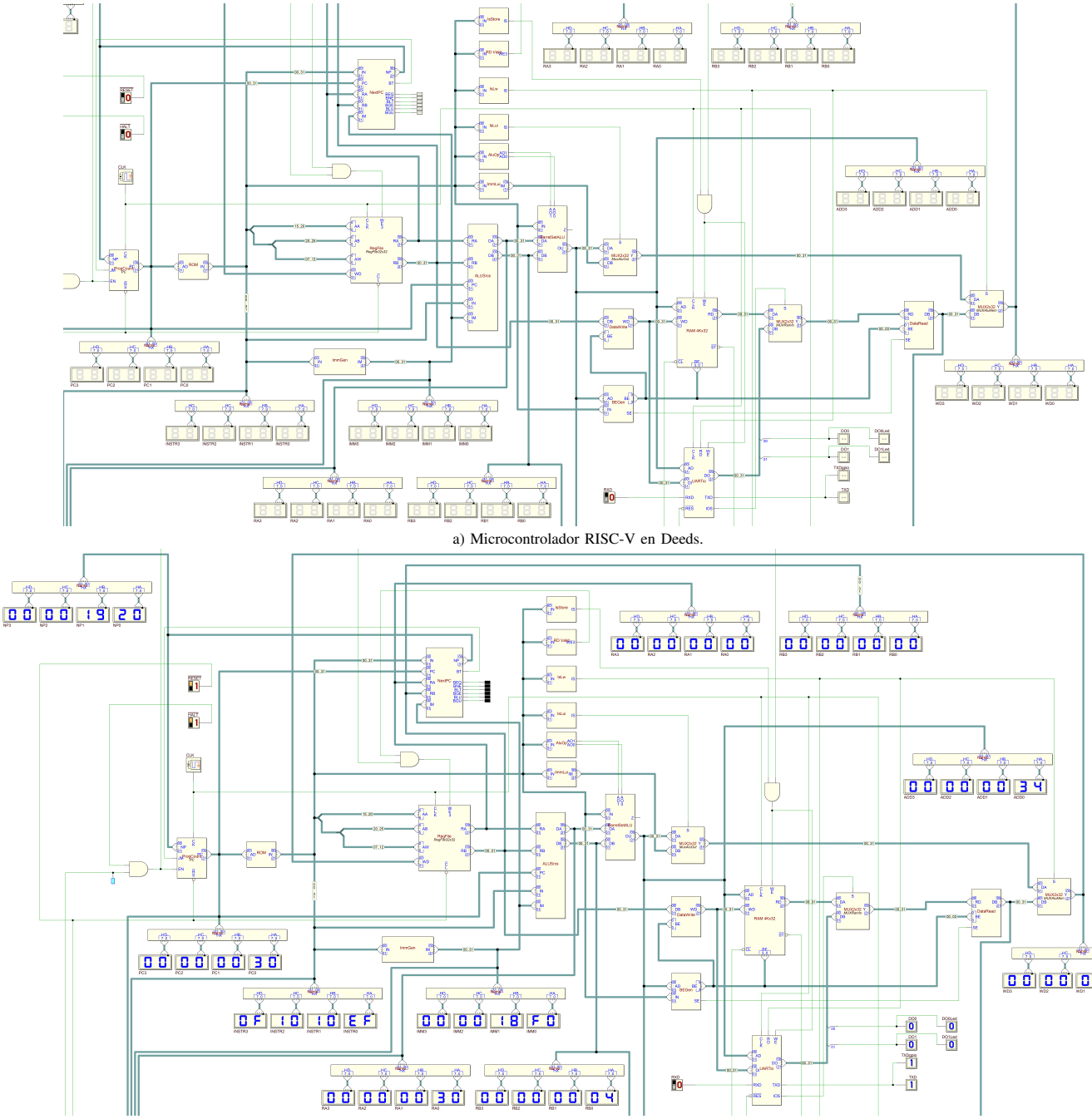
Para la implementación del procesador RISC-V propuesto se ha seguido una arquitectura básica monociclo con estructura Harvard, con buses de memoria independientes para programa y datos, como se puede apreciar en la figura 2. Dicha implementación sigue las pautas comunes de diseño de estos tipos de sistemas descritas en la bibliografía [12] [13].

Se proponen dos implementaciones diferenciadas, una basada en captura de esquemas usando bloques funcionales de bajo nivel y otra basada en lenguajes de descripción hardware, concretamente en VHDL [14]. Ambas implementaciones son idénticas en cuanto a comportamiento y, por lo tanto, intercambiables. Para la primera implementación se han desarrollado una serie de módulos jerárquicos relativos a la arquitectura propuesta. Debido a que Deeds no permite más de un nivel de jerarquía y a las limitaciones prácticas del capturador de esquemas, algunos de los módulos han sido descompuestos en submódulos para facilitar la tarea de interconectar los distintos elementos. Como se puede apreciar en la figura 3 el diseño dispone de displays para mostrar la ejecución paso a paso del procesador, permitiendo tareas de depuración hardware y de visualización interactiva del funcionamiento del mismo.

```
   20:    00006117    auipc sp,0x6
   24:    fe010113    addi sp,sp-32 # 6000 <_stack>
   28:    00005197    auipc gp,0x5
   2C:    f7118193    addi gp,gp,-143 # 4f99 <_global>
-> 30:    0f1010ef    jal ra, 1920 <welcome>
   34:    00006697    auipc a3,0x6
   38:    fcc68693    addi a3,a3,-52 #6000 <_stack>
   3C:    00004617    auipc a2,0x4
```

Listing 2. Listado de código ensamblador con la instrucción de salto

En la figura 3b) se incluye una captura de un momento de ejecución donde se puede apreciar el instante en que se está ejecutando concretamente la instrucción correspondiente al contador de programa 0x30 cuyo contenido es 0x0f1010ef,



a) Microcontrolador RISC-V en Deeds.

b) Ejecución en simulación interactiva de la instrucción *JAL*.

Fig. 3. Bloques funcionales del *core* realizados en Deeds.

según se muestra en el listado 2. Como se trata de la pseudoinstrucción "jal ra, 1920" el efecto es saltar a la posición 0x1920, que es la posición actual (0x30) más el *immediate* de la instrucción (0x000018F0) cuyo resultado es efectivamente un salto a 0x1920.

La segunda implementación está basada en una descripción estructural en VHDL de una serie de módulos equivalentes a los descritos en el esquema de Deeds. En este caso el modelo VHDL es susceptible de ser simulado mediante ModelSim como se muestra en la figura 4.

En ambos casos se dispone de la posibilidad de comprobar el funcionamiento del diseño en una placa de desarrollo basada en FPGAs. En el caso de la implementación en VHDL, se puede utilizar cualquier sistema de desarrollo de cualquier fabricante. En nuestro caso hemos optado por implementar el diseño en un sistema de desarrollo Basys3 de DIGILENT [15], que incluye la FPGA XC7A35T-ICPG236C del fabricante AMD-Xilinx usando la licencia WebPack de Vivado. La tabla I muestra el uso de recursos en esta placa de desarrollo de precio asequible cuando se implementa una instancia del

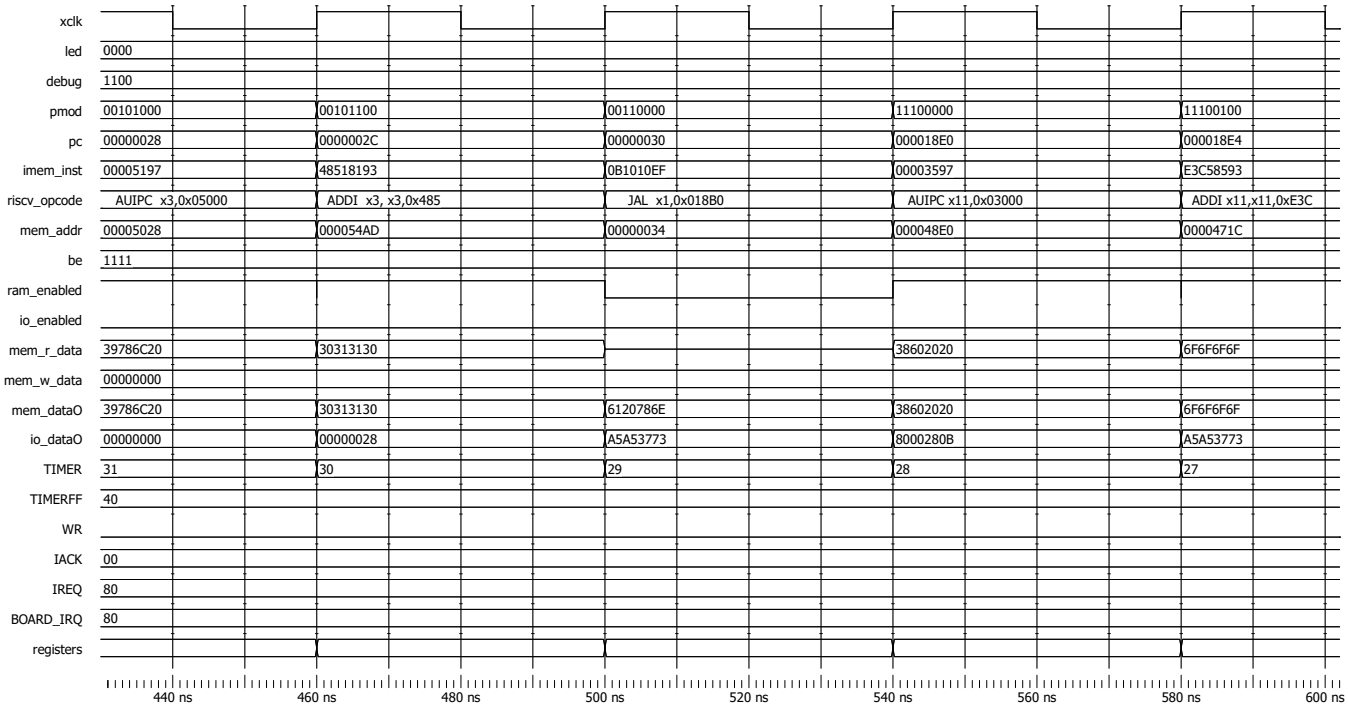


Fig. 4. Simulación RTL en Modelsim para la instrucción *JAL*.

procesador RISC-V con 4kB de datos y 16kB de programa; se puede observar que aún se dispone de recursos suficientes para ampliar algunas de sus características.

TABLE I
RESUMEN DE UTILIZACIÓN DE RECURSOS PRESENTADO EN VIVADO

Resource	Utilization	Available	Utilization %
LUT	4786	20800	23.01
LUTRAM	2608	9600	27.17
FF	391	41600	0.94
IO	38	106	35.85
BUFG	2	32	6.25
MMCM	1	5	20.00

Para la implementación en Deeds, se puede configurar el proyecto directamente para exportarlo a Quartus, definiendo los pines de la FPGA correspondiente al sistema de desarrollo elegido entre un listado disponible de placas desarrolladas en torno a FPGAs de Intel-Altera. Concretamente se ha implementado en la placa de Terasic DE10-Lite [16] que incluye una FPGA Max 10 10M50DAF484C7G. En este caso la ocupación de recursos se muestra en la tabla II.

En ambos casos se dispone de una UART con la que se puede intercambiar información en ambos sentidos mediante la implementación de las funciones básicas necesarias de la librería `stdio.h`.

Se ha implementado un método para modificar el contenido de las memorias ROM y RAM y relanzar el sistema sin necesidad de modificar el *bitstream*. Además se ha dado acceso a los displays de 7 segmentos para visualizar información

TABLE II
RESUMEN DE UTILIZACIÓN DE RECURSOS PRESENTADO EN QUARTUS

Resource	Utilization	Available	Utilization %
Logic Elements	13812	49760	28
Pins	345	360	96
Memory bits	131072	1677312	8
Multiplier 9-bit	0	288	0
PLL	0	4	0
UFM	0	1	0
ADC	0	2	0

alfanumérica. La figura 5 muestra el mensaje de bienvenida.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se ha presentado la conveniencia de utilizar una plataforma de código abierto como hilo conductor en las enseñanzas de grado con fuerte contenido en electrónica digital. Se ha demostrado que no solo es conveniente, sino posible, utilizando recursos muy limitados en coste y cuya reutilización en distintos ámbitos de la titulación garantizan su amortización. Al contrario de lo que ocurre cuando se usan soluciones comerciales, este enfoque además brinda la oportunidad de no limitarse a una plataforma concreta, sino que se puede adaptar fácilmente a otras, existentes o por venir, de forma que la disponibilidad de una plataforma adecuada que se adapta a las necesidades venideras está garantizada. La metodología propuesta es lo suficientemente abierta como para admitir ampliaciones posteriores que cubran aspectos más complejos de los sistemas digitales, pudiendo ser aplicables

Fig. 5. Mensaje de bienvenida mostrado a través de la línea UART.

en titulaciones de máster, como el Máster en Microelectrónica anunciado en el marco de la Cátedra de Microelectrónica de la Universidad de Málaga amparada por los fondos Perte-Chip [17].

Las líneas futuras previstas para este sistema incluyen la ampliación de periféricos, la inclusión de un *scan-path*, opciones de depuración, optimización mediante *pipeline*, y la inclusión de un sistema de gestión de memoria con cachés, entre otras. Adicionalmente, es una plataforma ideal sobre la que presentar conceptos relacionados con la verificación de sistemas digitales, siguiendo metodologías como UVM (*Universal Verification Methodology*).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio español de Ciencia, Innovación (MCIN/AEI/10.13039/501100011033) y Universidades y fondos NextGenerationEU/PRTR bajo los proyecto TED2021130456B-I00, TED2021-131739B-C21 y PDC2022-133597-C42.

REFERENCES

[1] RISC-V International. ISA Specifications, Volume 1, Unprivileged Specification, 2019. Last accessed: 27 March 2024.

[2] G.D. Bormida, D. Ponta, and G. Donzellini. Methodologies and tools for learning digital electronics. *IEEE Transactions on Education*, 40(4):4 pp.–, 1997.

[3] J. Macias-Guarasa, J.M. Montero, R. San-Segundo, A. Araujo, and O. Nieto-Taladriz. A project-based learning approach to design electronic systems curricula. *IEEE Transactions on Education*, 49(3):389–397, 2006.

[4] Christopher M. Kellett. A project-based learning approach to programmable logic design and computer architecture. *IEEE Transactions on Education*, 55(3):378–383, 2012.

[5] Guilherme Álvaro Esmeraldo, Eduardo Carlos Proto, Edson Barbosa Lisboa, and Edna Natividade Da Silva Barros. Learning and Design of Computational Systems: Integrating the CompSim Simulator to FPGAs. In *2022 Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (XV Technologies Applied to Electronics Teaching Conference)*, pages 1–5, 2022.

[6] Yi Zhu, Thomas Weng, and Chung-Kuan Cheng. Enhancing learning effectiveness in digital design courses through the use of programmable logic boards. *IEEE Trans. Education*, 52:151–156, 02 2009.

[7] J.O. Hamblen. A VHDL synthesis model of the MIPS processor for use in computer architecture laboratories. *IEEE Transactions on Education*, 40(4):10 pp.–, 1997.

[8] Giuliano Donzellini. Digital Electronics Deeds, 2023. Last accessed: 27 March 2024.

[9] RISCV-collab. riscv-gnu-toolchain. GNU toolchain for RISC-V, including GCC. Last accessed 27 March 2024.

[10] darklife. darkriscv. An opensouce RISC-V cpu core implemented in Verilog from scratch in one night!. Last accessed 30 March 2024.

[11] stnolting. neorv32. A tiny, customizable and extensible MCU-class 32-bit RISC-V soft-core CPU and microcontroller-like SoC written in platform-independent VHDL. Last accessed 30 March 2024.

[12] David Harris, Sarah Harris. *Digital Design and Computer Architecture, 2nd Edition*. July 24, 2012.

[13] David A. Patterson, John L. Hennessy. *Computer Organization and Design. RISC-V Edition, 2*. April 28, 2021.

[14] Pong P. Chu. *RTL Hardware Design Using VHDL: Coding for Efficiency, Portability, and Scalability*. Wiley-IEEE Press, 2006.

[15] Digilent Inc. Digilent Reference: Basys 3. Last accessed 27 March 2024.

[16] terasIC. terasIC DE10-Lite Board. Last accessed 27 March 2024.

[17] Government of Spain. PERTE chip: Microelectrónica y semiconductores. Technical report, Government of Spain, 2022.

Madrina: Una herramienta de ayuda a la realimentación tras la corrección de exámenes.

Antonio Martí-Campoy
Departament d'Informàtica de Sistemes i Computadors
Universitat Politècnica de València
amarti@disca.upv.es

Francisco Rodríguez Ballester
Departament d'Informàtica de Sistemes i Computadors
Universitat Politècnica de València
prodrig@disca.upv.es

***Abstract*—Madrina es una herramienta Web[1] diseñada con el objetivo de facilitar al profesorado la tarea de proporcionar a sus alumnos una pronta realimentación tras la realización de un examen escrito. Se trata de un aplicación que permite al profesor o profesora cargar uno o más ficheros PDF con los exámenes corregidos y escaneados. Tras un procesado asistido, el profesor puede generar un PDF por cada alumno que contiene su examen escaneado. También genera la lista de notas, y de forma automática o semi-automática se pueden subir los exámenes y las notas a la plataforma educativa de la universidad, para hacerlos llegar a los alumnos. El uso de Madrina presenta dos grandes ventajas. Por un lado, es un ejercicio de transparencia importante, pues todos los alumnos pueden acceder a la corrección de su examen sin tener que solicitarlo. Por otro lado, el proceso de revisión de exámenes se simplifica y desmasifica, reduciendo el tiempo empleado por el profesorado. Durante los cursos 2022/23 y 2023/24, varios profesores de diferentes asignaturas de la Universitat Politècnica de València (UPV) han utilizado Madrina y muestran su satisfacción con la herramienta.**

***Index Terms*—Herramienta web, campus virtual, exámenes, corrección, retroalimentación.**

I. Introducción

Cuando un profesor termina de corregir un examen escrito llega el momento de retornar a sus estudiantes la realimentación sobre la corrección, más allá de las notas numéricas. Esta realimentación suele consistir en comentarios del profesor escritos directamente sobre los exámenes del estudiantado y, cuando es de calidad, es una gran ayuda para su aprendizaje. La realimentación tiene una influencia crucial en el proceso de aprendizaje [1], y cuando un alumno revisa su examen está especialmente sensibilizado y motivado, lo que representa una gran oportunidad de aprendizaje [3] y [4].

Sin embargo, solo cuando los alumnos solicitan revisión de examen tienen acceso a estos comentarios, por lo que este potencial queda desaprovechado, al igual que gran parte del trabajo del profesor. El uso de plataformas *online* de enseñanza LMS (Learning Management System), puede ayudar a devolver a los alumnos su examen corregido, pero subir a estas plataformas cada uno de los exámenes (uno por cada alumno) se puede convertir en un trabajo pesado.

Existen varias propuestas en la bibliografía y productos comerciales que pueden ayudar a esta tarea. En [5] se imprimen etiquetas con un código QR personalizado que el estudiante pega en las hojas de su examen y que permiten, una vez escaneadas las hojas, asignarlas al alumno. En el caso de exámenes de respuesta múltiple, existen varias aplicaciones comerciales que realizan de forma automática todo el trabajo, como ZipGrade[2]. Estas herramientas suelen necesitar que el examen se imprima con marcas para codificar el identificador del alumno y para reconocer las respuestas. GradeScop[3] es la herramienta completa, pues reconoce texto manuscrito para identificar al alumno y es también capaz de corregir el examen si se le proporcionan las rubricas necesarias. Los principales inconvenientes de esta herramienta es que los exámenes se procesan fuera de los servidores de la universidad, y que tiene coste económico por alumno y año.

En [6] se describen varios métodos y herramientas para entregar a los alumnos los exámenes corregidos. De las conclusiones extraídas en esta última experiencia, surge Madrina, como una herramienta Web de ayuda al profesorado en este proceso, simplificándolo y haciendo que la interacción con el campus virtual sea más fluida. La figura 1 muestra el flujo de trabajo completo con Madrina. Los bloques con contorno azul son acciones que el profesor realiza directamente en Madrina. Los bloques con contorno rojo son acciones que el profesor debe realizar, de forma externa y previa a la acción en Madrina. Y por último, los bloques con contorno verde son acciones externas y posteriores al uso de Madrina.

La sección II describe los diferentes bloques mostrados en la figura 1 y que componen la estructura de Madrina. La sección III presenta el uso real de Madrina y detalla los tiempos necesarios para realizar las diferentes tareas, desde el escaneo de los exámenes hasta su entrega a los alumnos. El artículo finaliza en la sección IV con unas reflexiones sobre las ventajas de devolver los exámenes corregidos a los alumnos y la utilidad de Madrina para realizar esta tarea.

II. Estructura de Madrina

Madrina puede dividirse en tres grandes bloques.

- El primero dedicado a la organización y gestión de las asignaturas y sus exámenes.

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de innovación y mejora educativa PIME/22-23/C-1873 de la Universitat Politècnica de València.

[1]Disponible en madrina.somee.com

[2]https://www.zipgrade.com/

[3]https://www.gradescope.com/

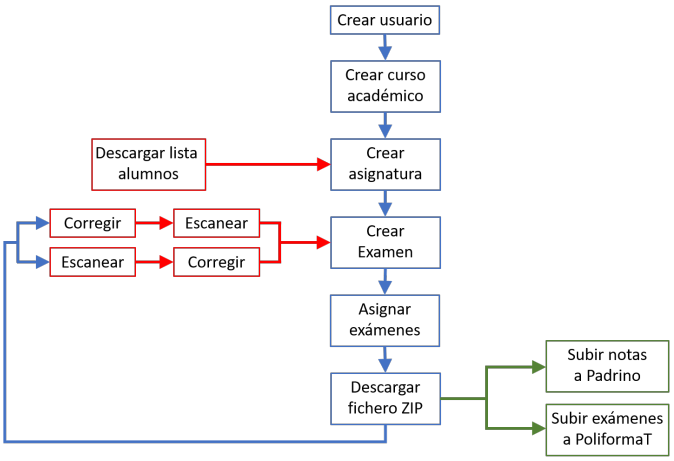


Fig. 1. Flujo de trabajo completo de Madrina. Contorno azul indica acciones a realizar en Madrina. Contorno rojo y verde indica acciones a realizar fuera de Madrina.

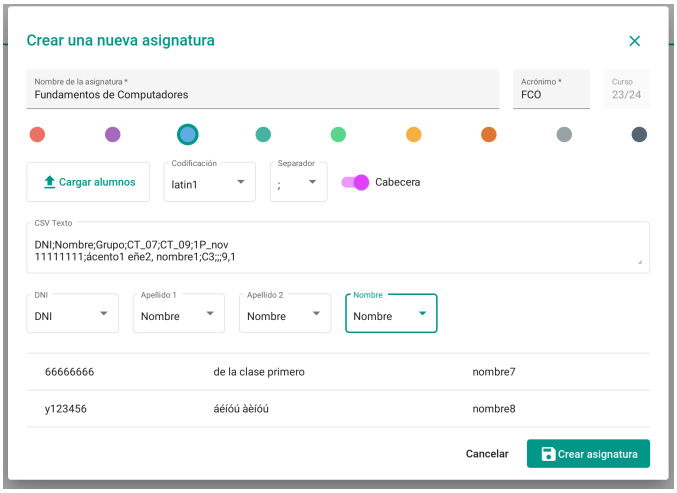


Fig. 2. Cuadro de dialogo para crear una nueva asignatura.

- El segundo corresponde con la asignación o clasificación de los exámenes. Esta asignación comprende la tarea de delimitar las páginas de un examen y asignar dichas páginas al alumno correspondiente.
- El tercer bloque corresponde a la entrega de las notas y los exámenes corregidos a los alumnos a través del LMS[4] de la universidad.

A. *Organización y gestión*

Los profesores suelen participar en diferentes asignaturas durante varios años académicos, en las que se realizan varios exámenes por curso, por lo que es importante permitir organizar de forma adecuada los exámenes, ofreciendo un acceso rápido al examen deseado.

Los exámenes se organizan en cursos académicos, asignaturas en cada curso académico, y dentro de cada asignatura, los exámenes pertenecientes a cada una de las asignaturas. El profesor puede crear un curso académico con las asignaturas y los exámenes que desee. Además, puede escoger mostrar todos los exámenes disponibles o sólo de algunas asignaturas seleccionadas.

Una vez creado el curso académico actual, se crea la asignatura. La figura 2 muestra los campos necesarios para crear una asignatura. Además del nombre, el acrónimo y un color para identificar visualmente los exámenes de dicha asignatura, es necesario subir a Madrina la lista de los alumnos, con su nombre, apellidos, e identificador (normalmente el DNI) utilizado por la universidad.

Este listado suele generarse en formato CSV desde el LMS de la universidad, y dependiendo del LMS, e incluso dentro de un mismo LMS, el formato del listado puede ser diferente, variando el orden de los campos, la codificación e incluso el separador de campos. Por ello, la carga de la lista de alumnos permite indicar la configuración del fichero y realizar previsualizaciones para garantizar la correcta importación de la información, Los autores consideran esta funcionalidad uno de los puntos fuertes de Madrina porque se adapta a cualquier formato actual o futuro.

Una vez seleccionado el fichero con los datos de los alumnos, se pueden configurar los siguientes parámetros.

- Codificación. Se puede escoger entre UTF8 y Latin1, entre otras.
- Separador de columnas. Permite elegir entre la coma y el punto y coma.
- Cabecera. Indica si el fichero tiene una fila de cabecera o no.

Cada vez que se cambia uno de los parámetros, se actualiza la vista previa, por lo que el profesor puede hacer todas las pruebas que quiera hasta ver correctamente mostrados los datos de los alumnos.

El segundo paso es indicar qué columnas del fichero contiene cada dato del alumno: identificador (DNI), primer apellido, segundo apellido, y nombre. Cada vez que se selecciona una columna, se previsualiza el resultado, por lo que el profesor puede realizar todas las pruebas necesarias hasta obtener el orden correcto de los campos.

Este carga de alumnos se realiza una sola vez por asignatura, utilizándose en todos los exámenes de la misma, aunque es posible volver a cargar la lista en cualquier momento.

B. *Creación y asignación de exámenes*

Una vez realizado el examen, este debe crearse en su correspondiente asignatura. Para ello el profesor debe indicar un nombre de examen, la fecha, y subir uno o varios ficheros PDF con los exámenes de los alumnos corregidos y escaneados. Como se muestra en la figura 1 la corrección de un examen puede hacerse directamente en papel para posteriormente escanear los exámenes corregidos o escaneando en primer lugar y posteriormente corrigiendo sobre las copias escaneadas. Además, este escaneo puede encontrarse en uno o varios ficheros pdf, que se suben simultáneamente a Madrina.

[4]El LMS de la UPV recibe el nombre de PoliformaT y es una implementación de Sakai.

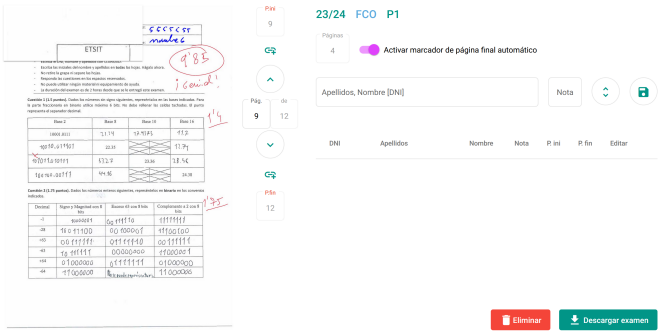


Fig. 3. Interfaz para la clasificación de exámenes.

El tiempo de subida depende del tamaño de los ficheros, determinado por el número de exámenes y las páginas de cada uno. Este tiempo no es inmediato, por lo que se muestra una barra de progreso.

Una vez subidos los exámenes, el usuario accede al examen y se le muestra una pantalla (figura 3) con tres grandes bloques:

- En la mitad izquierda de la pantalla, el visor de examen y controles de navegación.
- En el cuarto superior derecho, campos identificativos del alumno.
- En el cuarto inferior derecho, lista de alumnos a los que ya se les ha asignado las hojas del examen y la nota.

Antes de iniciar la asignación de los estudiantes a su examen, hay que realizar dos acciones.

Existen dos casuísticas en el formato de un examen. Que todos los exámenes de todos los alumnos tengan o no el mismo número de páginas En el primer caso, habitual en algunas asignaturas en las que participan los autores, el proceso de clasificación se simplifica y acelera de forma significativa. Por ello, el primer paso es activar el posicionamiento automático de última página, indicando el número de páginas del examen. Si este no es el caso, el proceso de clasificación incluye un paso más que se describe posteriormente.

La segunda acción es posicionar la lupa. En la esquina superior izquierda puede apreciarse un marco rectangular que recorta el examen. Haciendo clic en este marco puede ubicarse en el lugar deseado, y fijarlo con un segundo clic. Se puede desactivar con un nuevo clic, activar nuevamente con otro clic. Esta lupa permite hacer zoom sobre el apellido o el DNI del alumno, y permanece fija durante todo el proceso hasta que el profesor la desactive o cambie de lugar.

Una vez realizadas estas dos acciones preparatorias, comienza el proceso de asignación de exámenes. Una consideración importante es que Madrina se ha diseñado para que la tarea de clasificación o asignación se pueda realizar utilizando solo el teclado. Los interfaces web son propensos a hacer un uso intensivo del ratón, pero el tiempo necesario para desplazar la mano desde el teclado al ratón y vuelta, es tiempo perdido. Por ello, se han configurado las teclas tabulador, *intro*, y flechas del cursor, para que el profesor realice la clasificación

Fig. 4. Búsqueda del alumno al que corresponde el examen.

sin levantar las manos del teclado. El único uso del ratón es para realizar la primera activación del campo de apellido.

Al activar el campo de apellido aparece en el desplegable la lista de todos los alumnos. Al comenzar a teclear parte del apellido, nombre o DNI del alumno, la lista se reduce con las coincidencias existentes. La búsqueda es insensible a acentos, mayúsculas y se pueden teclear subcadenas de los apellidos, nombre o dni. En la figura 4 se aprecia que al teclear una *s* aparecen en la lista todos[5] los alumnos con esta subcadena en su nombre o apellidos. El profesor puede seguir tecleando hasta que el primer alumno de la lista sea el deseado, y con la tecla *intro* lo selecciona, o puede usar las teclas de cursor ↓ y ↑ para posicionarse en el alumno y seleccionarlo con la tecla *intro*.

Una vez seleccionado el alumno, con la tecla tabulador salta al campo de nota e introduce la nota, si la hubiere.

Una vez introducida la nota, se presentan dos posibilidades:

1) Si el examen tiene un número fijo de páginas, el profesor pulsa dos veces la tecla tabulador y se posiciona en el símbolo del disquete. Al pulsar *intro* el examen es asignado al alumno, se añade la lista de alumnos asignados, y el visor de exámenes se posiciona en la primera página del siguiente examen, con el cursor en el campo de apellidos para clasificar el siguiente examen.
2) Si cada examen de cada alumno tiene un número de páginas diferente, el profesor pulsa una vez la tecla tabulador y se posiciona en el círculo con dos flechas. Usando las teclas de cursor de flecha abajo ↓ (o la tecla s) avanza de página en la visualización del examen, hasta llegar a la última página del examen o bien a la primera página del siguiente examen, en cuyo caso retrocede una página con la tecla de flecha arriba ↑ (o la w). En este momento, pulsando el tabulador el profesor se posiciona en el símbolo del disquete, pulsa *intro* y el examen es asignado al alumno, se añade a la lista de alumnos asignados, y el visor de exámenes se posiciona en la primera página del siguiente examen, con el cursor en el campo de apellidos para clasificar el siguiente examen.

La figura 5 muestra la interfaz preparada para una nueva asignación, y la lista de exámenes asignados en el cuarto inferior derecha. Es posible ordenar esta tabla por los diferentes campos, y editar una clasificación.

[5]La lista de alumnos es ficticia y contiene solo 8 alumnos, de los cuáles solo dos tienen una s en su nombre o apellidos

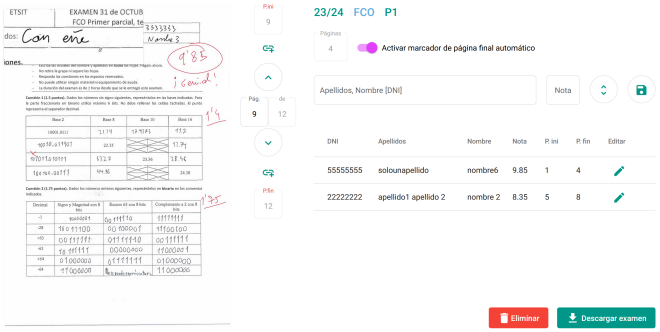


Fig. 5. Lista de exámenes ya asignados, con el DNI, nombre y apellidos, notas, y páginas del PDF que corresponden al examen.

El proceso de clasificación puede interrumpirse y salir del examen e incluso apagar el ordenador. Cuando se acceda de nuevo al examen, el proceso continuará donde se había detenido.

Si un alumno no aparece en el desplegable, se puede dejar su nombre en blanco. Posteriormente, al descargar su examen, aparecerá como "sin-nombre" junto con un número.

C. Editar una clasificación

Es posible cometer un error en la asignación de un examen, bien en el nombre del alumno, su nota o las páginas que corresponden al examen. Cualquiera de estos campos es editable. Para ello se usa el símbolo del lápiz en la lista de exámenes clasificados, y los controles de visualización del examen. Este proceso está detallado en el manual de Madrina, y los autores no consideran necesario describirlo en este artículo.

D. Entrega de notas y exámenes

Una vez asignados todos los exámenes a los alumnos, se descarga un fichero *zip* que contiene una carpeta con el nombre del examen. Dentro de esta carpeta se incluyen dos carpetas llamadas csv y exámenes.

La carpeta csv contiene dos ficheros (figura 6). El fichero detalles.csv contiene toda la información sobre el proceso de la clasificación: dni y nombre de cada alumno, su nota, y las páginas del pdf original que le corresponden. Este fichero tiene un propósito meramente informativo. Por otro lado, el fichero nombre_examen_notas_padrino.csv[6]contiene tan solo el DNI o identificador del alumno y la nota, y es el que se utiliza para importar y publicar las notas en el campus virtual de la universidad. El proceso de importación es sencillo, está bien documentado y es similar a cualquier proceso de inportación de fichero CSV.

La carpeta exámenes (figura 7) contiene un fichero PDF por cada examen. El formato del nombre del fichero es dni_nombre-examen_nombre-alumno.pdf. Se incluyen también dos *scripts* para subir el examen de cada alumno a su espacio compartido. El espacio compartido es una carpeta en el campus virtual (Poliformat - Sakai) que solo

[6]Padrino es el nombre de la aplicación Web usada en UPV para gestionar y publicar las calificaciones oficiales

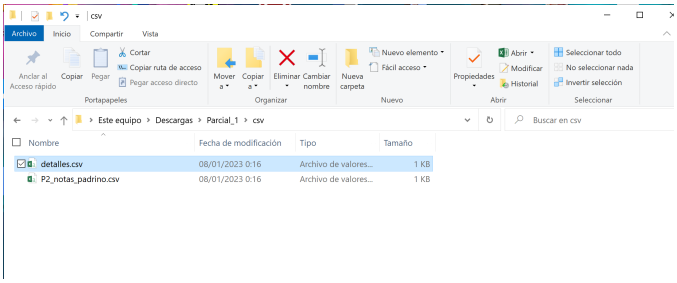


Fig. 6. Carpeta con los ficheros csv con la clasificación y las notas.

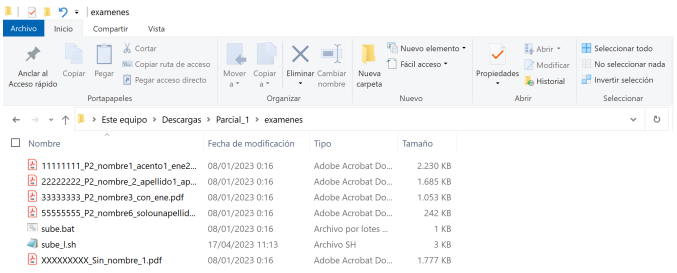


Fig. 7. Carpeta exámenes, con un fichero pdf por cada alumno y los *scripts* para publicarlos en el campus virtual.

puede acceder el alumno propietario y los profesores de la asignatura.

El *script* para subir los exámenes monta el espacio compartido como una unidad de red mediante el protocolo *WebDav* usando los comandos del sistema operativo del ordenador del profesor. Al montar la unidad, se solicita autenticación al usuario pero también es necesario que el usuario tenga iniciada sesión en el campus virtual. En la unidad montada, cada carpeta de cada alumno tiene como nombre el dni del alumno. El *script* procesa todos los ficheros pdf en la carpeta local, extrayendo el dni del nombre del fichero para copiarlo a la carpeta correspondiente, usando los comandos del sistema operativo.

III. Experiencias y resultados

Madrina se ha utilizado durante los cursos 2022/23 y 2023/24, por unos 12 profesores, todos ellos y ellas del departamento de informática de sistemas y computadores, más una profesora del departamento de matemática aplicada. Estos profesores participan en asignaturas del área de arquitectura y tecnología de computadores y de matemática aplicada, en los grados de informática, ciencia de datos, telecomunicaciones, aeroespacial e ingeniería civil. La suma de todos los alumnos a los que se le ha devuelto algún examen en las distintas asignaturas alcanza el millar.

De los 12 profesores, nueve no han participado en el diseño y desarrollo de Madrina, y tras el primer uso de Madrina por estos profesores, se les pidió que respondieran una breve encuesta sobre el uso de Madrina y la entrega de los exámenes a los alumnos.

Todos los profesores coinciden en mayor o menor medida que Madrina es una herramienta útil y que seguirán

utilizándola. Preguntados sobre la devolución de los exámenes a los alumnos, responden que es interesante, conveniente o importante.

Aunque los alumnos desconocen la existencia de Madrina, se les solicitó que respondieran una encuesta sobre el interés y la utilidad de que se les devolviera sus exámenes corregidos. Los resultados de estas encuestas se presentan y analizan en [6], donde se comprueba que los alumnos agradecen tener los exámenes corregidos y que consideran que les son útiles, especialmente para preparar las recuperaciones en caso de que tengan que presentarse.

Por último, se detallan los tiempos necesarios para realizar todo el proceso, lo que permite valorar si el esfuerzo realizado por el profesorado vale la pena. Los datos corresponden a 45 exámenes de 8 páginas cada uno de ellos (180 hojas a doble cara), que una vez escaneados ocupaban unos 120 MB.

- Escaneo de los exámenes. Este proceso es muy dependiente del escáner disponible, y puede representar una parte importante del tiempo. Utilizando un escáner de una cara para escanear a doble cara se necesitaron 15 minutos. En el curso 2023/24 se adquirió un escáner de doble cara y el tiempo se redujo a menos de 3 minutos.
- Carga de los ficheros PDF con los exámenes. Este tiempo no solo incluye la subida al servidor, también el procesado de los PDFs y su conversión a imágenes para poder visualizar las páginas. La carga tardó menos de un minuto y medio. Por otras pruebas realizadas se estima que el tiempo de carga y procesado es menor a 1 segundo por MB.
- Asignación a los alumnos de los exámenes y las notas. El profesor que realizó esta prueba puede considerarse un profesor experto en el uso de Madrina, y necesitó 15 minutos para asignar los 45 alumnos, por lo que un rango de tiempo estimable para cualquier profesor sería entre los 15 y 30 minutos. No se puede negar que este tiempo es considerable, pero es importante recordar que este proceso debe realizarse aunque no se use Madrina ni se devuelvan los exámenes a los alumnos, pues todos los profesores deben introducir, en una hoja de cálculo o en una interfaz web, las notas de los exámenes. Es más que probable que Madrina aceleré el proceso de asignar la nota, pues el profesor no necesita pasar hojas de papel o de un pdf para leer la nota.
- Descarga de los ficheros PDF y las notas. En el proceso de descarga se generan todos y cada uno de los ficheros PDF que contienen el examen de cada alumno. Este proceso, dependiente del número y tamaño de los exámenes, tiene un coste similar al de subir los exámenes.
- Publicar las notas y los exámenes. La publicación de las notas se realiza importando el fichero csv en la aplicación de gestión de notas de la universidad. Dependiendo de la amigabilidad de dicha aplicación, el tiempo estará alrededor de los cinco minutos. Por otro lado, la subida de los exámenes se realiza mediante un *script* que una vez lanzado se ejecuta sin intervención del profesor. Dado que es necesario abrir una conexión con el campus virtual antes de iniciar la subida, se puede considerar un tiempo máximo para iniciar el proceso de unos tres o cuatro minutos.

El proceso completo puede realizarse, para unos 50 exámenes, en menos de una hora, no siendo necesario hacer todos los pasos de forma ininterrumpida,

IV. Conclusiones

Este trabajo presenta una herramienta Web que ayuda al profesorado a devolver los exámenes corregidos a los alumnos. Esta tarea conlleva un coste temporal añadido que puede dividirse en tres fases:

- Escaneo de los exámenes. Como se ha descrito anteriormente, no es una tarea que consuma mucho tiempo ni demanda esfuerzo al profesor. Además, algunos profesores ya escanean los exámenes antes de corregirlos para poder acceder a ellos desde cualquier lugar sin transportar peso ni arriesgarse a perderlos.
- Asignación del alumno al examen. Esta tarea, de una forma u otra, es obligatoria para el profesor, pues es necesario buscar al alumno en un listado y asignarle la nota para posteriormente publicarla. Madrina no solo hace eficiente este proceso, sino que permite, con un mínimo esfuerzo más, devolver el examen corregido al alumno.
- Entregar los exámenes. Esta tarea se realiza de forma automática. El profesor debe lanzar el *script* para subir los exámenes, y esperar a que el proceso termine mientras realiza otras tareas.

Por tanto, se puede concluir que el aumento de carga de trabajo para el profesor es mínimo, y es, para asignaturas con un número elevado de alumnos, mucho menor que la organización y realización de una revisión de examen presencial.

Algunos de los puntos fuertes de Madrina, son:

- El proceso se puede interrumpir y continuar en el mismo punto.
- La asignación de alumnos se realiza sólo con el teclado, lo que multiplica la productividad.
- Se puede buscar un alumno por cualquier subcadena de sus apellidos, nombre o dni, lo que permite encontrarlo fácilmente si la letra del alumno no es clara.
- Es posible editar y corregir una clasificación.
- Cuando un alumno es asignado a un examen, desaparece de la lista de alumnos, lo que reduce el número de coincidencias en la búsqueda.

Por último, y quizá la mayor ventaja de Madrina, es que todos los alumnos, sin consumir tiempo del profesor, pueden revisar su puntuación, la correcta aplicación de los criterios de corrección y comparar su respuesta con la respuesta correcta, permitiendo conocer sus errores y dónde deben mejorar.

Como principal mejora se está trabajando en añadir el reconocimiento automático del DNI manuscrito del alumno y la nota escrita por el profesor. Esto reducirá aún más el tiempo de asignación, ya que el profesor sólo deberá revisar y validar la asignación realizada por Madrina.

Una vez la aplicación esté completamente validada, se propondrá la integración de Madrina en Poliformat, lo que eliminará todas las tareas de gestión de asignaturas, alumnos y la publicación de notas y exámenes corregidos, simplificando la tarea del profesor y consiguiendo que más profesores y profesoras devuelvan sus exámenes corregidos.

REFERENCES

[1] Hattie, J., & Timperley, H. (2007). The Power of Feedback. Review of Educational Research, 77(1), 81-112. https://doi.org/10.3102/003465430298487

[2] J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68–73.

[3] Moreno Olivos, T. (2009). La evaluación del aprendizaje en la universidad: tensiones, contradicciones y desafíos. Revista mexicana de investigación educativa, 14(41), 563-591.

[4] Butler-Henderson, K., & Crawford, J. (2020). A systematic review of online examinations: A pedagogical innovation for scalable authentication and integrity. Computers & Education, 159, 104024.

[5] Sevillano, P. (2021). Metodología y evaluación de la migración a un sistema de corrección Digitalizado. Congreso In-Red 2021. DOI: http://dx.doi.org/10.4995/INRED2021.2021.13790

[6] Martí Campoy, A.; Cecilia Canales, JM.; Agustí Melchor, M.; Atienza Vanacloig, VL. (2023). Estudio sobre la percepción del estudiantado de la retroalimentación de los exámenes presenciales. Editorial Universitat Politècnica de València. 387-397. https://doi.org/10.4995/INRED2023.2023.16582

Proyecto Escape Digital Room: implementación en asignaturas de electrónica digital

Aitor Urrutia Azcona
Tecnología Electrónica,
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, y de Comunicación
Universidad Pública de Navarra
Pamplona, Spain
aitor.urrutia@unavarra.es

Leyre Ruete Ibarrola
Tecnología Electrónica,
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, y de Comunicación
Universidad Pública de Navarra
Pamplona, Spain
leyre.ruete@unavarra.es

Diego López Torres
Tecnología Electrónica,
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, y de Comunicación
Universidad Pública de Navarra
Pamplona, Spain
diego.lopez@unavarra.es

Angel María Andueza Unanua
Tecnología Electrónica,
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, y de Comunicación
Universidad Pública de Navarra
Pamplona, Spain
angel.andueza@unavarra.es

César Elosúa Aguado
Tecnología Electrónica,
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, y de Comunicación
Universidad Pública de Navarra
Pamplona, Spain
cesar.elosua@unavarra.es

***Resumen*—En este trabajo se propone la implantación de una metodología de aprendizaje basada en proyectos para la parte práctica de las asignaturas de electrónica digital de primeros cursos de grado. Mediante el proyecto denominado Escape Digital Room se elaboran una serie de retos y ejercicios de manera modular que el alumnado debe ir resolviendo para la creación de un diseño final en software Quartus y su demostración en un dispositivo FPGA. La puesta en marcha de este proyecto ha permitido constatar que los resultados académicos y la satisfacción y motivación entre el alumnado han mejorado significativamente con respecto a cursos anteriores.**

Keywords*— *Electrónica digital, Sistemas cableados, software Quartus, FPGA.

I. Introducción

Una de las líneas estratégicas del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Comunicación de la Universidad Pública de Navarra (UPNA) es fomentar la mención de electrónica entre el alumnado del grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales. Las asignaturas con contenidos de electrónica de primeros cursos juegan un papel determinante para la motivación y la elección de un itinerario profesional del alumnado en esta materia. Con este propósito se decidió introducir la metodología de aprendizaje basado en proyectos y retos para las sesiones prácticas de la asignatura de electrónica digital [1], dejando atrás un sistema de prácticas estancas con contenido basado en guiones e informes. Se trata de nuevo entorno de aprendizaje en busca de una mejora en la adquisición de conocimientos y habilidades por parte de los estudiantes. La implantación del proyecto Escape Digital Room se enmarca en el proyecto de innovación educativa denominado "PINNE 2022: Aplicación de metodologías activas de aprendizaje basadas en casos reales – Colaboración universidad-empresa" [2], actualmente en desarrollo por el profesorado del área de Tecnología Electrónica de la UPNA y que pretende impartir una formación más aplicada, actualizada e interconectada con el objetivo de cambiar la percepción y la motivación por la electrónica en el alumnado.

II. Descripción Del Proyecto

A. Metodología

Un Escape Room, también conocido como sala de escape o juego de escape en vivo, es una actividad de entretenimiento en la que un grupo de jugadores trabaja en equipo para resolver una serie de acertijos, rompecabezas y enigmas dentro de una habitación temática con el objetivo de "escapar" de ella en un tiempo determinado. El gran interés que han despertado en los últimos años este tipo de actividades también se puede trasladar al entorno educacional [3]. Así, el proyecto Escape Digital Room consiste en la adaptación de esta actividad a la temática de la electrónica digital, en la que se propone la resolución de tres retos en un tiempo determinado mediante una estructura modular. Cada módulo (ver Fig.1) contiene ejercicios y problemas de un capítulo de la asignatura de manera que se abarcan los conceptos y contenidos más significativos. Cada módulo se completa una vez se ha impartido el capítulo necesario de la parte teórica correspondiente.

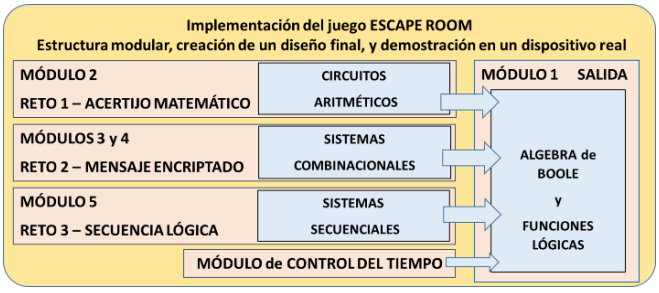


Fig. 1. Esquema del diagrama de bloques del sistema digital propuesto.

Cada uno de los retos tiene una doble funcionalidad: por un lado, que el alumnado los resuelva, y por otro que sean también los diseñadores de los mismos dando las directrices y normas para que los futuros participantes del Escape Room puedan introducir sus respuestas y superarlos para alcanzar la salida del juego.

Al finalizar la asignatura se habrán podido resolver y diseñar todos los retos y por tanto haber completado los módulos.

B. *Materiales*

Una vez se han completado los módulos, se utiliza la herramienta de software Quartus [4] (Intel inc.) que permitirá a los estudiantes dibujar y simular los circuitos diseñados para comprobar su correcto funcionamiento. Posteriormente se realiza la interconexión de todos los módulos generando un diseño o sistema final como se describirá en la sección III. Finalmente, el sistema será volcado a una tarjeta DE1 de Terasic que incluye un SoC Cyclone V (5CSEMA5F31C6) que combina dos núcleos Cortex A9 con lógica reconfigurable tipo como el de la Figura 2 para comprobar su correcto funcionamiento y dejarlo disponible para la participación del juego de otros alumnos.

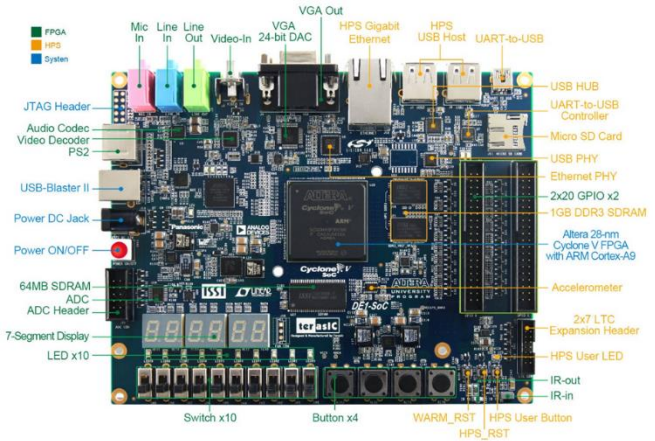


Fig. 2. Esquema de la tarjeta con FPGA DE1-SoC utilizada para la implementación del proyecto.

Entre los criterios de diseño habrá que tener en cuenta que el número máximo de botones e interruptores de la tarjeta DE1-SoC es 4 y 10 respectivamente y que se dispone de un máximo de 10 leds y de 6 grupos de displays 7 segmentos.

III. Implementación Del Proyecto

La implementación del Proyecto Escape Digital Room se desarrolla a lo largo del semestre durante las clases prácticas de la asignatura. En la primera sesión práctica se presenta y explica el proyecto al estudiantado con su estructura modular (ver Fig.1) y se propone la resolución del primer módulo. En las sesiones posteriores se va añadiendo un módulo nuevo conforme se ha visto el capítulo de teoría correspondiente, para finalmente interconectarlos y tener un diseño final. A continuación, se muestra el desarrollo de las diferentes fases de la implementación del proyecto.

A. *Módulo 1: Salida del Escape Room*

En todas las actividades de Escape Room, la salida es una característica común. Para diseñar la salida se idea un primer módulo que contendrá el mecanismo por el cual se controlan dos elementos tan básicos como una puerta y una luz. En este módulo 1 se propone a los estudiantes un mecanismo de libre elección mediante el cual expliquen en qué condiciones se acciona la luz y se abre la puerta de salida. Para este propósito deben identificar que el módulo posee una entrada proveniente de cada uno de los 3 retos y otra adicional para el temporizador del juego. Deben definir mediante puertas lógicas básicas las relaciones entre las 4 entradas y las 2 salidas correspondientes al accionamiento de la luz y de la puerta. Este primer módulo es un ejercicio sencillo que tiene varias finalidades para el/la estudiante: a) es una primera toma de contacto con casos sencillos de lógica digital en la vida real; b) se enfrenta a un ejercicio de diseño libre sin apenas enunciado; c) adquiere el doble rol de resolver el módulo y de ser diseñador/a del mismo; d) se familiariza con el manejo del software y consigue simular y evaluar sus propios circuitos.

B. *Módulo 2: Reto matemático*

En este módulo 2 se proponen diferentes acertijos matemáticos de sencilla resolución a cada grupo de alumnos sobre circuitos aritméticos. Cada acertijo tiene un resultado diferente y se les pide que no compartan dicha información a los otros grupos de estudiantes. Una vez tengan la solución, deberán diseñar un circuito mediante el cual los participantes del juego puedan introducir dicho resultado en un teclado de 2 bits. Normalmente la solución del acertijo no está en el rango de los 2 bits por lo que se ofrece nuevamente un diseño libre mediante el cual se pueda conducir a los jugadores a la introducción de los bits correctos. Por tanto, en ese módulo deben diseñar un circuito con al menos 2 entradas para la respuesta de 2 bits, y una salida que conectará con el módulo 1 de salida. Adicionalmente se proponen más bits como, por ejemplo, una entrada que habilite el reto o la respuesta antes o después de ser introducida; y una salida que indique mediante un led que el reto se ha superado.

C. *Módulos 3 y 4: Reto del mensaje encriptado*

El segundo reto está relacionado con los circuitos combinacionales. El enunciado trata de captar la atención del estudiantado con el diseño de un mensaje oculto en cifrado Vigenère [5]. Se les muestra qué son el cifrado César y el cifrado Vigenère, dos de los cifrados alfabéticos más conocidos a lo largo de la historia [6] y se les facilita una tabla Vigenère que incluya además del abecedario también los dígitos 0 y 1 (ver Fig. 3), explicándoles el mecanismo de encriptación con la utilización de una clave.

Fig. 3. Tabla Vigenère modificada con los términos 0 y 1.

Los estudiantes deberán realizar dos actividades bien diferenciadas. La primera de ellas (modulo 3, sobre el juego) será cifrar un mensaje que contenga un número de 3 bits y preparar una tarjeta a los futuros participantes que contenga el mensaje cifrado, la tabla del código Vigenère para descifrarlo y una pregunta relacionada con circuitos combinacionales. La respuesta de la pregunta deberá ser única y será la clave del cifrado Vigenère.

La segunda actividad (módulo 4, sobre los circuitos) será diseñar un conversor que transforme un número en código

Gray de 3 bits en código BCD utilizando para ello preferentemente multiplexores y/o demultiplexores.

La combinación de ambas actividades se completa con la introducción del número descifrado por los participantes a través de un teclado de 3 bits. Ese número será la entrada al conversor y se deberá mostrar el resultado en BCD en la salida. Por tanto, este módulo contendrá un bloque de 3 entradas y 3 salidas. Finalmente, para completar el reto los estudiantes integrarán un comparador de 3 bits que dictamine si el resultado del participante es el correcto, de manera que las 3 salidas del conversor sean comprobadas y se obtenga una salida que indique si el reto se ha superado.

D. Módulo 5: Reto de la secuencia lógica

El tercer reto se enmarca en los contenidos de sistemas secuenciales impartidos en las clases teóricas. Haciendo uso de circuitos síncronos se propone a los estudiantes un sistema que satisfaga las siguientes condiciones:

a) Un circuito que muestre un valor de una secuencia lógica en un display de 7 segmentos cada vez que se pulse un botón. Dicha secuencia debe ser una serie de elementos que se suceden unos a otros y guardan relación entre sí y que su máximo valor no supere los 3 bits.

b) Una pregunta o pista acerca de la secuencia desarrollada que conduzca a una respuesta representable por un valor entre 0 y 9.

c) Un circuito para que los participantes puedan introducir la respuesta pulsando un botón de forma recurrente y que quede representada en otro display 7 segmentos.

d) Un circuito de decisión que compare el valor introducido por el participante con el valor esperado, y que muestre la superación del reto si son iguales.

El sistema propuesto se compone de un contador de diseño libre con diferentes condiciones para cada grupo de estudiantes para el apartado a), un contador síncrono de módulo 10 para el apartado c), y un comparador de 3 bits para el apartado d). Para la representación de los contadores en displays se emplean conversores BCD-7 segmentos. En cuanto al comparador, se integra uno como el diseñado para la salida de los módulos anteriores.

E. Integración de módulos y volcado del diseño final

Una vez se han realizado todos los módulos por separado, su interconexión es una parte clave para completar el sistema final. Se recomienda a todos los estudiantes que verifiquen los módulos por separado mediante simulación antes de crear un esquemático final. La conexión entre módulos consistirá en conectar las salidas de superación de cada uno de los retos con las entradas destinadas a este propósito que posee el módulo de salida. Además, se incluirá un nuevo bloque específico para el temporizador del juego. Este bloque viene desarrollado como una actividad fuera del contexto de las prácticas por falta de tiempo en la asignatura y es proveído por el profesorado, que consiste en un cronómetro que tendrá como entrada el reloj de 4MHz del dispositivo FPGA y como salidas 2 displays 7 segmentos que marquen el tiempo en minutos y a su vez una salida adicional que indicará si el tiempo del juego ha finalizado.

Por otro lado, además de la interconexión de los módulos, también se anima a los estudiantes a mejorar sus diseños puesto que llegan a esta fase habiendo asimilado todos los conceptos teóricos y prácticos de la asignatura. Entradas o salidas adicionales como interruptores para habilitar y deshabilitar retos, leds para indicar la superación de retos, o incluso texto en los displays una vez se ha superado el juego como por ejemplo se muestra en la Figura 4.

Tras ello, se realiza una asignación de pines de entrada para botones e interruptores y de pines de salida para leds y displays 7 segmentos, para posteriormente volcar el diseño final en el dispositivo FPGA.

Fig. 4. Ejemplo de un conjunto de salidas activadas mediante leds y displays tras la superación de todos los retos en el tiempo establedcido.

Finalmente, los estudiantes deben comprobar el correcto funcionamiento de todo el sistema para ser evaluados y permitir que otro grupo de estudiantes participe en su Escape Room.

IV. DISCUSION Y RESULTADOS

La implementación del proyecto por parte de los estudiantes ha permitido realizar un análisis del resultado del mismo y observar diversos aspectos a nivel de cada módulo.

A. Módulo 1: Salida del Escape Room

En el módulo de salida se han presentado esquemáticos muy sencillos como una puerta AND de 3 entradas para activar la luz de salida (led), que contrasta con otras soluciones que representan un led por cada reto además de un texto final con la palabra *OPEn* como la de la Figura 4. Ante estas situaciones, una propuesta de mejora es la de utilizar una estructura secuencial en vez de básica, de manera que la representación en leds y displays de la salida sea distinta en función de los retos conseguidos en cada momento. Otra alternativa por la que se optó fue la de ajustar un enunciado más estricto en el cual solo puedan utilizar el mínimo número de puertas de un solo tipo y obligar a realizar una tabla de verdad, un diagrama de Karnaugh y obtener funciones de salida simplificadas. De esa manera, por ejemplo, se obtiene el esquemático de la Figura 5.

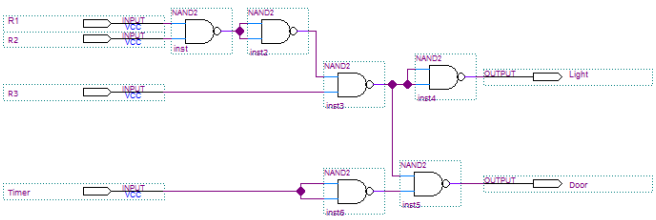


Fig. 5. Ejemplo de un posible esquemático para el módulo de salida utilizando solamente puertas NAND.

B. Módulo 2: Reto matemático

En el módulo 2 los resultados no fueron los esperados. Si bien el profesorado pensaba que los estudiantes optarían por diseñar un comparador de palabras de 2 bits cada una, resulta los circuitos de decisión presentados fueron lo más sencillos posibles buscando una solución particular a cada acertijo. Así, por ejemplo, si la respuesta correcta era “11” entonces se optó por una puerta AND, o la respuesta era “00” con una NAND. Se observó que algunos grupos de estudiantes que optaron por

estas soluciones sencillas, luego tuvieron más dificultades al enfrentarse al comparador de 3 bits del módulo 4 al no haber preparado el comparador. La propuesta de mejora en este módulo 2 es la de explicitar que deben diseñar un comparador de bits.

C. Módulos 3 y 4: Reto del mensaje encriptado

En los módulos 3 y 4, algunos grupos no se vieron convencidos de la utilidad del diseño del mensaje cifrado por el hecho de que no estaba relacionado con la asignatura y que realmente la pregunta para hallar la clave aportaba poco valor desde el punto de vista del aprendizaje. Otros en cambio se entusiasmaron por esa fase de juego por el hecho de hacer el Escape Room más realista. Ante esta experiencia se podría modificar la tipología del reto por otra más acorde con sistemas relacionados con multiplexores y codificadores. Otras propuestas podrían ser el formular el reto modificando o añadiendo otros conversores a código AIKEN.

D. Módulo 5: Reto de la secuencia lógica

En el caso del módulo 5, el diseño de los contadores estaba condicionado a ser síncronos y los grupos tenían diferentes directrices: pares, impares, descendentes, diferentes módulos, y diferentes tipos de biestables a utilizar. En este módulo sí que el profesorado tuvo que desglosar detalladamente los 4 puntos (a, b, c, y d) mostrados en el enunciado del reto además de explicar el conversor BCD a 7 segmentos para poder mostrar los dígitos posteriormente en la pantalla de la FPGA. La percepción del alumnado ante este módulo fue de que era bastante extenso. No obstante, para mitigar la carga de trabajo el contador módulo 10 es un ejercicio guiado durante la sesión de prácticas y, como se ha comentado anteriormente, el comparador de 3 bits ya se había diseñado previamente.

E. Integración de módulos y volcado del diseño final

·En la fase de integración de los módulos se pudo comprobar la capacidad del alumnado para organizar e interrelacionar de manera ordenada un sistema de bloques de una cierta complejidad para confeccionar el esquemático final del sistema. Al alumnado se le recomienda en este proceso hacerse un esquema con un recuento y reconocimiento de todas las entradas y salidas que tendrá el diseño antes realizar la asignación de cada una de ellas con un pin específico del dispositivo DE1.

F. Evaluación final y consideraciones

La evaluación del proyecto se realiza mediante ítems incluidos en cada módulo y en una exposición y demostración final del Escape Room. Por último, se permite la participación e intercambio de los juegos entre el alumnado. En el final del desarrollo del proyecto se perciben distintos comportamientos entre el alumnado. Aquellos que se han ceñido al tiempo marcado para cada módulo pueden mostrar su proyecto y se nota cierta satisfacción, mientras que en otros casos se nota cierta tensión por finalizarlo a tiempo como si de un propio Escape Room se tratase. Se ha percibido también un factor motivador para finalizar a tiempo en la fase última del proyecto por el hecho de que poder participar, compartir con otros compañeros sus propios Escape Rooms e interesarse por las diferentes formas de afrontar cada reto y la manera de presentarlo en el juego.

El impacto de la implantación del proyecto en los resultados académicos fue positivamente significativo, obteniendo unas notas finales de las prácticas con un incremento de 0.6 puntos sobre 10 en comparación con el promedio de los tres cursos anteriores con un promedio de 125 alumnos por curso. Además, otro indicador importante es el número prácticamente nulo de estudiantes que abandona parte práctica de la asignatura, gracias al nexo de unión que tiene el proyecto para relacionar todo el conjunto de sesiones de laboratorio. Esto también se ver reflejado en la mayor tasa de presentados en la evaluación final de teoría de la asignatura, donde la tasa de presentados sobre matriculados se ha incrementado en un 10% en los dos últimos cursos en los que se ha implantado el proyecto Escape Room. En el aspecto cualitativo también se ha visto reflejado el cambio de metodología de las prácticas en las encuestas de satisfacción docente por parte del alumnado, donde se han añadido bastantes reseñas indicando un grado de aceptación notable. Algunas de estas valoraciones textuales son por ejemplo que "*las practicas han sido muy entretenidas y gracias a ellas he entendido mejor los temas de clase*" o "*las prácticas han sido muy interesantes*".

V. CONCLUSIONES

El proyecto "Escape Digital Room" pretender ser una demostración de estrategia educativa innovadora y efectiva para las asignaturas de electrónica digital en los primeros cursos de grado. Al implementar una metodología basada en proyectos y retos inspirada en los Escape Rooms, se ha logrado aumentar significativamente la motivación y la satisfacción del alumnado, así como mejorar su rendimiento académico. Esta nueva aproximación ha permitido integrar los contenidos teóricos con la práctica de una manera lúdica y aplicable, proporcionando a los estudiantes una experiencia de aprendizaje más significativa y motivadora.

La estructura modular del proyecto ha facilitado un desarrollo progresivo del aprendizaje, permitiendo a los estudiantes resolver retos en diferentes etapas y aplicar los conceptos de manera secuencial. Al asumir roles activos como diseñadores de los retos y solucionadores de problemas, los estudiantes han desarrollado además otras habilidades como la creatividad, el pensamiento crítico y la resolución de problemas, lo que contribuye a una formación integral y adaptada a las demandas del mundo laboral.

La evaluación y observación del progreso de la implementación del proyecto han sido fundamentales para identificar áreas de mejora dentro de cada fase modular. Se ha visto por ejemplo la necesidad de explicitar algunos requerimientos y diversificar los retos. Aspectos destacables del proyecto son la versatilidad a la hora de cambiar los ejercicios de cada módulo, y la escalabilidad tanto en el número de retos o ejercicios, como en la dificultad de los mismos. Además, también hay que resaltar que los resultados académicos se han visto mejorados en las calificaciones finales de las prácticas con respecto al promedio de los cursos anteriores, y que el número de estudiantes que abandona las prácticas es inapreciable, siendo una de las consecuencias de que la tasa de presentados sobre matriculados al examen ordinario de la asignatura haya subido del 80% al 90% desde la implantación del proyecto.

En conjunto, el proyecto Escape Digital Room representa un enfoque innovador que combina la teoría y la práctica de la electrónica digital manera interactiva y aplicable, que abre un escenario de múltiples opciones para los estudiantes y para el profesorado, con posibles discusiones grupales, preparación de módulos en equipos de manera colaborativa, etc. para optimizar el aprendizaje y la experiencia del estudiantado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado por el proyecto de innovación educativa PINNE2022-UPNA titulado *Aplicación de metodologías activas de aprendizaje basadas en casos reales – Colaboración universidad-empresa.* Dar las gracias a la empresa Intel por la donación de las tarjetas DE1-SoC.

REFERENCIAS

[1] V. Kiray, S. Demir, et al, “Improving Digital Electronics Education with FPGA Technology, PBL and Micro Learning,” in Proc. 2nd IEEE Int. Conf. Teach. Assess. Learn. Eng., TALE 2013, Indonesia, art 6654479, pp.445-448.

[2] A. M. Andueza, A. Urrutia, et al, “Aplicación de metodologías activas basadas en casos reales - Colaboración Universidad-Empresa”, art. 67, in XVI Technologies Applied to Electronics Teaching Conference TAEE 2024, Malaga, pre-accepted.

[3] A. Veldkamp, L. van de Grint, M P.J. Knippels, W. R. van Joolingen, “Escape education: A systematic review on escape rooms in education”, Educational Research Review, vol. 31, 2020, 100364.

[4] Quartus® Prime Design Software, Intel Corp., CA, USA, 2023. [Online]. Available: https://www.intel.com/content/www/us/en/products/details/fpga/development-tools/quartus-prime/resource.html

[5] O. Holstein, "The ciphers of Porta and Vigenère: The original undecipherable code, and how to decipher it". Scientific American Monthly, vol. 4, 1921, pp 332–334.

[6] D. Luciano, G. Prichett, Cryptology: From Caesar Ciphers to Public-Key Cryptosystems, The College Mathematics Journal, Jan. 1987, vol. 18, num. 1, pp. 2–17.

DEMOSTRADORES 5 – SESIÓN DE DEMOSTRADORES

Recreación basada en Arduino de sistemas de Telecomunicaciones

1st Margarita Ruiz-García
Departamento Tecnología Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
mcruiz@uma.es

2nd Francisco Velasco-Álvarez
Departamento Tecnología Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
fvelasco@uma.es

3rd Arcadio Reyes-Lecuona
Departamento Tecnología Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
areyes@uma.es

***Abstract*—Este proyecto se propone a los estudiantes de primer año como una práctica guiada para familiarizarlos con los desafíos generales de la electrónica de los sistemas de telecomunicaciones. Aborda aspectos como el diseño analógico para la detección, la programación de un microcontrolador para el procesamiento digital y el control de actuadores. Esta práctica incluye dos sistemas electrónicos en el campo de las Telecomunicaciones. Primero, uno llamado Optotheremin, una réplica del clásico instrumento musical Theremin basado en un microcontrolador y un sensor óptico; segundo, un sistema de comunicación basado en pulsos de luz y código Morse. Las encuestas de evaluación reportaron satisfacción de los estudiantes.**

***Index Terms*—microcontroller, Arduino, sensors, digital processing, theremin**

I. Introducción

Este trabajo se ubica en la asignatura Ingeniería y Sociedad de primer curso del primer semestre de todos los grados que se imparten en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad de Málaga, aunque haremos especial mención al grado de Electrónica de Telecomunicación. Esta asignatura pretende mostrar al estudiante tanto la realidad de la profesión como una visión amplia de la formación que va a recibir a lo largo del grado. En cuanto a la profesión, se han buscado como resultados de aprendizaje comprender el papel pasado, presente y futuro de la Ingeniería de Telecomunicación en la sociedad, así como conocer los ámbitos de actuación profesional. En lo que se refiere a formación, se ha desglosado en dos bloques, uno de formación básica que abarca los contenidos desarrollados en los cursos de primero y segundo y un segundo bloque de formación específica que engloba los cursos de tercero y cuarto.

El proyecto que se propone se corresponde con la formación básica en electrónica y se ha planteado como el desarrollo global de un sencillo sistema electrónico que sirva de base para entender los sistemas de telecomunicación que verán más adelante en sus estudios. Esto ha supuesto un difícil reto dado que los estudiantes acaban de ingresar en la Universidad y puede que no estén preparados para manejar conceptos complejos de electrónica o de programación; por eso se ha optado por presentar los principales bloques que conforman un sistema muy simplificado y que se experimente con cada uno de esos bloques.

A lo largo de cuatro sesiones prácticas se trabajó en dos sistemas (tres sesiones para el primero, la última para el segundo). El primero de los sistemas se denominó ”Optotheremin” y consiste en la versión digital basada en un sensor óptico de un instrumento musical electrónico clásico (theremin) cuya frecuencia sonora se modula con lo movimientos de la mano, sin que haya contacto físico con el instrumento. Tal y como se describirá a continuación es necesario implementar una interfaz de entrada que detecte los movimientos de la mano, una interfaz de salida que reproduzca las frecuencias sonoras generadas y un bloque de procesado digital que genere las frecuencias sonoras adecuadas. En este bloque de procesado se ha optado por usar el microcontrolador Arduino como herramienta fácil para el aprendizaje de la electrónica y la programación [1], [2]. El desarrollo de esta parte de la práctica fue guiado paso a paso, explicando por parte del profesorado cada concepto antes de dar a conocer cómo se podía implementar. Dado que a este sistema se le dedicó la mayor parte del tiempo, será el que describiremos aquí con mayor detalle. Una vez que el alumnado estaba familiarizado con Arduino, los sensores y actuadores, como segunda parte de la práctica se procedió a utilizar y realizar modificaciones sobre otro sistema: un emisor/receptor de mensajes basado en pulsos de luz y en la codificación Morse. Esta segunda parte de la práctica está explicada en el apartado ”Otros sistemas de ejemplo”.

II. Descripción del sistema

El objetivo de este proyecto es que los estudiantes conozcan las bases de su formación experimentando con los variados conceptos que se les irán presentando gradualmente en los primeros cursos y que están involucrados en los sistemas electrónicos que desarrollarán a lo largo de su carrera académica y profesional como graduados de la rama de ingeniería de telecomunicación. Por este motivo se les propuso el reto de manejar los mundos analógico y digital Fig. 1 en un sistema que necesita interaccionar con la realidad a través de un interfaz analógico y necesita realizar un procesado digital con los datos adquiridos.

La manera de presentar el sistema ha tratado de estimular el interés y el deseo de investigar de los estudiantes. En primer lugar se describió un instrumento musical un tanto

especial como es el theremin y se les contó su historia [3]. En la Fig. 2 puede apreciarse el primer theremin creado en 1920 por el físico ruso León Theremin. La peculiaridad de su funcionamiento radica en que con los movimientos de la mano, sin contacto físico, se van generando las notas musicales.

Tras esta descripción se les propuso realizar la implementación de este instrumento de una forma flexible, versátil y económica.

Fig. 1. Interfaces analógico y digital del sistema

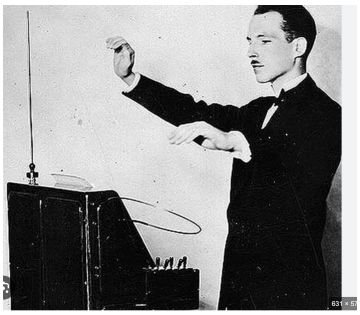


Fig. 2. Primer theremin (1920)

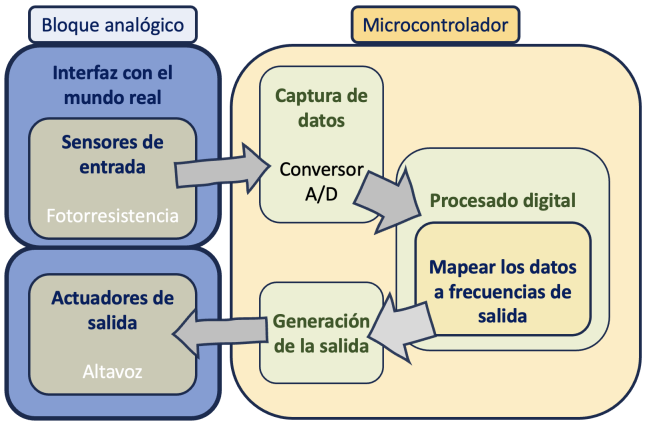


Fig. 3. Bloques de diseño

Para ello fue necesario presentar los bloques de los que debía constar este diseño Fig. 3, descritos a continuación, y se debía decidir cómo implementar cada uno de estos bloques. Esta toma de decisiones trata de acercar a los estudiantes al proceso de diseño y a la asimilación de los conceptos que se manejan.

A. *Bloque analógico*

En este bloque se incluyen dos partes fundamentales:

- Interfaz analógico de entrada con los sensores necesarios para tomar datos del mundo real.
- Interfaz analógico de salida con los actuadores requeridos.

En nuestro proyecto para diseñar el interfaz analógico de entrada fue necesario elegir un sensor que fuese capaz de traducir el movimiento de la mano con la que se va a tocar el instrumento, sin que hubiese contacto físico. El sensor propuesto fue una fotorresistencia, de modo que al mover la mano cerca de ésta, variase la luz recibida por el sensor y por tanto el valor de la resistencia. Usando un divisor de tensión, estos cambios en el valor de la resistencia se traducen en cambios de tensión, pudiendo ser esta tensión medida en una entrada del microcontrolador, y por tanto siendo dicha tensión la variable de control del sistema.

Por otro lado fue necesario elegir un actuador de salida para interactuar desde el microcontrolador con el mundo exterior (analógico). En este caso se optó por un altavoz que reprodujese la onda generada a partir de la tensión de control a la entrada, convirtiendo una onda cuadrada de tensión en una señal acústica.

B. *Microcontrolador*

La primera elección importante en este caso fue elegir el microcontrolador más adecuado. En este caso se optó por usar como microcontrolador Arduino [4] debido a sus características:

- Plataforma abierta.
- Alta flexibilidad y facilidad de uso.
- Facilidad de programación y disponibilidad de entornos gráficos.
- Disponibilidad de multitud de librerías.

Tras esto, es importante definir la misión de este bloque que será generar los distintos tonos musicales en función del movimiento de la mano, es decir ajustar la frecuencia de la señal de salida (nota musical) según el valor de la tensión de control a la entrada (fotorresistencia). Para llevarlo a cabo es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Captura de datos. En este caso es necesario que la tensión de control se conecte a uno de los puertos analógicos de entrada de Arduino y que se realice la conversión de datos analógico/digital.
- Procesado digital. Se han de mapear los datos de las tensiones de control a frecuencias proporcionales para la señal de salida.
- Generación de la salida. Se ha de generar un señal de salida analógica con la frecuencia adecuada.

En la figura Fig. 4 se esquematizan las decisiones tomadas en este ejemplo de diseño. Es importante que los alumnos entiendan la necesidad de cada uno de estos bloques para que en la siguiente fase comiencen a implementarlos.

III. Programación con Arduino

Como se ha mencionado, se optó por utilizar Arduino porque proporciona entre otras ventajas, un entorno sencillo de programación. A pesar de ello, dado el contexto temporal en que se desarrolla la asignatura (primer semestre de primer curso) el estudiantado puede carecer de conocimientos básicos sobre programación. Por esta razón se decidió hacer la práctica con un conjunto muy limitado de instrucciones de código, proporcionando y explicando dichas instrucciones a los estudiantes a medida que se iban completando las tareas necesarias. En el siguiente apartado (en la Fase 3) se dará detalle de dichas instrucciones.

IV. Implementación

En esta sección se van a describir las distintas fases para la implementación del proyecto.

A. Fase 1. Montaje del sensor de entrada

En primer lugar ha sido necesario realizar un sencillo montaje de la fotorresistencia para sensar el movimiento de la mano. En este caso se ha elegido la protoboard como placa de pruebas porque es muy simple tanto el montaje del circuito, como realizar pruebas experimentales y modificaciones de manera rápida. No obstante, para el alumnado, era la primera vez que usaban una protoboard, por lo que nos hemos encontrado con una primera barrera que ha sido necesario superar. El montaje propuesto es un divisor de tensión como el que se muestra en la Fig. 5 donde al variar el valor de la fotorresistencia con la luz, varía el valor de la tensión entre sus terminales. Además se ha usado la tensión de alimentación que proporciona Arduino para que no sea necesaria ninguna fuente de alimentación externa. En este caso, de nuevo, es importante destacar que este divisor de tensión ha sido el primer circuito que se han encontrado los estudiantes en la carrera, por lo que ha sido necesario detenernos especialmente en su explicación.

En la Fig. 6 se observa cómo se conecta el montaje de la protoboard a un puerto analógico de entrada de Arduino (cable verde) para que pueda adquirir el dato de la tensión de control. Para realizar esta conexión es necesario describir los puertos de entrada y salida del microcontrolador, indicando si son analógicos o digitales y su dirección (entrada/salida).

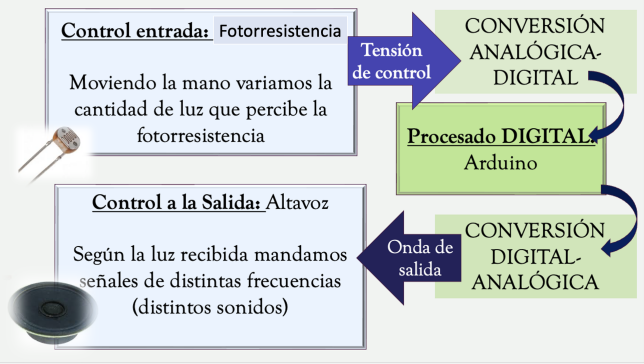


Fig. 4. Diseño de los bloques

B. Fase 2. Montaje del actuador de salida

En esta fase se va a describir el montaje en protoboard del altavoz que es el actuador de salida Fig. 7 y el encargado de reproducir la onda generada por Arduino según el los valores obtenidos en el sensor de entrada (tensión de control). El altavoz se conecta al puerto digital de salida de Arduino por el que se generará la nota musical (con una resistencia en serie para limitar el volumen). Estas notas se generan con señales cuadradas de frecuencias proporcionales a la tensión de control de entrada. La elección de la forma cuadrada de onda se debe a la fácil obtención de ésta utilizando una salida digital de Arduino. Uno de los motivos por los que se ha escogido un circuito que genera una señal sonora es que esto nos permite conectar un concepto tan abstracto como una onda cuadrada de tensión y la experiencia sensorial del sonido con timbre de onda cuadrada. Esta conexión se convierte en una oportunidad para reflexionar sobre las señales, la transducción de señal eléctrica a señal sonora, conceptos como frecuencia y timbre y diferencias entre señales analógicas y digitales; todo ello con el apoyo de la experiencia sensorial del sonido.

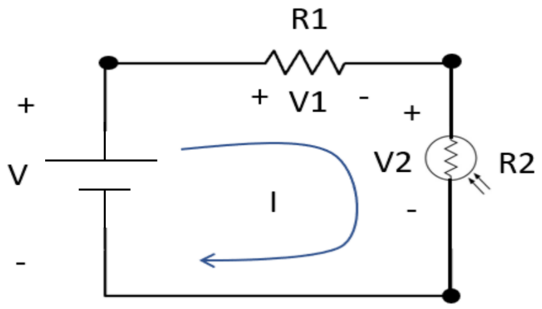


Fig. 5. Divisor de tensión con fotorresistencia

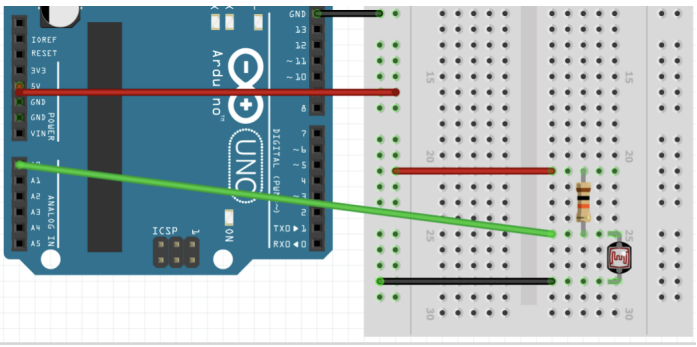


Fig. 6. Montaje de la fotorresistencia en placa y conexión a Arduino

En la Fig. 8 se observa la onda cuadrada generada por Arduino con los valores de 5 y 0 voltios cuyo periodo se va a programar según la entrada.

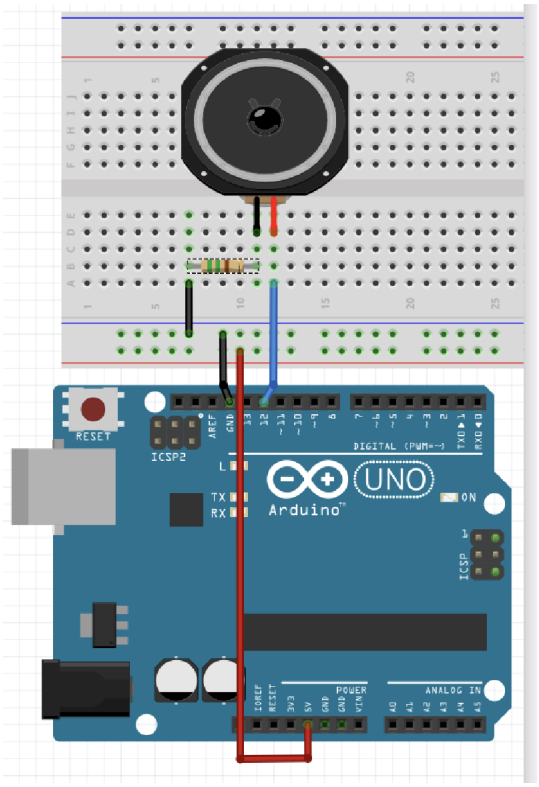


Fig. 7. Montaje del altavoz y conexión a Arduino

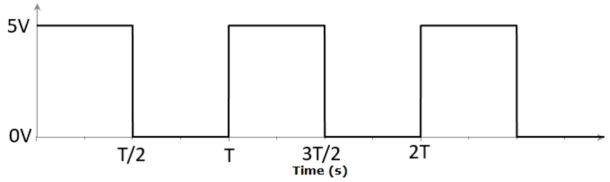


Fig. 8. Onda de salida para el altavoz

C. Fase 3. Microcontrolador

En este punto veremos cómo todo el proceso de conversión analógica/digital, procesado de señal y obtención de la onda acústica final puede realizarse con un conjunto muy reducido de instrucciones en Arduino: ”analogRead()”, ”map()”, ”digitalWrite()” y ”delayMicroseconds()”.

1) Fase 3.1. Lectura de datos: El microcontrolador debe realizar la lectura de la tensión de control del puerto de entrada analógico, para ello se usa la instrucción:

- `int luz = analogRead( A0 );`

Con esta instrucción se puede leer de un puerto analógico donde se ha conectado una tensión variable (en función de la luz recibida por la fotorresistencia). Para convertir esta tensión analógica a digital se debe estudiar la problemática de la conversión analógico/digital de Arduino, tanto el número de bits como su resolución. Es quizás un poco pronto para entender los conceptos relacionados con la conversión analógico-digital, por lo que esto se debe abordar con cuidado. No obstante, pensamos que es una buena oportunidad para preparar al alumnado con una primera experiencia en la que se conecta de forma interactiva en tiempo real una tensión (de 0V a 5V) controlada con el movimiento de la mano y una lectura numérica del puerto analógico resultante de la conversión (entre 0 y 1023). Y, aunque esto no lleve a una comprensión total de esta conversión, sí que puede ser de ayuda haber tenido esta experiencia cuando se aborden estos conceptos en profundidad más adelante.

2) Fase 3.2. Procesado digital de los datos de entrada: Una vez los estudiantes comprobaron cómo funcionaba la conversión analógico/digital y qué significaban los valores leídos por Arduino, se procedió a ”calibrar” el sistema. Este proceso consiste en medir qué valores mínimos y máximos de tensión se reciben en la entrada de Arduino cuando la fotorresistencia recibe la cantidad máxima de luz (alejando la mano del sensor para no hacer sombra de la luz ambiente) y mínima (acercando la mano hacia el sensor hasta tapar toda la luz incidente sobre él). Es importante señalar aquí que el concepto de calibración es muy complejo y no se desarrolla explícitamente en nuestro ejercicio. Sin embargo, sin darse cuenta, el alumnado está aprendiendo cosas que más adelante les facilitarán la comprensión de otros conceptos más complejos, como el de la calibración. Posteriormente, debe decidirse a qué frecuencias de la señal de salida corresponderán esos valores máximo y mínimo de entrada. Como referencia, se le propuso al alumnado que utilizase 100Hz para la frecuencia mínima y 2kHz para la máxima. De este modo, la frecuencia de la señal de salida se calcularía proporcionalmente, dentro de ese rango, en función de la tensión recibida (que, a su vez, dependía de la posición de la mano respecto al sensor). Dado el modo en que se generaba la onda cuadrada (explicado en el siguiente punto), el valor de la frecuencia no es el parámetro óptimo para calcular, sino que es preferible obtener el semiperiodo de la onda deseada; para las frecuencias antes mencionadas, 5000μs y 250μs. Si tomamos como ejemplo de calibración que los valores mínimos y máximos de tensión (ya digitalizada) fuesen, respectivamente, 200 y 600, la instrucción que calcula el semiperiodo correspondiente será ”map”, con los siguientes argumentos:

- `float semiperiodo = map( luz, 200, 600, 5000, 250 );`

3) Fase 3.3. Generación de la onda de salida: El objetivo del sistema era conseguir un sonido cuya frecuencia variase con el movimiento de la mano, por lo que se necesitaba generar una onda acústica analógica. Arduino no está especialmente preparado para trabajar con salidas analógicas, pero podemos aprovechar que la escritura digital de Arduino en sus puertos de salida equivale a poner en ellos una tensión de 0 ó 5 V, pudiendo adaptar el ritmo de escritura para generar así una

onda cuadrada de tensión, siendo *de facto* una señal analógica (ver Fig. 8). Para obtener la onda deseada se recurre a las instrucciones siguientes (suponiendo que se usa como salida el pin 12 de Arduino):

```
digitalWrite( 12, HIGH );
delayMicroseconds( semiperiodo );
digitalWrite( 12, LOW );
delayMicroseconds( semiperiodo );
```

La primera instrucción hace que en el pin 12 haya un valor de 5V (nivel HIGH), que se mantiene durante el tiempo del semiperiodo (obtenido en el paso anterior) gracias a la instrucción de espera ”delayMicroseconds()”. Pasado ese tiempo, la siguiente instrucción pone 0 V en la misma salida (nivel LOW) y la mantiene el mismo tiempo (semiperiodo). Como resultado lo que se tiene es una señal que varía periódicamente entre 0 y 5 V, es decir, una onda cuadrada de la frecuencia deseada.

La implementación de estas rutinas de procesado ha sido muy guiada por parte del equipo docente. Esto se fundamenta en que el objetivo primordial no era enseñar a los estudiantes a programar, sino que conocieran los aspectos básicos de cómo realizar este procesado y experimentaran con los diversos parámetros para evaluar su impacto en el sistema. De esta forma, ayudamos a empoderarlos para que sientan que pueden controlar un sistema electrónico en el que se manipulan sucesos a una escala de microsegundos, y tensiones eléctricas que luego tienen un efecto muy concreto en forma de onda sonora.

V. Otros sistemas de ejemplo

A continuación, se comentará brevemente una segunda parte de la práctica llevada a cabo en la última sesión. Una vez que se completó el sistema del Optotheremin, se le guió al estudiantado para implementar una segunda práctica (que se vio con menos detalle) reutilizando el montaje físico de la protoboard. En este caso se trataba de implementar un sistema de comunicaciones ópticas (no guiadas) basadas en el código Morse. Para ello, se cambió el uso del altavoz como actuador por un diodo LED de alta luminiscencia.

Al tratarse de un sistema de comunicación, se requería un emisor y un receptor, por lo que los estudiantes se agruparon de modo que dos sistemas pudiesen comunicarse entre ellos (cada grupo con su propio Arduino y protoboard). Se propuso que cada grupo acercase su sistema al de los compañeros, de modo que la orientación del LED hiciese incidir la luz de éste en la fotorresistencia del otro grupo (ver Fig. 9).

Se le proporcionó al estudiantado el código de Arduino necesario para realizar la comunicación Morse: se teclea un texto en la consola de Arduino y se convierte en los conocidos símbolos ”.” y ”-” de Morse como pulsos de luz cortos o largos. En el lado del receptor, en la misma consola del entorno Arduino se mostraban los mensajes recibidos. Cada montaje funciona como transmisor y receptor (aunque no simultáneamente, solo podía recibir mensajes mientras no estuviese emitiendo uno). Aunque el alumnado disponía del código completo, debía realizar algunos cambios en dicho código:

- Como en el caso del Optotheremin, la fotorresistencia debía calibrarse para definir un umbral en el que se decidiera si se estaba recibiendo un valor alto o un valor bajo.
- En el código de partida se usó inicialmente una temporización lenta que permitía diferenciar visualmente un pulso de luz largo de uno corto, llevando al sistema a una escritura de pocos caracteres por segundo. Como variación, se le propuso a los grupos que modificasen el parámetro temporal que controlaba la duración del pulso, llegando a comunicaciones más rápidas en las que solo podía observarse cómo la luz parpadeaba muy rápidamente, obteniendo en recepción una alta velocidad de llegada de datos.
- Como punto final de la práctica, se le propuso a cada grupo que cambiase el parámetro del código que definía la duración del pulso corto y largo, haciendo imposible para el otro grupo la recepción de los mensajes. Esto se hizo para plantear una actividad consistente en ”pinchar” unas comunicaciones secretas: haciendo uso de un osciloscopio se monitorizaba la señal obtenida en la fotorresistencia del receptor, permitiendo medir la duración de dichos pulsos, actualizar ese parámetro en recepción y descifrar los mensajes.

VI. Conclusiones

El presente proyecto se plantea como el desarrollo global de un sencillo sistema electrónico sonoro y otro de telecomunicaciones, lo que supone un gran reto para los estudiantes de nuevo ingreso que no cuentan con conceptos de electrónica o de programación. El objetivo primordial es presentar los principales bloques que conforman un sistema de este tipo para experimentar con cada uno de ellos.

Para estimular el interés y el deseo de investigar de los estudiantes, se les ha descrito un instrumento musical especial como es el theremin y se les ha planteado la cuestión de cómo efectuar un diseño del mismo de manera simple, económica y flexible. El objetivo de este planteamiento es identificar las bases de formación necesarias para llevar a cabo el proyecto pero no con una exposición clásica, sino experimentando con los variados conceptos involucrados en el diseño guiado propuesto. En esta propuesta se han de manejar los mundos analógico y digital para interaccionar con la realidad que debe ser sensada y realizar un procesado digital que permita reaccionar activando las salidas necesarias. A tal efecto se les han presentado elementos como sensores (fotorresistencia), microcontroladores (Arduino) y actuadores (altavoz).

Una vez familiarizados con estos aspectos, se presentó un sistema ejemplo como es un emisor/receptor de mensajes basado en pulsos de luz y en la codificación Morse. Con esta descripción se trata de demostrar que las bases conceptuales son las mismas en ambos sistemas, aunque el desarrollo del segundo sistema sea mucho más complejo.

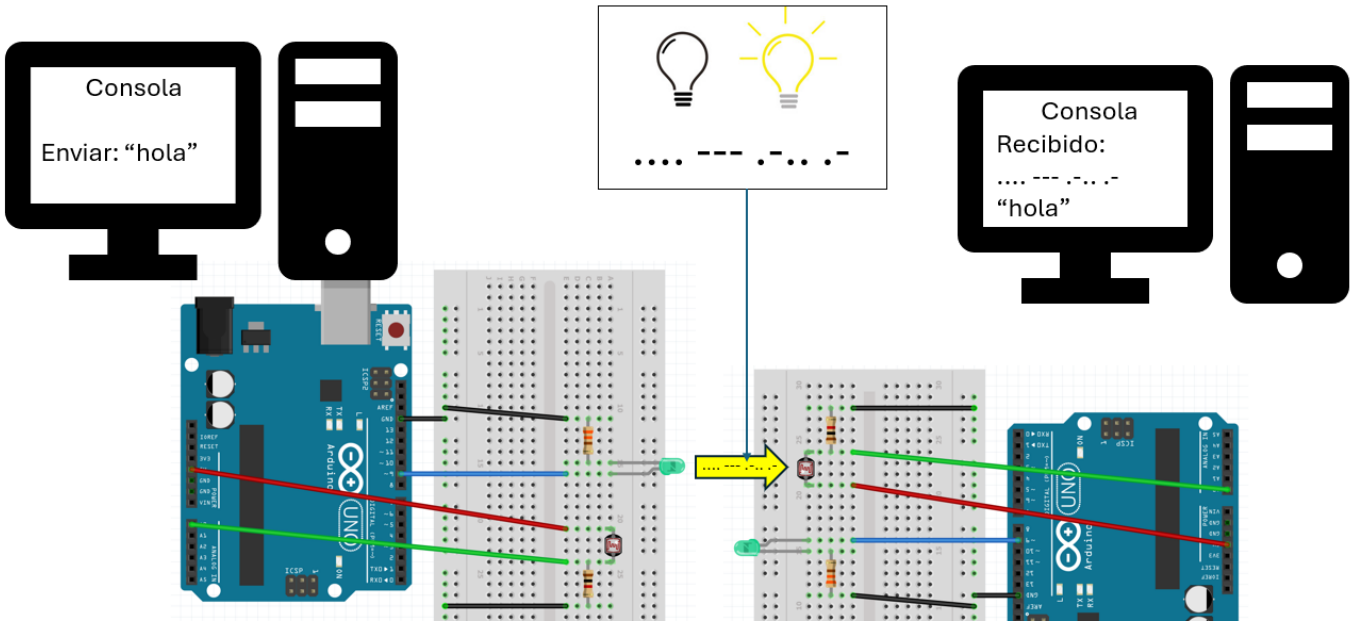


Fig. 9. Sistema de comunicación basado en pulsos de luz y el código Morse

La experiencia en general ha sido satisfactoria, pero hemos encontrado algunas barreras que se deben abordar con especial cuidado. Algunos conceptos, a pesar de ser básicos, han resultado muy complejos para el alumnado, al ser la primera vez que se enfrentan a ellos. Entre estos conceptos, nos gustaría destacar los siguientes

- Conceptos relacionados con el análisis de circuitos necesarios para entender el divisor de tensión
- Conexionado de la protoboard
- Conversión analógico-digital
- Conceptos de frecuencia (tono) y periodo
- Concepto de variable en programación

Creemos que estos conceptos deben ser abordados con cuidado, asumiendo que su comprensión no va a ser plena, pero sin renunciar a exponer al alumnado a ellos de una forma lo menos traumática posible, para no generar una actitud negativa hacia posteriores aprendizajes.

Para conocer el impacto del proyecto en los estudiantes se efectuó una encuesta cualitativa preguntando los puntos positivos y negativos de esta práctica. Los resultados fueron muy satisfactorios, los estudiantes reportaron mayoritariamente que habían disfrutado haciendo la práctica y que habían aprendido conceptos interesantes.

No obstante, para tener una visión más global del impacto de esta experiencia será necesario un estudio longitudinal que evalúe si a largo plazo estas actividades contribuyeron o no a mejorar la comprensión de los conceptos de electrónica que aparecerán más adelante, mejorando los resultados académicos y reduciendo el abandono, tal y como era el propósito con el que se diseñaron.

VII. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad de Málaga por financiar este trabajo y a los profesores Juan Antonio Rodríguez Fernández y Manuel Fernández Carmona por su colaboración en el desarrollo de las prácticas.

References

[1] GTupac-Yupanqui M., Vidal-Silva C., Pavesi-Farriol L., Sanchez Ortiz A., Cardenas-Cobo J., Pereira F., “Exploiting Arduino Features to Develop Programming Competencies” IEEE Access, vol. 10, pp. 20602 - 20615, 2022.

[2] Whalen R., Hertz J.L., “What to Teach First, Hardware or Software? Improving Success in Introductory Programming Courses”, Proc. ASEE Annual Conference and Exposition, Baltimore,USA, 2023

[3] Fundación Telefónica. Theremin, “Exposición del Theremin”, [Online]. Available: https://espacio.fundaciontelefonica.com/evento/theremin-el-instrumento-intocable/, Marzo 2024

[4] Arduino, “Arduino documentation”, [Online]. Available: https://docs.arduino.cc/, Marzo 2024

Kits de introducción a la robótica a través de competiciones de robots

Julio Pastor-Mendoza
Departamento de Electrónica
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares (Madrid), Spain
ORCID: 0000-0003-0032-4446

Ángel Llamazares Llamazares
Departamento de Electrónica
Unversidad de Alcalá
Alcalá de Henares (Spain)
ORCID: 0000-0001-8273-5163

Pedro Gil-Jiménez
Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares (Madrid), Spain
ORCID: 0000-0002-6991-0702

Pedro Alfonso Revenga de Toro
Departamento de Electrónica
Unversidad de Alcalá
Alcalá de Henares (Spain)
ORCID: 0000-0003-2550-5972

Enrique Santiso Gómez
Departamento de Electrónica
Unversidad de Alcalá
Alcalá de Henares (Spain)
ORCID: 0000-0002-5201-7133

Ángel Javier Álvarez Miguel
Departamento de Ciencias de la Comunicación
Unversidad de Alcalá
Alcalá de Henares (Madrid), Spain
ORCID: 0000-0003-0260-3940

Ana Jiménez Martín
Departamento de Electrónica
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares (Madrid), Spain
ORCID: 0000-0003-0713-0054

Noelia Hernández Parra
Departamento de Automática
Unversidad de Alcalá
Alcalá de Henares (Madrid), Spain
ORCID: 0000-0002-6644-9498

***Abstract*— Se presentan tres plataformas robóticas diseñadas para que sirvan como punto de entrada a la robótica móvil. Una plataforma (Alcabot Electrical) está orientada para estudiantes de enseñanza primaria o primeros cursos de secundaria con un robot telecontrolado por elementos electromecánicos, sin microprocesador. Una segunda plataforma (TuBot) basada en Arduino está orientada a servir como punto de entrada en secundaria con ciertas limitaciones de funcionalidad. La tercera plataforma (Alcabot Starting) es también basada en Arduino pero con unos componentes que la hacen muy polivalente, con muchas posibilidades de ampliación y orientada a enseñanza secundaria, bachillerato o incluso como punto de entrada para universitarios. Las tres plataformas están diseñadas con componentes fáciles de conseguir por internet, de bajo coste y con documentación de apoyo online tanto hardware como software. Las tres plataformas se han utilizado con estudiantes y en cursos de formación de profesores con muy buena aceptación. Las plataformas Alcabot Electrical y Alcabot Starting se han diseñado como punto de entrada para las competiciones Eurobot y Eurobot Junior para introducir a los niños y jóvenes en la robótica y que luego las modifiquen, complementen o utilicen sus componentes en diseños propios adaptados al problema de la competición.**

Keywords*— *Robótica educativa, kit de robótica, STEM, formación profesores

INTRODUCCIÓN

La integración cada vez mayor de la tecnología en la sociedad y la necesidad de tener buenos tecnólogos en el futuro está potenciando la incorporación de la tecnología en las aulas de secundaria y últimamente de primaria.

Sin embargo, la enseñanza de la tecnología puede ser bastante ardua o muy divertida y motivante dependiendo del enfoque que den los profesores.

Las nuevas reformas educativa fomentan la introducción de la tecnología en la enseñanza primaria y secundaria mediante el desarrollo de competencias STEM (Science – Technology – Engeneering – Maths) donde el objetivo es ver la tecnología aplicada a un proyecto que resuelva un problema de forma creativa (ingeniería) donde haya que tener en cuenta las bases científicas del problema y utilizar las matemáticas para dar consistencia a los cálculos y resultados.

Pero para poder aplicar la tecnología, primero hay que conocerla, y la robótica es una herramienta muy útil para ello debido a su multidisciplinariedad pudiendo trabajar contenidos de mecánica (Diseño 3D, materiales, herramientas de fabricación), electrónica (sensores, electrónica analógica, microprocesadores, electrónica de potencia), motores, sistemas de almacenamiento de energía (baterías) y programación.

La robótica educativa es una forma muy interesante de enseñar tecnología y de fomentar vocaciones tecnológicas debido a su multidisciplinariedad y al hecho de que la robótica tiene una componente motivacional importante. Construir un robot y programarlo para que haga algo pueda ser similar a dar vida a una máquina.

Existen muchos robots comerciales ya diseñados donde se puede trabajar la programación. También existen kits de robótica donde se trabaja la construcción mecánica. En este artículo se presentan tres kits de robótica diseñados para que se pueden utilizar en clase construyéndolos o ya construidos con el objetivo de que sirvan de iniciación a la tecnología para luego aplicar esa tecnología en un proyecto de ingeniería.

Los kits se han utilizado en cursos de formación el profesorado con muy buena respuesta por parte de los docentes. [1]

PLATAFORMA TUBOT

A. *Objetivos*

El objetivo de la plataforma TuBot (Fig. 1) fue proporcionar a los centros educativos que comenzaban a introducirse en la robótica educativa un recurso completo y económico que sirviera para trabajar en el aula.

Las principales características que orientaron el diseño fueron:

- Simplicidad

- Uso de hardware abierto
- Coste reducido
- Flexibilidad a la hora de conectar dispositivos.

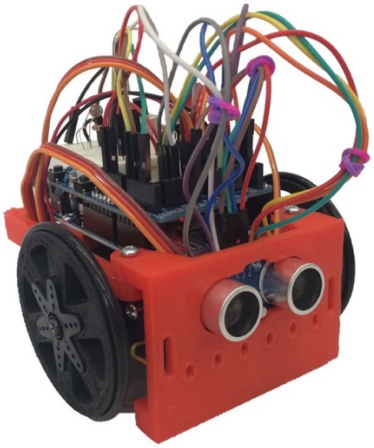


Fig. 1. Robot TuBot.

B. *Descripción hardware*

A continuación se presentan los diferentes elementos:

1) Estructura mecánica

La estructura mecánica está diseñada íntegramente para ser impresa en 3D, en tres piezas (Fig. 2): el soporte principal, las ruedas y el soporte de los sensores. Para aumentar la tracción de las ruedas con el suelo se pone una junta tórica a modo de neumático. Como tercer punto de apoyo se utiliza una canica.

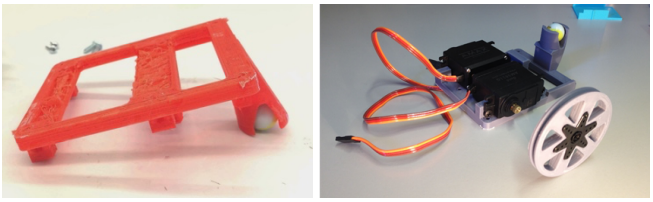


Fig. 2. Plataforma TuBot: estructura mecánica y disposición de los motores.

2) Sistema de tracción

El sistema de tracción está basado en dos servomotores de radiocontrol trucados para que tengan una rotación continua lo que permite integrar en una carcasa fácil de unir al resto del robot un motor, reductora y etapa de potencia (Fig. 2). El trucaje se realizó abriendo el servomotor, cortando un vástago situado en uno de los engranajes y sustituyendo el potenciómetro interno por dos resistencias fijas. Actualmente también se pueden conseguir servomotores ya trucados.

Desde un punto de vista software se puede controlar la velocidad de los motores con una señal de salida PWM de control de un servomotor estándar. El motor se mantiene cuando se le indica que se coloque en 90º, y aumenta la velocidad progresivamente al alejarse de esta posición.

3) Sistema sensorial

El kit incluye un sensor de ultrasonidos, dos sensores de infrarrojos reflexivos y dos LDRs junto con las resistencias necesarias para conectarlos a entradas analógicas del procesador. Con estos sensores se puede hacer un sigue líneas, un robot que evita obstáculos, un robot de sumo, un robot sigueluz, … a la vez permite estudiar la conexión de sensores resistivos con un divisor de tensión, polarización de un fotodiodo y un fototransistor, …También se incluye un LED y un pulsador.

El sensor de distancia y los sensores infrarrojos reflexivos van colocados en una pieza en la parte frontal del robot. Las resistencias de polarización de los sensores reflexivos, los LDR junto con sus resistencias, el LED y pulsador, pueden ir conectados a una protoboard situada en la parte superior del robot o soldados en la tarjeta *ProtoShield* (Fig. 3).

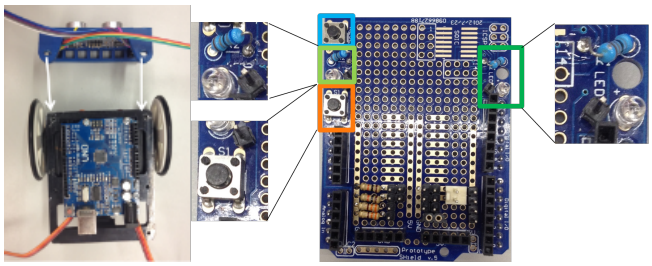


Fig. 3. Plataforma TuBot: colocación de los sensores y opción soldada de componentes asociados.

4) Sistema de control

El robot está diseñado para utilizar un Arduino UNO con una tarjeta *ProtoShield* donde se realizan las conexiones. Esta tarjeta proporciona, además de una pequeña *protoboard*, varios pines de 5V y GND, espacio para soldar un pulsador y un LED si se desea y otros componentes discretos.

Si bien puede parecer mucha complicación de cables cuando está todo montado, tiene como ventaja que los estudiantes son los que van haciendo las conexiones y probándolas lo que es bastante didáctico. Eligiendo los cables de colores bien identificados (siempre rojo y negro para 5V y GND) y otros colores específicos para las señales, no es complicado seguir los cables y, si algún cable se suelta, es una buena oportunidad para poner en práctica la capacidad de resolución de problemas.

5) Sistema de alimentación

El robot funciona con dos tipos de pilas. Una de 9V dedicada exclusivamente para alimentar el Arduino UNO y otra formada por 4 pilas AAA para alimentar los motores (Fig. 4). El uso de dos alimentaciones diferentes es necesario para evitar que picos de corriente de los motores provoquen la inicialización del microcontrolador. De esta manera se aumenta mucho el tiempo de funcionamiento incluso con baterías de los motores un poco desgastadas el robot sigue funcionando sin problemas.

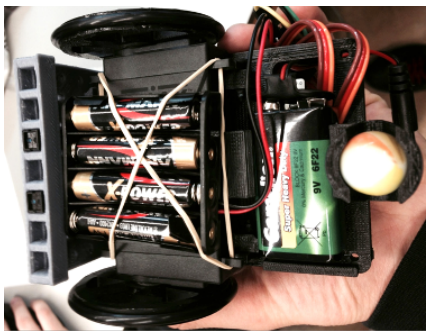


Fig. 4. Plataforma TuBot: sistema de alimentación

C. *Software*

Hay desarrolladas funciones de lectura de sensores y control de motores que permiten trabajar directamente en el comportamiento del robot. Hay funciones para trabajar directamente en Arduino C o con programación en bloques.

D. *Experiencias de uso*

El kit se diseñó originalmente para el Proyecto TuBot donde un chico y una chica por instituto participaban en un taller de robótica y posteriormente en una competición entre centros. En el proyecto participaron más de 200 estudiantes en diferentes ediciones. También se utilizó ya montado en minitalleres de 2 horas de duración donde el trabajo se centraba exclusivamente en la programación del comportamiento de un robot de Sumo (Fig. 5). En el taller de sumo participaron cerca de 3300 estudiantes.

Fig. 5. Imágenes del proyecto TuBot y minitalleres de Sumo

PLATAFORMA ALCABOT STARTING

La plataforma Alcabot Starting (Fig. 6) fue diseñada para que sirviera de punto de entrada para desarrollar un robot para participar en las competiciones de robótica Eurobot y Eurobot Junior[2] y que permitiera trabajar los conceptos básicos principales de robótica y otros más avanzados como es el control en lazo cerrado y el posicionamiento por odometría.

Fig. 6. Plataforma Alcabot Starting

A. *Objetivos*

Las principales características que orientaron el diseño fueron:

- Simplicidad
- Uso de hardware abierto
- Coste reducido
- Flexibilidad a la hora de conectar dispositivos.
- Robustez
- Posibilidades de ampliación
- Uso de manipuladores
- Uso de motores con encoders que permita implementar control en lazo cerrado de velocidad y posicionamiento por odometría.
- Comportamiento ágil
- Baterías recargables de larga duración

B. *Descripción hardware*

A continuación se presentan los diferentes elementos que la componen:

1) *Estructura mecánica*

La base de la estructura mecánica es una plancha de aluminio de 1mm que podría sustituirse por una lámina de PVC, madera u otro material similar. Es el único componente que no se puede adquirir fácilmente por internet al estar personalizado para el robot pero los planos acotados están disponibles en internet y pueden utilizarse como base para replicar la estructura. Además, el diseño general del robot se realizó en 3 dimensiones con el software Fusion 360 cuyos ficheros también están disponibles por internet.

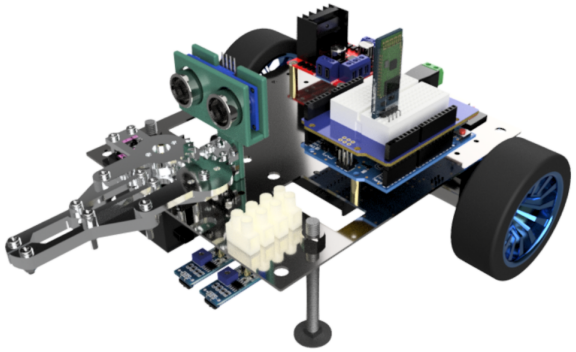


Fig. 7. Plataforma Alcabot Starting: estructura diseñada con Fusion 360

En la base se han dispuesto los tornillos de sujeción de los motores, de las tarjetas de control, y de un servomotor que controla una pinza y las baterías y dispone de varios orificios diseñados para pasar los cables de los motores, encoders, sensores y alimentación de la parte inferior a la superior.

2) *Sistema de tracción*

El sistema de tracción está formado por dos motores de corriente continua JGA25-370 de 25mm de diámetro, un eje de 4mm, con reductora y encoder integrado y con potencia suficiente para mover la estructura con agilidad. Este motor es económico, fácil de conseguir por internet con diferentes relaciones de reducción y se puede encontrar con unos soportes en L para sujetar fácilmente los motores a la estructura y con ruedas.

Fig. 8. Plataforma Alcabot Starting: motores JGA25-370. (Imagen obtenida de https://es.aliexpress.com/item/1005001279982165.html)

En la TABLE I. pueden verse las características de los motores utilizados en la plataforma.

TABLE I. PLATAFORMA ALCABOT STARTING: DATOS DE LOS MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA JGA25-370

Reduction ratio	Rated Volt	No Load		AT Load			STALL		Gearbox
		SPEED	CURRENT	Torque	SPEED	Current	TOGQCE	CURRENT	Length
	V	RPM	mA	KG.cm	RPM	A	KG..CM	A	mm
35	6	170	100	0.8	130	0.45	2.8	1.8	21

Los motores llevan incorporados en el eje unos encoder diferenciales de efecto hall con salida en cuadratura que proporcionan 11 pulsos por vuelta del eje del motor que, teniendo en cuenta la reductora de 35:1 proporcionan 358 pulsos por vuelta de las ruedas.

Una de las dos líneas de datos de cada encoder, debe ir conectada a una entrada de interrupción del microcontrolador para facilitar el contaje de pulsos.

La etapa de potencia elegida en la plataforma Alcabot Starting está basada en el doble puente en H L298 [3]. Si bien no es la más eficiente desde el punto de vista de la disipación de potencia ya que está basada en transistores bipolares, es muy económica, cumple con los requerimientos de corriente y las tarjetas basadas en el L298 comerciales [4] disponen de un regulador de tensión a 5V que es muy útil para alimentar otros dispositivos.

La etapa de potencia asociada a cada motor puede controlarse con tres señales (Enable, CanalA y CanalB) que proporcionan la posibilidad de varios modos de control de la velocidad y el sentido (Fig. 9).

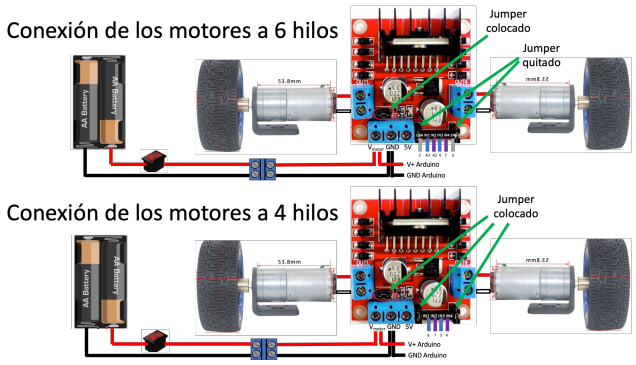


Fig. 9. Plataforma Alcabot Starting: opciones de conexión del puente en H a 4 o 6 hilos.

3) *Sistema sensorial*

El kit dispone de un sensor de distancia por ultrasonidos basado en el SR04 [5], ampliamente utilizado en robótica y muy económico. El sensor mide en distancias de 2cm a 450cm con una apertura de 15º y una precisión de 3mm.

Lo sensores de ultrasonidos tienen como principal inconveniente las falsas medidas debidas a multitrayectos por reflexiones que hacen que de vez en cuando haya medidas demasiado grandes o pequeñas. Esto es muy útil para que los estudiantes comprueben la existencia de este fenómeno y lo intenten resolver por software.

El kit también dispone de sensores infrarrojos reflexivos que pueden utilizarse para seguir una línea negra en un fondo blanco (actividad muy común en robótica móvil) o detectar diferentes tonalidades del suelo. Los sensores elegidos son los TCRT5000 [6] que pueden proporcionar una señal analógica o digital. En el caso de la señal digital, es el resultado de comparación de un umbral proporcionado por un potenciómetro situado en el sensor con el valor analógico.

4) *Sistema de control*

En la primera versión se optó por utilizar como elemento de control una tarjeta Arduino UNO por la más utilizada en secundaria y a la vez más económica. Las ventajas de utilizar esta tarjeta son evidentes dada la gran comunidad de usuarios que la utilizan. La estructura también es compatible con la tarjeta Arduino Mega, muy útil cuando se necesitan más entradas y salidas.

Para realizar la conexión de los sensores y de los elementos de comunicaciones de forma sencilla, se utiliza una tarjeta expansora *ProtoShield* [7] lo cual proporciona mucha versatilidad a la hora de realizar las conexiones.

5) *Elementos de comunicación*

Disponer de elementos de comunicación inalámbrica con el exterior es muy interesante para poder monitorizar el comportamiento del sistema y para telecontrolarlo en caso de que sea necesario. Se ha optado por utilizar un módulo HC-06 [8] que proporciona comunicación serie asíncrona sobre Bluetooth. De nuevo su elección ha sido fundamentalmente por motivos económicos.

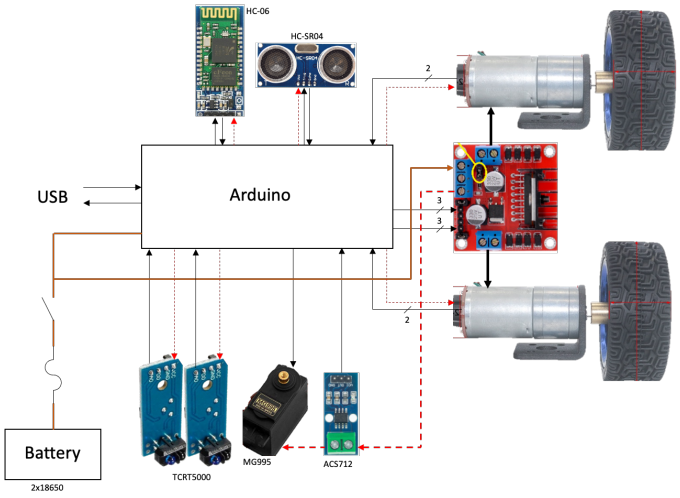


Fig. 10. Plataforma Alcabot Starting: diagrama de bloques general

Otras opciones podrían haber sido utilizar un módulo WiFi ESP8266 o utilizar una tarjeta expansora USB Host [9] con la librería correspondiente de Arduino a la que se puede conectar un transceptor Bluetooth y disponer así de posibilidades de recibir instrucciones de mandos de juego como la PS3, PS4, ...

6) *Sistema de alimentación*

El robot utiliza dos baterías recargables de Litio de 3,7V de formato 18650 que proporcionan una tensión de 7,2V que alimenta tanto la tarjeta de Arduino UNO como el puente en H a través de un interruptor y de un fusible. Además de las baterías se incluye en el kit un cargador.

Debido a las tensiones de saturación de los transistores unipolares del L298, la tensión que le llega a los motores es igual o inferior de la tensión nominal de 6V.

La duración de las baterías a pleno funcionamiento del robot es más que suficiente para realizar pruebas durante una clase o durante una competición.

C. *Software*

Hay desarrolladas funciones de lectura de sensores y control de motores que permiten trabajar directamente en el comportamiento del robot desarrolladas en el lenguaje C de Arduino.

D. *Experiencias de uso*

El kit se ha utilizado en tres cursos de formación de profesorado de enseñanza secundaria con muy buena aceptación por parte de los participantes: dos cursos organizados por la Universidad de Alcalá para profesores y líderes de equipo participantes en Eurobot Spain y un curso de formación de profesorado organizado por el Centro Regional de Formación de Profesorado de Guadalajara (valoración final de los participantes: 4,67 sobre 5). También se ha utilizado por varios equipos en la competición de Eurobot Junior como base de los robots a los que han añadido modificaciones en la estructura, y elementos de hardware adicionales además de la programación. Dos de esos equipos se clasificaron para la final de Eurobot Junior 2022 y 2023 en representación de España) (Fig. 11)

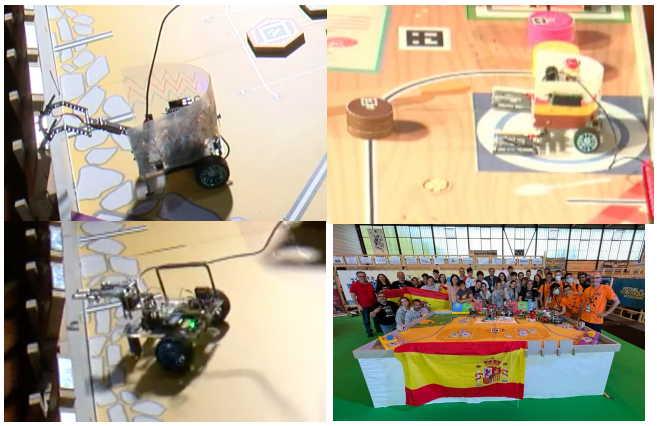


Fig. 11. Robots participantes en Eurobot Junior 2022 y 2023 basados en la plataforma Alcabot Starting

E. *Futuras versiones y posibilidades de ampliación*

Se está trabajando en adaptar el kit para ser utilizado con otras plataformas hardware como la tarjeta micro:bit [10] muy utilizada en enseñanza primaria que, además de un procesador muy potente, y diferentes lenguajes de programación, lleva incorporado un sistema de comunicación por radio como Bluetooth LE y un sistema de banda estrecha de 2,4GHz.

También se puede complementar con un segundo piso que incluya un procesador más potente como una RaspBerry Pi [11] a la que se incorpore ROS [12] y que sirva de entorno de prueba para robots autónomos más evolucionados donde las decisiones de alto nivel se realicen en la RaspBerry Pi y el control de bajo nivel se lleve a cabo en la Arduino.

PLATAFORMA ALCABOT ELECTRICAL

La plataforma Alcabot Electrical consta de una base robótica motorizada controlada por un mando sin elementos electrónicos conectado a la base por cable (Fig. 12).

A. *Objetivos*

Esta plataforma robótica está diseñada para ser utilizada en enseñanza primaria como una aplicación de los circuitos eléctricos a la construcción de un robot o como iniciación a la robótica y a la automatización en enseñanza secundaria.

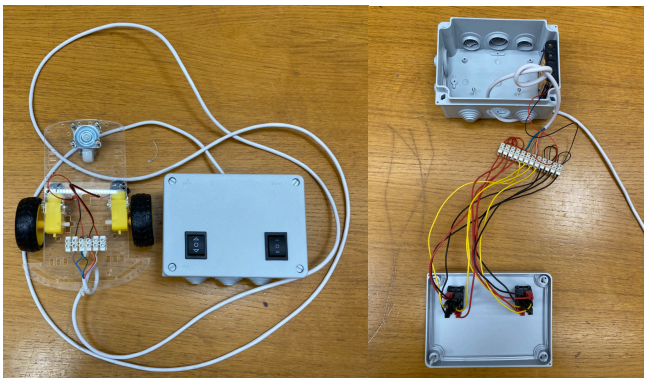


Fig. 12. Plataforma Alcabot Electrical.

Las principales características que orientaron el diseño fueron:

- Simplicidad
- Uso exclusivo de elementos electromecánicos sin programación.
- Coste reducido
- Posibilidad de ampliación.

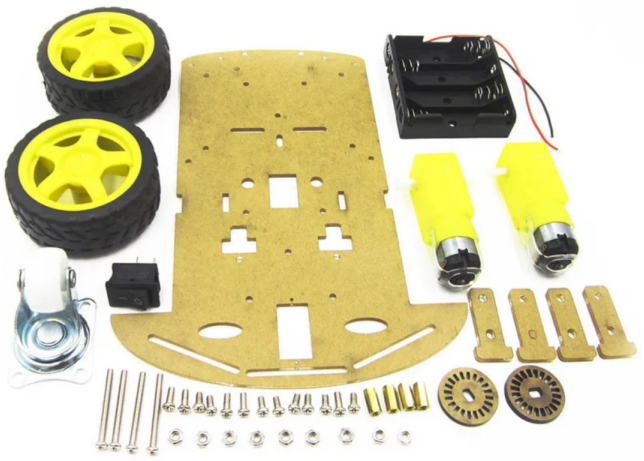


Fig. 13. Plataforma Alcabot Electrical: ejemplo de kit DiY 2WD de base (imagen de: https://es.aliexpress.com/item/4001021570912.html)

B. *Descripción hardware*

A continuación se presentan los diferentes elementos:

1) *Estructura mecánica y sistema de tracción*

Como estructura mecánica se puede utilizar cualquier plataforma con dos motores de corriente continua. Se ha elegido la que actualmente es la más económica y fácil de conseguir por internet que incluye la base de metacrilato, dos motores con reductora y ruedas, una rueda loca y un soporte de pilas (Fig. 13).

2) *Sistema de control*

El mando de telecontrol está formado por una caja conexiones eléctricas de 153x110 mm con dos conmutadores DPDT basculantes con punto neutro RB24KC1100 de E-switch [13], unas clemas y cables con conectores de tipo Fastos Hembra para conectar a los conmutadores siguiendo el esquema de la figura (Fig. 14). El circuito simula un doble puente en H actuado con los conmutadores de manera que

cada conmutador controla el movimiento de un motor hacia delante, hacia atrás o parado.

La conexión entre el sistema de control y los motores se realiza con un cable con al menos cuatro hilos, dos por cada motor pero es conveniente dejar libres más hilos por si se quieren colocar en el robot más actuadores en una futura ampliación. Un cable de red de 8 pares es una solución bastante interesante por ser fácil de encontrar y ser económico, aunque se utilicen menos hilos.

Las baterías (cuatro pilas AA) van situadas en el mando de control para reducir las pérdidas por el cable y el peso del robot.

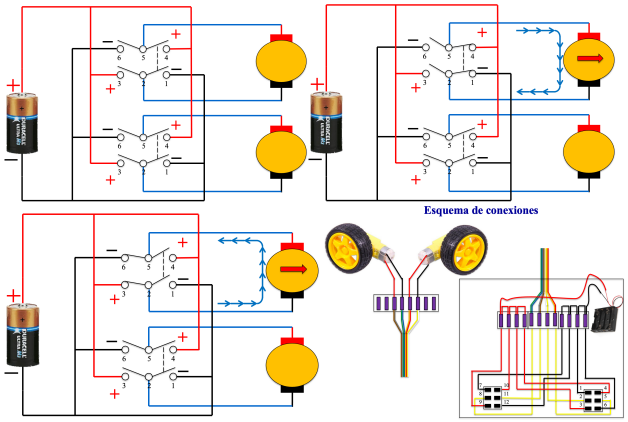


Fig. 14. Plataforma Alcabot Electrica: esquemas de funcionamiento de los conmutarores y esquema de conexiones.

C. *Experiencias de uso*

El kit se ha utilizado en un curso de formación de profesores de primaria y secundaria organizado por un Centroo de Formación de Profesorado de la Comunidad de Madrid con muy buena aceptación por parte de los participantes (valoración de 4.4 sobre 5). El curso finalizó con una competición entre los participantes siguiendo las normativas de Eurobot Junior 2023 (Fig. 15) donde, tomando como base la plataforma, realizaron mejoras mecánicas para obtener mejor puntuación. También se ha utilizado en una actividad dentro de la Noche de los Investigadores 2023 con 30 niños y jóvenes menores de 14 años donde tenían que finalizar las conexiones del robot y participar en una prueba de mover objetos, y en una actividad lúdica en la que participaron 120 niños de entre 8 y 10 años jugando partidos de furbol con las plataformas robóticas (Fig. 16).

Es una base muy económica, fácil de montar y de manejar que puede servir como base de tracción para construir sobre ella otros sistemas que adapten el robot a realizar otras tareas.

Disponibilidad de la Documentación

La documentación hardware y software de las plataformas están disponibles en la página web de Alcabot (https://alcabot.web.uah.es/formacion-y-divulgacion/).

Agradecimientos

Las plataformas TuBot y Alcabot Starting han sido realizadas con la colaboración de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología - Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades dentro del programa de ayudas para el fomento de la cultura científica, tecnológica y de la innovación.

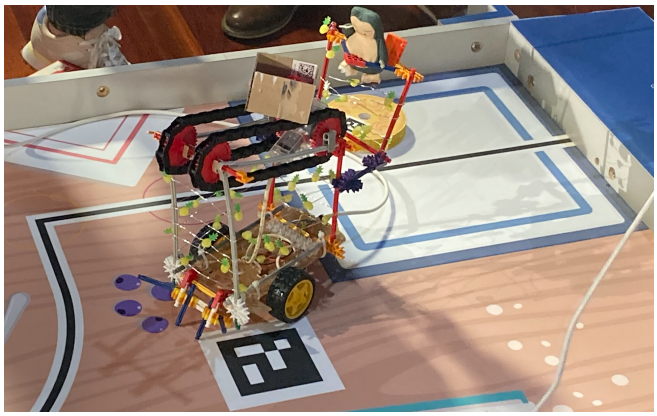


Fig. 15. Plataforma Alcabot Electrical: robots realizados según normativas de Eurobot Junior 2023

Fig. 16. Plataforma Alcabot Electrical: actividades lúdica con niños jugando un partido de fútbol y sorteando obstáculos

References

[1] J. Pastor-Mendoza et al., "Educational Project Eurobot Spain," 2022 Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (XV Technologies Applied to Electronics Teaching Conference), Teruel, Spain, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/TAEE54169.2022.9840531.

[2] Eurobot y Eurobot Junior Spain . https://www.eurobot.es

[3] STMicroelectronic L298 Dual H Brige Datasheet. https://www.st.com/resource/en/datasheet/l298.pdf

[4] Prometec (2023) El módulo controlador de motores L298N. https://www.prometec.net/l298n/

[5] MakerGuides. How to use an HC-SR04 Ultrasonic Distance Sensor with Arduino. https://www.makerguides.com/hc-sr04-arduino-tutorial/

[6] Luis Llamas. Detector de líneas con Arduino y sensor TCRT5000L https://www.luisllamas.es/arduino-detector-lineas-tcrt5000l/

[7] Arduino.cl. ProtoShield para Arduino UNO. https://arduino.cl/producto/protoshield-para-arduino-uno/

[8] Prometec (2023) Módulo HC-06. https://www.prometec.net/bt-hc06/

[9] Oleg Mazurov.(2022) USB Host Library Rev. 2.0 https://github.com/felis/USB_Host_Shield_2.0

[10] Micro:bit Educational Foundation. What is the micro:bit? https://microbit.org/get-started/what-is-the-microbit/

[11] Raspberry Pi. https://www.raspberrypi.com/

[12] The Robotics Back-End. Using ROS on Raspberry Pi: Best Practices. https://roboticsbackend.com/using-ros-on-raspberry-pi-best-practices/

[13] E-Switch. Interruptor basculante de alimentación de alta corriente de la serie RB2 https://www.e-switch.com/es/?searchform__toggles=productsearch&s=RB24KC110

Modulo Educativo para la Implementación de un Control PI basado en un Microcontrolador usando la Técnica de Control de Fase

1st Ever Cifuentes Noreña
Facultad de Ingeniería Electrónica
Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Lima, Perú
ecifuentesn@unmsm.edu.pe
Instituto Peruano de Energía Nuclear
Lima, Perú
ecifuentes@ipen.gob.pe

2nd Anibal Cotrina-Atencio
Departamento de Computacao e Eletronica
Universidade Federal do Espírito Santo
Sao Mateus, Brasil
anibal.atencio@ufes.br

***Abstract*—Las prácticas de laboratorios presenciales o convencionales son fundamentales para la formación por competencias del estudiante de ingeniería electrónica y es así que en el curso de Sistemas de Control Digital un tema importante es el desarrollo de controladores PID. La presente propuesta aborda la viabilidad del uso de módulos de desarrollo basado en microcontroladores en la enseñanza de Sistemas de Control Digital y tiene como objetivo facilitar la implementación de controladores digitales en un entorno de electrónica analógica. Para esto, es descrito y disponibilizado una plataforma de hardware con los elementos de un sistema de control digital: planta, sensor, circuitos de acondicionamiento y de sincronización; en el que la tarea del estudiante seria implementar un algoritmo de control PI basado en un microcontrolador usando la técnica de control de fase. Se espera que esta propuesta sea vista como una forma alternativa en la implementación de actividades prácticas que mejoren la experiencia adquirida por parte de los alumnos dentro y fuera del laboratorio, contribuyendo a un mejor desempeño especialmente, en la reducción del tiempo en la implementación de algoritmos de control digital.**

***Index Terms*—Laboratorio Convencional, Control PI digital, Control por ángulo de disparo, Detección de cruce por cero**

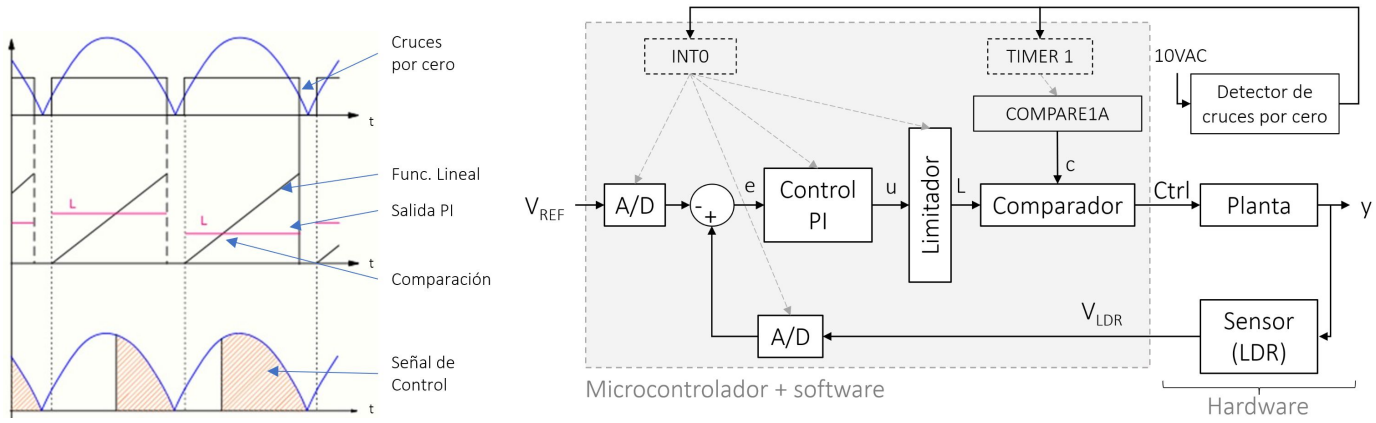
I. Introducción

El abordaje de la teoría de control para ingenieros electrónicos en universidades peruanas contempla disciplinas fundamentales la de Sistemas de Control Digital cuyas prácticas de laboratorios pueden ser realizadas con dispositivos físicos y/o módulos educacionales dentro de los ambientes de laboratorio o usando simuladores computacionales fuera de los laboratorios especializados. Actualmente, el uso de simuladores para evaluar modelos de controladores análogos y digitales viene siendo ampliamente utilizado en laboratorios de educación superior [1]. Las simulaciones tienen la potencialidad de hacer que los estudiantes tengan aprovechamiento significativo en el aprendizaje aumentando su compresión sobre fenómenos tratados [2]. Y por el hecho darle la posibilidad de utilizarlo fuera del laboratorio. Sin embargo, solo el empleo de software para complementar conocimientos teóricos puede resultar insuficiente.

Por otro lado, el uso módulos de desarrollo portátiles y de bajo costo, principalmente, los basados en la microcontroladores de Microchip y otros fabricantes, se han popularizado, no sólo en ambientes universitario, si no también en institutos tecnológicos y escuelas de nivel secundario [3]. Ellas vienen siendo utilizadas en diversas aplicaciones como el de IoT (Internet of Things) [4]. Un gran desafió del empleo de ese tipo de módulos por parte de estudiantes de pre-grado es la implementación de técnicas propias de la teoría de control, como por ejemplo el controlador PID (proporcional-integral-diferencial). Adicionalmente, es necesario incluir etapas de electrónica analógica en un proyecto completo de control realimentado.

La presente propuesta aborda la viabilidad del uso de módulos de desarrollo basado en microcontroladores en la enseñanza de Sistemas de Control Digital y tiene como objetivo la implementación de controladores digitales en un entorno de electrónica analógica. Para esto se construye una plataforma de hardware que incluye una planta con sensor y la electrónica necesaria para acondicionar la señal. La plataforma permite la conexión de un módulo de desarrollo con microcontrolador en el que serán implementados los algoritmos de control a partir de requerimientos y aplicando teoría de control digital.

La planta lo constituye un foco incandescente cuya alimentación es controlada por un trìac, y para el aislamiento se usa un optotriac. El sensor es un LDR (resistencia variable con la luz) que es acondicionado con circuitos operacionales y resistencias, y el controlador digital es realizado por un microcontrolador ATMEGA328P (tarjeta Arduino). Para la parte de programación se usa el software Bascom-AVR.



(a) (b)

Fig. 1: Control Proporcional-Integral (Control PI) usando la técnica de control de fase y con salida binaria. (a) Diagramas de tiempo con se'nal de control obtenida a partir de la salida del controlador (Salida PI); (b) Estructura del sistema de control digital; en el que el Control PI es implementado en el microcontrolador a partir de la señal del sensor (V_{LDR}), de la tensión de referencia (V_{REF}); los bloques de conversión analógico-digital están representados por "A/D".

II. Contexto

En la carrera de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos se imparte el curso de Sistemas de Control Digital en el noveno periodo. En las clases de laboratorio es posible abordar actividades prácticas del curso utilizando simuladores computacionales y módulos educativos especializados basados en sistemas con microcontroladores. También se contempla la posibilidad de proponer actividades que puedan ser realizados fuera de los ambientes de laboratorio que no se limite al uso de simuladores computacionales. En ese sentido se ha elaborado un conjunto de actividades que involucran hardware y software para la implementación de sistemas de control del tipo SISO (*single-input single-output*) que el estudiante puede conducir por cuenta propia, como el de control de temperatura por histéresis [5] o el diseño de control usando control de fase .

La Figura 1(a) muestra los diagramas de tiempo de un proyecto de diseño de control proporcional-integral (PI) haciendo uso de la técnica de control de fase y con salida binaria. La señal de un transformador (10VAC e 60Hz) cuya entrada es la tensión de linea es utilizada para obtener señales de sincronización por medio de la técnica de detección de cruces por cero; a partir de las señales de sincronización (i) se genera una función lineal, que puede ser descrita como una señal tipo rampa, y (ii) se calcula la salida del controlador PI teniendo en cuenta valores deseados y medidos de la salida de la planta; y finalmente, se genera el pulso de control después de comparar la salida del controlador y la función lineal.

Dado que los estudiantes del curso tienen conocimientos en proyecto de circuitos analógicos y digitales, se estima que la realización de esta actividad podría ser desarrollada en dos semanas; pues, la tarea principal seria implementar el algoritmo de control en un microcontrolador a partir de las señales de sincronización. Eso es resuelto rápidamente vinculando las señales de sincronización con interrupciones. Sin embargo, en actividades de este tipo, la construcción de placas electrónicas y circuitos, que formarían parte de la plataforma de control junto con el microcontrolador, demandan un tiempo considerable. En ese sentido es que la presente propuesta tiene como objetivo realizar una plataforma de hardware con ranura para conexión de un microcontrolador que sean portátiles y de bajo costo, en el que la tarea del estudiante estaría focalizada en la implementación del algoritmo de control digital sobre un microcontrolador como el que se muestra en la Figura 2.

III. Metodología

La Figura 1(b) muestra la estructura del sistema de control digital utilizando la técnica de control de fase. La parte que está sombreada corresponde a la etapa de software que se implementa sobre un microcontrolador. La etapa de hardware está compuesto por la planta, el bloque de acondicionamiento de señal del sensor (LDR), el bloque de detección de cruces por cero y el *slot* para conexión del microcontrolador.

Se ha considerado usar el microcontrolador ATMEGA328 porque es el microcontrolador que está en el Arduino Uno R3 y Arduino nano y son de bajo costo; junto con el compilador BASCOM AVR, el cual permite configurar fácilmente las interrupciones y está basado en el lenguaje Basic. El algoritmo de control digital implementado en el microcontrolador está basado en el uso de interrupciones generadas a partir de la detección de cruces por cero. La interrupción INT0 está asociada al cálculo de la salida del controlador PI. La interrupción TIMER1 está asociada a la generación de la función lineal a partir de una operación de un contador creciente y a la comparación con la salida del controlador debidamente acotada entre 0 e un valor máximo de tensión (limitador).

A continuación se describen (i) los aspectos teóricos que deben tenerse en cuenta para realizar el proyecto, (ii) los circuitos de los bloques de hardware, e (iii) los algoritmos de control que serán implementados en el microcontrolador.

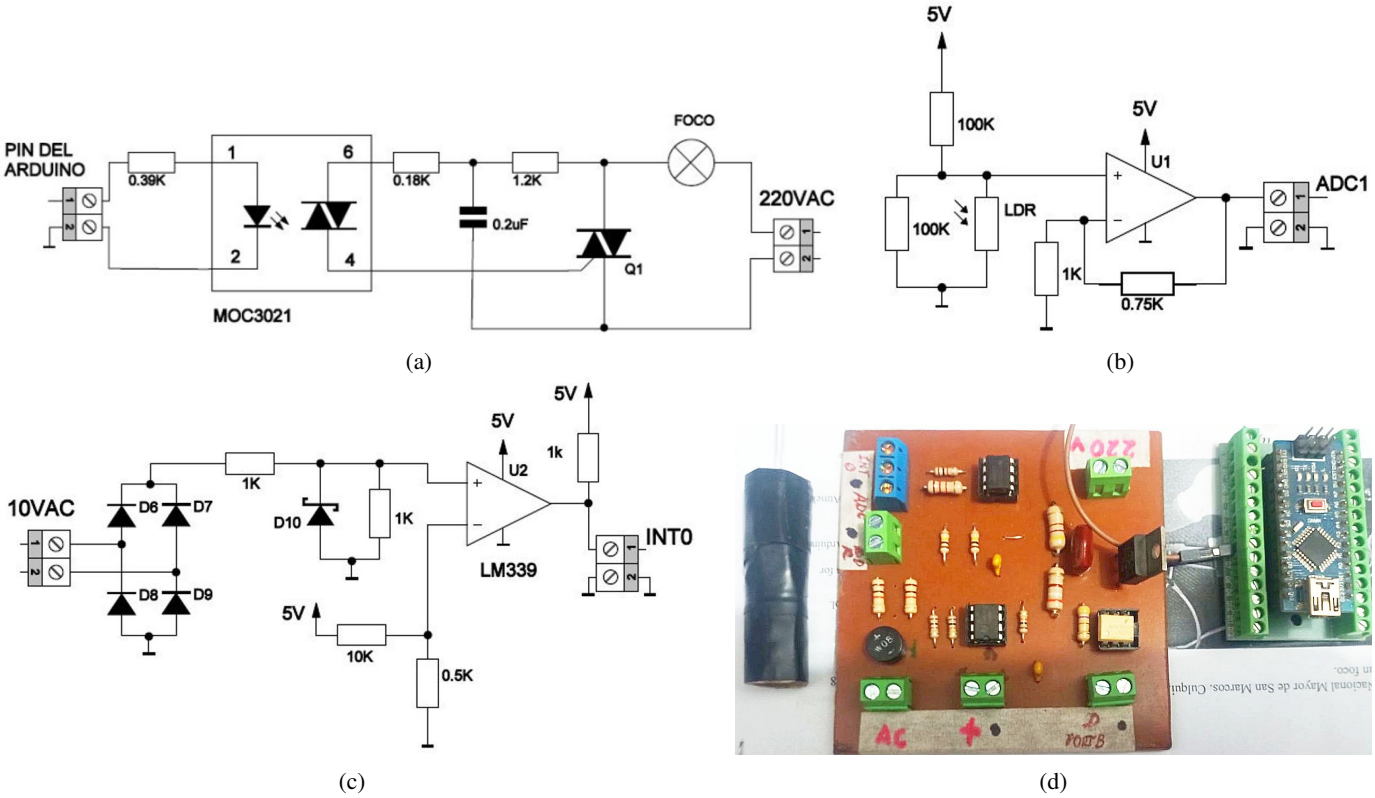


Fig. 2: Circuitos da plataforma. (a) Planta; (b) Sensor y circuito de acondicionamiento; (c) Circuito detector de cruces por cero; e (d) Plataforma de hardware com microcontrolador.

A. Aspectos Teóricos

1) Control por Fase: Es una técnica para circuitos de corriente alterna que permite controlar la potencia que se entrega a una carga. Su principio de funcionamiento se basa en la variación del instante inicial de disparo del semiconductor de potencia, que permitirá el paso de la corriente hasta el final del semi-ciclo de la red eléctrica.

2) Detección de Cruce por Cero: Identifica cuando una señal alterna cambia de polaridad y/o atraviesa el punto de referencia cero (ideal) en razón a que se configura para tener una tensión mínima de comparación (vea Figura 2(a)). La Figura 1(a) ilustra esta representación en el que son indicados los tiempos en que ocurren los cruce por ceros. La Figura 1(b) ilustra la asociación entre la detección de cruces por cero y las interrupciones del microcontrolador.

3) Controlador PI: La representación digital del algoritmo PI [6] está dada por

$$u(k) = K_P e(kT) + K_I m(kT) \tag{1}$$

en el que la parte integral que está basada en la aproximación (regla) trapezoidal y está desarrollada por la siguiente expresión;

$$m(kT) = m(kT-1) + \frac{T}{2}(e(kT) + e((k-1)T)) \tag{2}$$

Es válido afirmar que para implementar el controlador PI de forma digital requieren de dos lineas de comando, una para calcular la integral $m(k)$ del error $e(k)$ [6], y otra para determinar la señal de control $u(k)$, usando las constantes proporcional K_P e integral K_I [6]. Adicionalmente, es considerado una etapa de saturación (rotulada como Limitador en la Figura 1(b)) para limitar el rango de salida del controlador entre 0 y 5V. Para la presente propuesta el valor máximo fue configurado como 4.375V a fin de no saturar el amplificador operacional (vea la Figura 2(c)). Toda esta rutina es implementada en el tiempo del cruce por cero,

B. Hardware

1) Planta: La planta está constituida por una fuente de iluminación incandescente (foco) cuya alimentación es controlada por un triac y una etapa de aislamiento usando un optotriac (MOC3021). Como se muestra en la Figura 2(a), la entrada de la planta son pulsos de control (Figura 1(a)) provenientes del microcontrolador (pin del Arduino) y que son resultado del algoritmo de control.

2) Sensor: El sensor utilizado es una resistencia variable con la luz (LDR) y cuya señal es acondicionada por un circuito de división de tensión y amplificador operacional, como mostrado en la 2(b). La salida del circuito es conectada con la entrada ADC1 del microcontrolador.

3) Circuito de Detección de Cruce por Cero: El circuito detector de cruces por cero mostrado en la Figura 2(c) tiene como entrada una señal de 10VAC que a su ver recibe la señal de linea (220v - 60Hz). Después de rectificar la señal

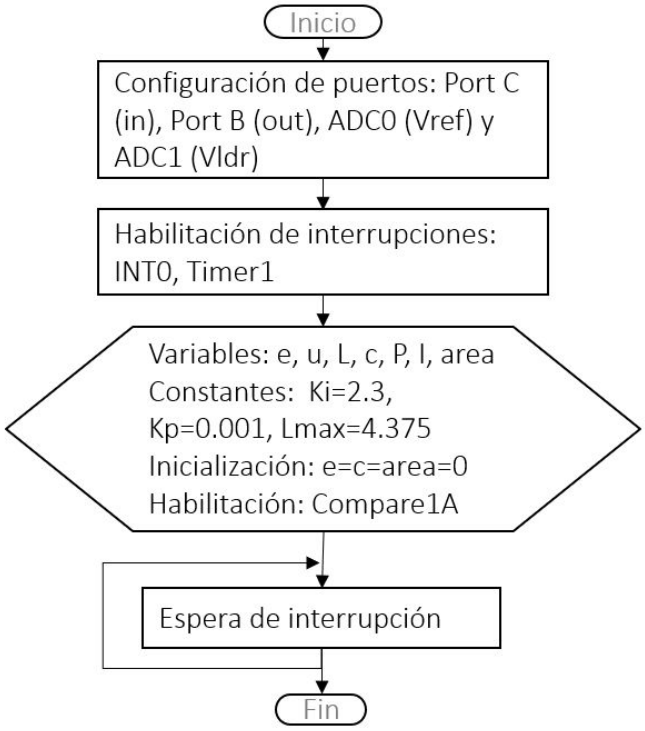


Fig. 3: Programa principal.

Algorithm 1 Interrupción INT0

if INT0 $= 1$ **then** ▷ Detector de nivel bajo
  $e(k) \leftarrow V_{ref} - V_{ldr}$ ▷ Error
  $m(k) \leftarrow m(k-1) + \frac{T}{2}(e(k) + e(k-1))$ ▷ Área
  $u(k) \leftarrow K_P e(kT) + K_I m(kT)$ ▷ Control PI
  if $u < L_{max}$ **then** ▷ Limitador
    $L \leftarrow u$;
  else
    $L \leftarrow L_{max}$;
  end if
  $e(k-1) \leftarrow e(k)$ ▷ Actualización de e
  $m(k-1) \leftarrow m(k)$ ▷ Actualización de m
end if

Algorithm 2 Interrupción Timer1

if Timer1 $=$ COMPARE1A **then**
  $c = c + 28$
  if $c > L$ **then**
    Control $\leftarrow 1$
  else
    Control $\leftarrow 0$;
  end if
end if

del transformador, esta es limitada a 3.6V por un diodo zener y es comparada con un valor de tensión de 0.45V utilizando un CI LM339. Finalmente, la salida del comparador es conectada a la entrada INT0 del microcontrolador (vea Figura 1(b)).

4) Hardware del módulo desarrollado: La Figura 2(d) muestra la plataforma de hardware implementada, que incluye con los circuitos de detección de cruce por cero, la planta y el sensor.

C. Software

El detector del cruce por cero. Se adapta para la aplicación de la interrupción externa INT0 y el cálculo del control PI. La creación de la rampa y su evaluación con la salida del control PI. La programación del microcontrolador se realizará mediante el uso del compilador BASCOM AVR de la empresa MCS Electronics.

1) Main Program: En el programa principal se realiza la definición del microcontrolador y del cristal, la definición de variables, constantes y asignación de sus valores, como se muestra en la Figura 3. También se realiza la configuración de los puertos de entrada y salida, la configuración del ADC e inicio de funcionamiento. De igual forma se efectúa la configuración de las interrupciones del Timer1 y INT0, y la habilitación de las interrupciones terminando en un bucle infinito vacío.

2) PI computing and Limiter: Aquí se realiza la obtención de la referencia y de la realimentación (Vref y Vreal), se halla el error (e), el valor proporcional (P) y el valor de la integral (I). También se calcula la salida del controlador PI y se emplea un limitador tensión (vea el algoritmo 1).

3) Comparator: Esta parte realiza la comparación de la salida del controlador, después de pasar por el limitador,con el valor de la rampa dada por el contador c. Se ve con el osciloscopio el tiempo del no cruce por cero (tnpc) es de aproximadamente 7.3 ms. Este tiempo tnpc se divide entre 32 partes para la realización de la interrupción COMPARE1A (cada 228 us). Incrementándose el equivalente binario de la tensión máxima dividido por 32 y que debido a la limitación en 4.375V es igual a 28 (vea el algoritmo 2).

IV. Resultados

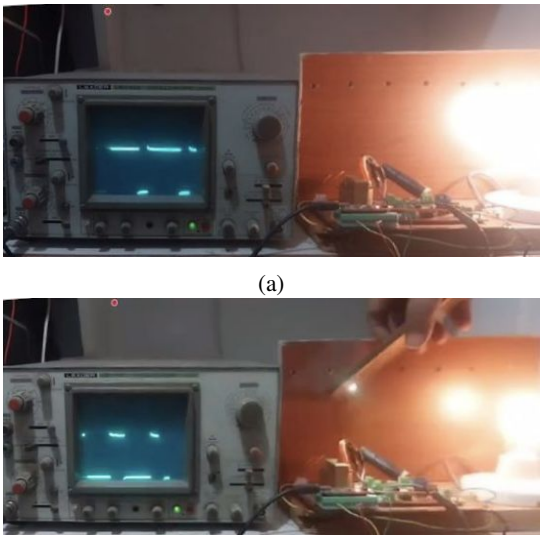
A continuación se muestran los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas con la plataforma. También se brinda informaciones sobre la realización de este experimento por parte de los estudiantes.

A. Pruebas de funcionamiento

Los resultados que se presenta muestran el comportamiento del sistema cuando existe un aumento y una disminución de luz. En ambos casos, primero se establece un estado estacionario adecuado para tener una buena visualización en el osciloscopio por el efecto de la variación de la intensidad de luz en el sensor. El punto de evaluación es el pin de salida del Arduino.

La Figura 4 muestra el funcionamiento de la plataforma cuando se aumenta el nivel de luz que incide sobre el sensor por medio de la interna de un teléfono celular. La Figura 4(a) corresponde al momento en estado estacionario; mientras que la Figura 4(b) corresponde al momento cuando se acerca la luz del celular. Conforme a lo previsto, el ancho del pulso de control es mayor en el primer caso.

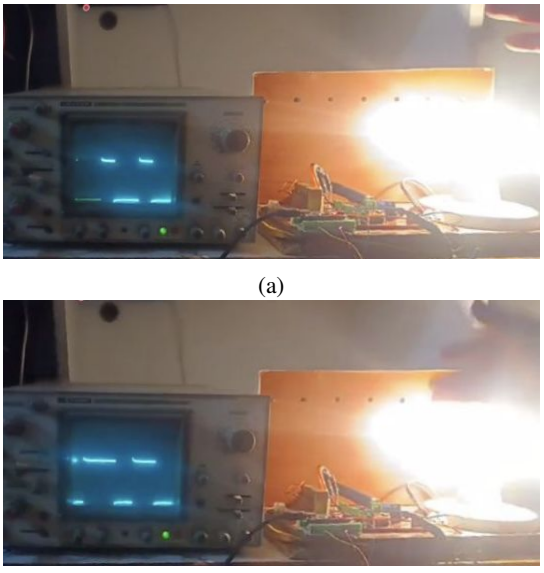
Por otro lado, la Figura 5 muestra el funcionamiento de la plataforma cuando se disminuye el nivel de luz que incide sobre el sensor por medio de un obstáculo. La Figura 5(a) corresponde al estado estacionario; mientras que la Figura 5(b) corresponde al momento en que se obstaculiza el paso de la luz. Conforme previsto, el ancho del pulso de control es mayor en el segundo caso.



(a)

(b)

Fig. 4: Funcionamiento de la plataforma en función de una fuente de luz externa: (a) Estado estacionario; (b) Cuando se acerca la luz de la linterna de un celular al sensor.



(a)

(b)

Fig. 5: Funcionamiento de la plataforma en función de la presencia de un obstáculo entre la luz incandescente de la planta y el sensor: (a) Sin obstáculo; (b) Con obstáculo.

B. Aspectos Relacionados a la Enseñanza/Aprendizaje

El promedio de estudiantes que alcanzan a culminar esta experiencia con éxito es del 40%. Uno de los problemas más importantes en el desarrollo del trabajo consiste en la falta de experiencia de los estudiantes en encontrar los parámetros de las constantes del PI adecuado para el funcionamiento adecuado de la planta. La razón seria porque la planta no tiene modelo definido y también porque la sensibilidad del sensor depende de su posición y del grado de iluminación del lugar donde se realizan las pruebas Para tener un éxito en la implementación por parte una mayor cantidad de estudiantes, se debe proveer la mayor cantidad de pautas posibles de modo para que el alumno pueda minimizar el tiempo de implementación, que es el objetivo a mediano plazo de este trabajo.

V. Conclusión

El uso de la metodología basado en proyectos se considera adecuada para cimentar los conocimientos adquiridos en las clases de teoría, con énfasis en los últimos ciclos, donde demuestran las habilidades y conocimiento adquiridos en los ciclos pasados. En el mundo de la automatización usamos generalmente controladores PID ya fabricados y que no tienen auto sintonía, es en este momento donde la experiencia adquirida por parte de los alumnos, en el laboratorio, va a contribuir en un mejor desempeño de parte de ellos. La reducción del tiempo en la implementación de la experiencia descrito en el presente trabajo serán de gran utilidad en la elaboración otros proyectos en el área de Sistemas de Control Digital.

References

[1] C. Álvarez G., A. S. P., and F. W. O., "Simulation of digital controllers," *Ingeniare. Rev. chil. ing.*, vol. 17, no. 3, pp. 309–316, 2009.

[2] D. M. Jaime and A. A. Leonel, "Use of simulations: a study on potentialities and challenges presented by research in the area of physics teaching," *Rev. Bras. Ensino Fís*, vol. 46, no. 5, pp. 34–38, 2024.

[3] P. D. M. Pereira and M. S. da Silva, "Construcao de um kit experimental com arduino para ensino de oscilacoes em tempo real," *Rev. Bras. Ensino Fís*, vol. 43, 2021.

[4] G.-E. Chanchí-Golondrino, M.-A. Ospina-Alarcón, and M. Saba, "Simulation of digital controllers," *Revista Científica*, vol. 22, no. 2, pp. 257–71, 2022.

[5] E. Cifuentes N and G. Tejada M, "Remote implementation of a discrete temperature control by hysteresis," in *XV Technologies Applied to Electronics Teaching Conference*, 2022.

[6] C. Kluever, *Sistemas dinamicos: modelagem simulacao e controle*. LTC, 2018.

Um kit educacional de baixo custo para oficinas de introdução à eletrônica lúdica e criativa em escolas

Lauro Ilson Schlemper
Former Academic
Departmento Acadêmico de Eletrônica
Instituto Federal de Santa Catarina, IFSC
Florianópolis, Brazil
lauro.robotica@gmail.com

Julio Feller Golin
Departmento Acadêmico de Eletrônica
Instituto Federal de Santa Catarina, IFSC
Florianópolis, Brazil
julio.golin@ifsc.edu.br

Pedro Giassi Jr.
Departmento Acadêmico de Eletrônica
Instituto Federal de Santa Catarina, IFSC
Florianópolis, Brazil
pedro.giassi@ifsc.edu.br

Abstract – This paper presents a low-cost kit for practical activities using basic electronics for elementary and high school students. It has been designed and developed as single electronic modules whith simple manufacturing, plug-and-play characteristics, and intuitive connections for users without prior experience in electronic usage. Several workshops have been conducted with audiences from public schools and social projects, demonstrating the applicability and usability of the kit, as well as its relevance in providing them with exposure to and encouragement in the use of electronic devices within the scope of creative education in science, technology, electronics and the arts (maker culture, STEAM).

Keywords – basic electronics, educational kit, low cost, criative education, STEAM

I. INTRODUÇÃO

A reforma curricular definida pela nova Base Nacional Comum Curricular (BNCC) no Brasil propõe desenvolver competências e habilidades digitais e tecnológicas para serem utilizadas de forma significativa e reflexiva durante todo o período escolar. O uso e o domínio da tecnologia nas diferentes áreas do conhecimento são vistos como parte das competências e como elemento formador do aluno, variando de acordo com a área do conhecimento e o nível de ensino [1].

De forma geral, estas tecnologias incluem as Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs), produtos relacionados à robótica educacional e atividades maker. As TICs, incluindo tablets, smartphones, software educational, apps e plafatormas online são frequentemente utulizadas para realização de tarefas e pesquisas, acesso a informação, comunicação e produção de conteúdo digital. A robótica educacional envolve o uso de kits robóticos de vários níveis e complexidades, programação para o desenvolvimento de habilidades como pensamento computacional, resolução de problemas, integração de dispositivos e trabalho em equipe. Por fim, as atividades maker podem envolver as anteriores, mas têm um caráter ainda mais amplo e transdisciplinar baseado na criação, no design, na construção artesanal e na experimentação por meio de projetos práticos. Todas essas tecnologias e abordagens apoiam atividades pedagógicas nas áreas conhecidas como STEAM[1] [2,3]. A eletrônica está envolvida em tudo isso – seja como ferramenta ou como objeto de construção de conhecimento – apresentada em diversos formatos, desde componentes individuais até kits pré-construídos.

No caso das escolas públicas, outro aspecto a considerar é o dos recursos, sejam eles financeiros, materiais e/ou de formação de professores, impactando assim a implementação de tais diretrizes.

Considerando o exposto, este trabalho teve como objetivo desenvolver um kit eletrônico educacional de baixo custo, de fácil replicação e facilidade de uso para atividades STEAM e como incentivo ao aprendizado de eletrônica básica. Além do desenvolvimento do kit, foram realizadas oficinas em turmas do ensino fundamental e médio e em um projeto social em Florianópolis, Brasil. Por fim, foi disponibilizado um guia aos professores para reprodução do kit nas escolas e materiais de referência com sugestões de atividades.

O artigo está organizado da seguinte maneira: a seção 2 apresenta uma revisão de kits comerciais; a seção 3 apresenta os objetivos educacionais, os componentes do kit e propostas de atividades e guias. A seção 4 apresenta as oficinas realizadas e, na sequência, os resultados obtidos, baseados em observações qualidativas e em questionários diretos e individuais aplicados aos participantes.

II. REVISÃO E METODOLOGIA

Nos últimos anos, tem-se visto um interesse crescente e uma maior presença de atividades educacionais de robótica, maker e eletrônica na educação. Isso reflete uma mudança na forma de estudar e aprender, baseada na curiosidade, na experimentação, na criatividade, na invenção e na experiência prática. Usualmente estas atividades promovem e incentivam a interação e a colaboração entre os participantes, atitudes necessárias e valorizadas não só na escola, mas também fora dela. Isso reflete uma busca por métodos de ensino mais dinâmicos, práticos e significativos para os alunos [5].

O surgimento de diversos kits para essas áreas facilitou a introdução de tais abordagens nas escolas, proporcionando aos alunos experiências práticas e a oportunidade de aplicar conceitos teóricos em projetos concretos.

Contudo, o acesso a estes materiais, especialmente nas escolas públicas, ainda não é uma realidade generalizada [6]. Ao mesmo tempo, a BNCC exige conhecimentos, competências e habilidades que podem ou devem ser desenvolvidas utilizando tais ferramentas.

A. Revisão de alguns kits comerciais

Neste trabalho foi feita uma revisão de dois kits comerciais com objetivos semelhantes aos aqui propostos. As principais categorias de análise são a adequação do produto para fins educacionais específicos, como a capacidade de promover a aprendizagem de conceitos técnicos e científicos relacionados à eletrônica básica e à eletricidade, a facilidade de uso para alunos e professores, a disponibilidade de recursos e materiais complementares, a flexibilidade para a realização de diferentes tipos de projetos e a robustez do kit em termos de durabilidade e confiabilidade. Adicionalmente, aspectos como a escalabilidade para diferentes níveis de ensino e a integração com os currículos educacionais também são considerados na comparação entre os kits comerciais.

- *Microduino mPie:* apresenta um conjunto de módulos individuais associados magneticamente e conectados por cabos. Os módulos são organizados em grupos e identificados por cores: potência (amarelo), função (azul),

1 Atividades que envolvem conhecimentos, práticas e ferramentas da Ciência, Tecnologia, Engenharia, Artes e Matemática.

comando (rosa) e lógica (verde). Os módulos lógicos incluem funções OR e AND e os são fisicamente compatíveis com blocos LEGO [7].

- *Scopabits Pinguini Design:* os componentes foram originalmente montados em blocos de madeira com forte influência da filosofia do-it-yourself (DIY) e, como parte da proposta educacional, o usuário monta o kit antes de utilizá-lo. O kit possui um sistema de conexão na forma de clipes elétricos com terminais positivos e negativos identificados por cores. Os módulos introduzem conceitos de eletricidade, condutividade, polaridade e controle de dispositivos de saída, como motores e campainhas. Este projeto foi um dos selecionados no Desafio de Aprendizagem Criativa do MIT e da Fundação Lemann, recebendo financiamento para implementação em mais de 40 escolas municipais de São Paulo [8].

Ambos os kits apresentam características desejadas para o projeto proposto: estrutura física reduzida e possibilidade de integração com materiais e componentes externos. Além disso, não dependem de tomadas ou fontes de bancada e podem ser utilizados fora da sala de aula, em ambientes externos, caracterizando soluções plug-and-play e desconectadas. Ambos fornecem material de referência para professores e alunos.

III. Objetivos Educacionais e Desenvolvimento do Kit

Além das características citadas anteriormente, o kit aqui proposto e denominado Eletrokit deverá apresentar um conjunto de módulos simples e de baixo custo, com alta funcionalidade e que possibilitem uma diversidade de combinações possíveis. Considerando a produção manual e em pequena escala, o resultado do desenvolvimento pretende ser uma alternativa em termos de funcionalidade, construção e baixo custo. Além disso, seguindo a proposta de acessibilidade e replicabilidade, o kit foi desenhado com componentes que lembram estruturas do cotidiano – interruptores, botões, lâmpadas etc. – e organizado em dois grupos. O primeiro grupo apresenta componentes básicos e discretos, desempenhando funções elementares para o usuário produzir e controlar respostas como luz, som e movimento. O segundo grupo é composto por elementos e funcionalidades mais complexas, como temporização e sentido de rotação. Os grupos são descritos a seguir.

Grupo 1. Apresenta módulos com as seguintes funções e componentes, além de cabos e conectores para interligação dos módulos:

- Energia: bateria de 9V e caixa de baterias de 1,5V (2xAA e 4xAA) fornecendo 3V e 6V;
- Comando: botões e chaves;
- Controle: potenciômetro;
- Resposta: leds, buzzers e motores.

Grupo 2. Apresenta módulos desenvolvidos com circuitos integrados e transistores, oferecendo funções de comando e controle mais avançadas:

- Chaves NA e NF: chaves normalmente aberta e normalmente fechada com LDRs;
- Temporização: módulo de temporização com circuito baseado em 555;
- Controle de potência e tensão: módulo PWM;
- Controle da direção de rotação: chave seletora e ponte-H.

A. Projeto dos módulos

Na proposta de interligação rápida e simples entre os módulos, considerando o público infantil e adolescente, utilizamos conectores DC Jack P4 fêmea e cabos com plugues P4 macho com terminais, pois proporcionam um aspecto intuitivo à conexão (interface e usabilidade), ao mesmo tempo que oferece firmeza e robustez aos elementos (design do produto). Neste tipo de solução, entretanto, a polaridade não é uma característica elétrica explícita aos usuários.

As Figuras 1-4 ilustram os esquemáticos e componentes do grupo 1.

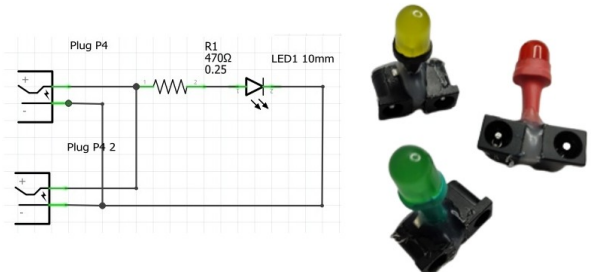


Fig. 1. Esquemático e peças do módulo LED.

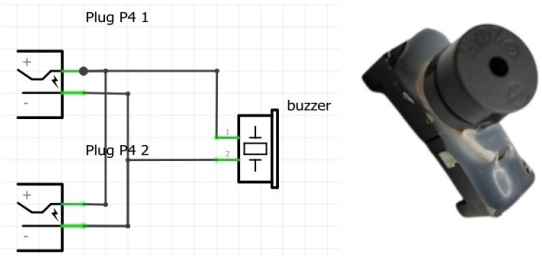


Fig. 2. Esquemático e módulo buzzer.

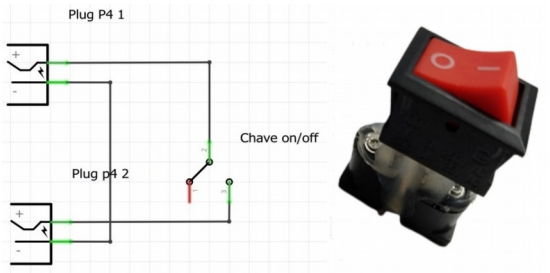


Fig. 3. Esquemático módulo chave liga-desliga.

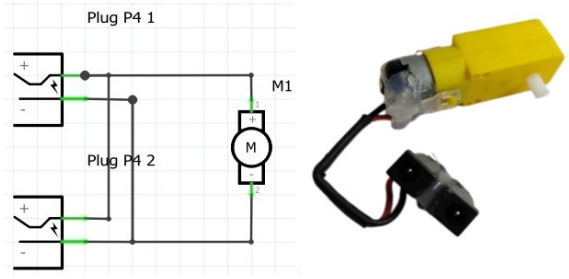


Fig. 4. Esquemático e módulo do motor DC.

As figuras 5 e 6 apresentam esquemáticos e alguns componentes do grupo 2.

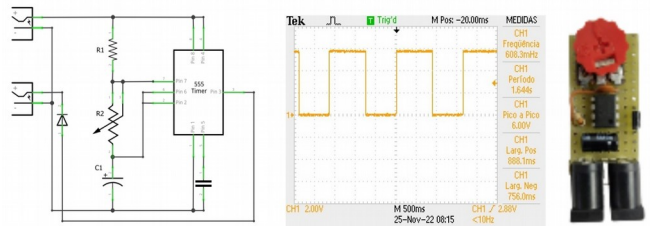


Fig 5. Esquemático e módulo de temporização. Sinal de temporização conforme visto no osciloscópiol.

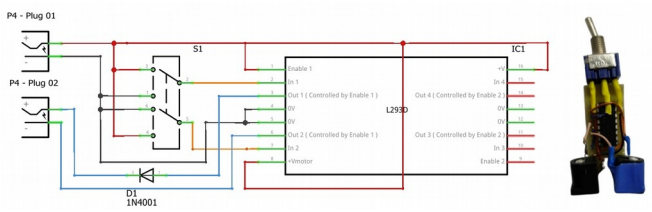


Fig 6. Esquemático e módulo da ponte-H com chave seletora da direção.

A. *Usabilidade - Component Affordances*

O termo "afffordance" no design de produto refere-se às características ou propriedades de um objeto que indicam como ele pode ser usado ou interagido pelo usuário. Em outras palavras, são os sinais perceptíveis que sugerem as possíveis ações que um usuário pode realizar com um objeto. Portanto, *affordances* são recursos de design importantes porque ajudam o usuário a compreender intuitivamente como interagir com um objeto sem a necessidade de instruções explícitas. Um bom design destas características de usabilidade e interação facilita o uso e melhora a experiência do usuário, tornando as funcionalidades do produto mais claras e acessíveis. [2] [4].

Algumas *affordances* específicas dos componentes do grupo 1 do Eletrokit são listadas a seguir. Nas interações observadas com o público, embora o hardware apresentado não seja conhecido pela grande maioria dos participantes, as características de usabilidade de cada módulo foram as seguintes:

- Botão e chave: as funcionalidades imediatamente percebidas são ligar e desligar; entretanto, o tipo de operação (manter ou não o estado após a ativação) e sua aplicação não são imediatamente percebidos, sendo necessária experimentação para compreensão e diferenciação das operações.

- Potenciômetro: a affordance de rotação é imediatamente reconhecida, mas sua funcionalidade não é claramente percebida: alguns alunos pensaram que o dispositivo servia para dar um sentido de rotação a um motor - o mesmo sentido de rotação do botão seria a rotação do motor; outros pensaram que era apenas um "botão de volume do som".

- Buzzer: dispositivo desconhecido da maioria dos participantes; sua funcionalidade não é imediatamente reconhecida.

- Motor: imediatamente reconhecido; operação desconhecida.

- LEDs: imediatamente reconhecidos na forma e função.

- Fontes de energia: imediatamente reconhecidas em forma e função; a maioria dos participantes não conhecia a bateria de 9V, mas a reconhecia como uma pilha; a maioria dos participantes pareceu perceber imediatamente que os cases de 2 e 4 pilhas forneciam “forças” de diferentes intensidades.

Essas *affordances* permitem que o kit seja utilizado sem a apresentação prévia de uma fundamentação teórica mais detalhada. Os componentes do grupo 2 não foram produzidos em quantidade suficiente para utilização nas oficinas e, portanto, não tiveram essas funcionalidades avaliadas qualitativamente. Porém, por se tratarem de componentes mais específicos, pressupõe-se uma percepção mais restrita de funcionalidade. A produção de componentes do grupo 2 para utilização em atividades de sala de aula deverá incluir encapsulamento ou proteção mais adequada dos componentes.

B. *Guias e documentos de orientação*

Além do desenvolvimento e teste dos módulos do Eletrokit, este trabalho propôs a elaboração de guias práticos para professores ou usuários apresentando conceitos elétricos, eletrônicos, lógicos e de circuitos conforme aestabelecidos na BNCC. Seguindo uma ordem de apresentação não obrigatória, foram inicialmente desenvolvidos três guias com as seguintes finalidades: 1) Apresentação de componentes e eletrônica básica; 2) Resistência elétrica; e 3) Comandos e motores. Todos os guias foram estruturados para leitura rápida e com tópicos separados por Introdução, Considerações Importantes, Curiosidade, Guia de Montagem e Desafio, sendo este último uma questão colocada aos alunos para utilizarem o conhecimento apresentado no guia para gerar uma solução para outro problema. A Figura 7 ilustra dois guias.

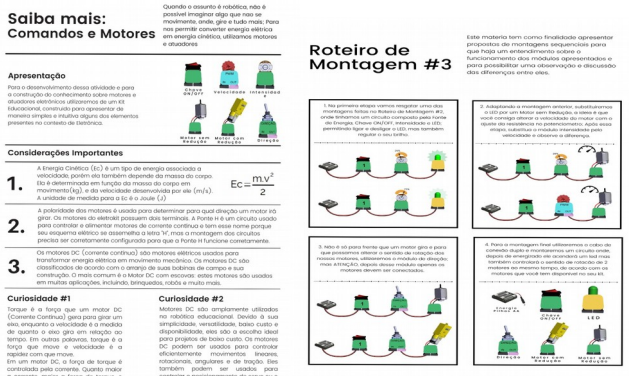


Fig. 7 Guias de atividades - exemplos.

IV. OFICINAS

Para verificar a aplicabilidade educacional do kit e suas funcionalidades, foram organizadas oficinas no campus e em instituições parceiras externas com alunos de diferentes estágios. Foram atendidas aproximadamente 200 pessoas em diferentes oficinas. O público participante foi composto por alunos dos ensinos fundamental e médio, cursos técnicos, cursos de graduação e profissionais da educação. Estas oficinas foram realizadas nos seguintes eventos:

- Semana Nacional de Ciência e Tecnologia (SNCT) no IFSC: 8 oficinas de 40 minutos cada, atendendo público interno e externo, este último composto por alunos visitantes e professores acompanhantes. Por se tratar de um evento aberto, as turmas foram compostas por *i)* apenas alunos do ensino fundamental e professores ou *ii)* classes mistas, compostas por estudantes do ensino médio, técnico e superior. As oficinas atenderam cerca de 130 participantes;

- Instituto Vilson Groh (IVG) – Projeto PodeCrer: 4 oficinas de duas horas cada com alunos do ensino médio, 50 participantes;

- TechDay – Prefeitura Municipal de Florianópolis – Escola Beatriz de Souza Brito: uma oficina de uma hora com alunos do ensino fundamental e dois professores de tecnologia educacional do município, 20 participantes.

Estas oficinas tiveram como objetivo avaliar a receptividade e funcionalidade do grupo 1 do Eletrokit bem como a estratégia pedagógica adotada. Nelas, os alunos assumem papel de protagonismo, com autonomia, liberdade criativa e experimentação [2,5,9]. O entendimento da função dos componentes individuais fundamenta a compreensão lógica e possibilita a criatividade em implementações práticas, mesmo em oficinas livres ou guiadas.

2 Por exemplo, um botão em um dispositivo eletrônico pode ser pressionado, indicando ao usuário que ele pode ser usado para iniciar uma função específica. Da mesma forma, a maçaneta de uma porta pode ser girada. [4].

As oficinas foram organizadas da seguinte forma: os elementos do kit são disponibilizados inicialmente de forma completa, mas desorganizada sobre a mesa ou bancada, gerando curiosidade sobre cada tipo de componente e proporcionando liberdade de contato e interação imediata, sem a necessidade de uma base teórica densa . Mesmo assim é feita uma apresentação rápida para contextualização com questões problematizadoras visando criar um ambiente de curiosidade e estímulo [9]. Assim, os participantes começam por conhecer os componentes essenciais de um circuito (a "alimentação", a "transmissão de energia" e o "botão para ligá-lo"). Em alguns casos, e deliberadamente, as fontes de energia não foram fornecidas de imediato para fazer os alunos pensarem sobre o que falta para o funcionamento, ou seja, para procurarem compreender a necessidade de uma fonte de energia. Em seguida, o professor propõe novas configurações e desafios, permitindo que os participantes aprendam sobre a função dos componentes de controle e acionamento (esses conceitos são construídos à medida que interagem e enfrentam desafios). Adicionalmente, os conceitos de estado (ligado/desligado, aceso/apagado, móvel ou estacionário) e de variável contínua (volume da campainha, velocidade do motor, brilho do LED) também são discutidos e formalizados com a mediação do professor, pois a compreensão desses conceitos pode ser subjacente à manipulação dos dispositivos, mesmo que o vocabulário ainda não esteja disponível. Este é outro aspecto a destacar: os alunos também desenvolvem vocabulário para posteriormente descrever o que foi feito e o que está acontecendo, compondo assim uma etapa de reflexão sobre o que foi desenvolvido, pensando em seus próprios aprendizados [9,10]. As Figuras 8 e 9 ilustram alguns desses momentos.

Fig. 8. Arranjo inicial dos componentes em uma oficina durante a Semana Nacional de Ciência e Tecnologia – SNCT. IFSC Campus Florianópolis.

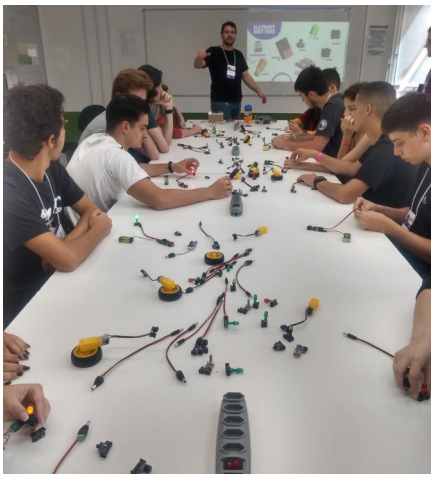


Fig. 9. Oficina durante a SNCT, IFSC Campus Florianópolis.

A Figura 10 ilustra a oficina no Techday, com alunos da rede pública municipal, e as figuras 11 e 12 do projeto social PodeCrer do Instituto Vilson Groh com alunos do ensino médio.

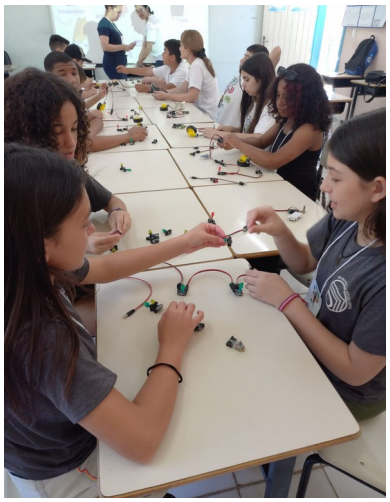


Fig. 10. Atividades colaborativas no TechDay.

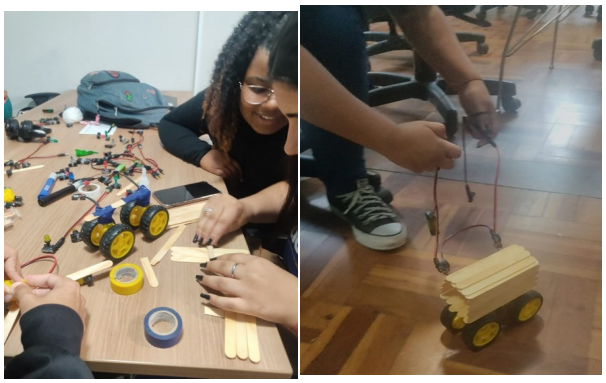


Fig. 11. Algumas criações nas oficinas do Projeto PodeCrer – IVG.

Fig. 12. Criações livres no Projeto PodeCrer – IVG.

V. Questionários de Avaliação e Resultados

Ao final de cada oficina foi entregue aos participantes um questionário para avaliar a atividade, o kit e sua percepção de aprendizagem, avaliando seus conhecimentos de eletrônica básica antes e depois da dinâmica. Também foi registrado o número de montagens realizadas, juntamente com uma pergunta de identificação dos componentes utilizados e suas respectivas funções. Como cada oficina tinha um público

característico distinto, também foram registradas idade e escolaridade de cada participante.

Inicialmente apresentamos os resultados obtidos nas oficinas da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia realizadas no campus do IFSC em Florianópolis. Conforme mencionado anteriormente, essas oficinas tiveram um público diversificado, incluindo alunos externos à instituição, por se tratar de um evento aberto para visitas escolares. Por questões de logística da instituição, não houve mistura de alunos internos e externos em uma mesma oficina. A Figura 13 ilustra a idade dos participantes.

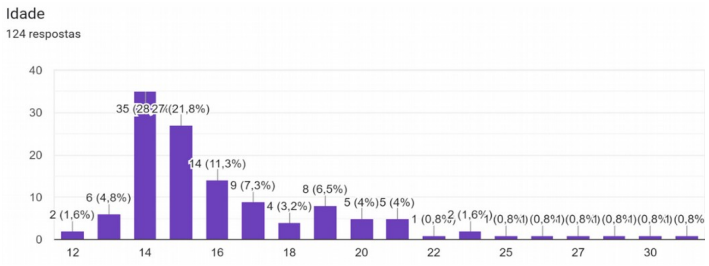


Fig. 13. Idade dos participantes nas oficinas da SNCT.

A Figura 14 apresenta os resultados das questões de autoavaliação sobre o grau de conhecimento em eletrônica básica antes e depois das atividades, registrando as respostas em uma escala de 0 a 5, onde 0 significa nenhum conhecimento e 5 muito conhecimento (no contexto da oficina), totalizando 125 respostas.

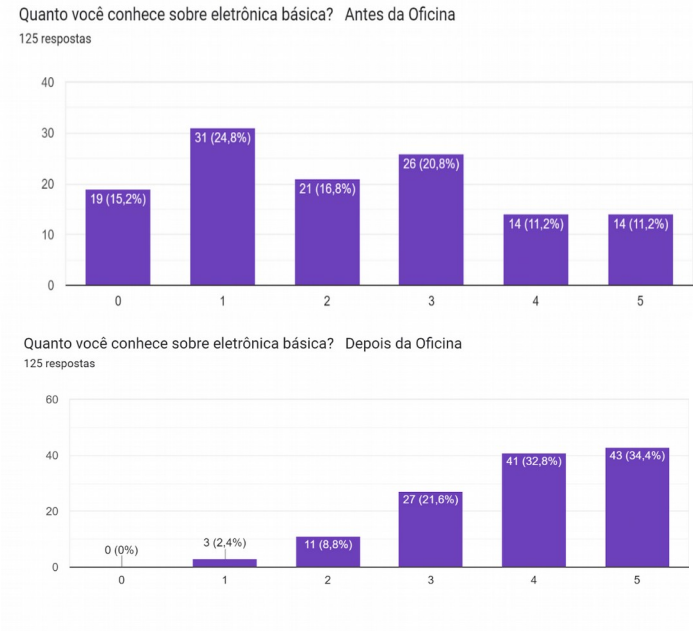


Fig. 14. Autoavaliação de conhecimentos antes e depois da oficina.

Vale ressaltar que todos os participantes que relataram não ter conhecimento prévio sobre o assunto apresentaram algum ganho após a oficina. De fato, vemos uma mudança significativa das classificações de 0 a 2 (antes das oficinas) para classificações de 4 e 5 (depois das oficinas).

Quanto à questão sobre o número de atividades concluídas, 93 participantes (76,2%) confirmaram ter concluído as cinco atividades propostas. Montagens de forma livre não foram contadas neste caso. Quanto à questão sobre identificação dos componentes e suas funções, 112 participantes (91,1%) identificaram corretamente todos os seis componentes apresentados e suas funções.

O segundo evento-teste aconteceu em parceria com o Instituto Vilson Groh (IVG), organização da sociedade civil sem fins lucrativos que desenvolve uma série de projetos educacionais e socioassistenciais na periferia da região de Florianópolis. Nesta ocasião, além das respostas às questões apresentadas anteriormente, foi coletada uma avaliação focada na usabilidade e nas características físicas do kit. Todos os participantes dessas oficinas eram alunos do ensino fundamental do 5º ao 8º ano. As Figuras 15 e 16 apresentam as idades e séries escolares dos participantes filiados ao projeto PodeCrer do IVG.

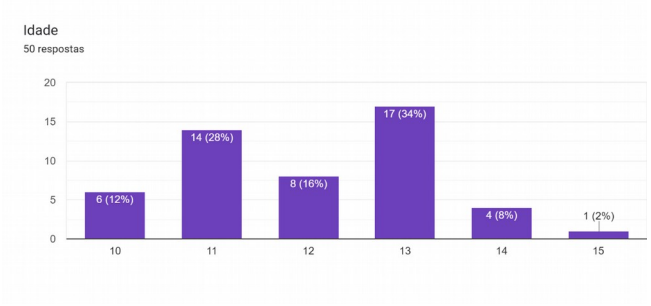


Fig. 15. Idade dos participantes do projeto PodeCrer - IVG.

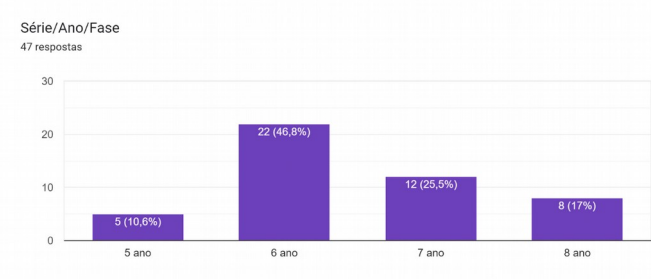


Fig. 16. Ano escolar dos participantes do projeto PodeCrer - IVG.

A Figura 17 apresenta os resultados das autoavaliações antes e depois das oficinas. Neste caso, tratava-se de um público com pouca ou nenhuma exposição a dispositivos eletrônicos educativos ou lúdicos, situação refletida nos resultados de conhecimentos prévios sobre eletrônica.

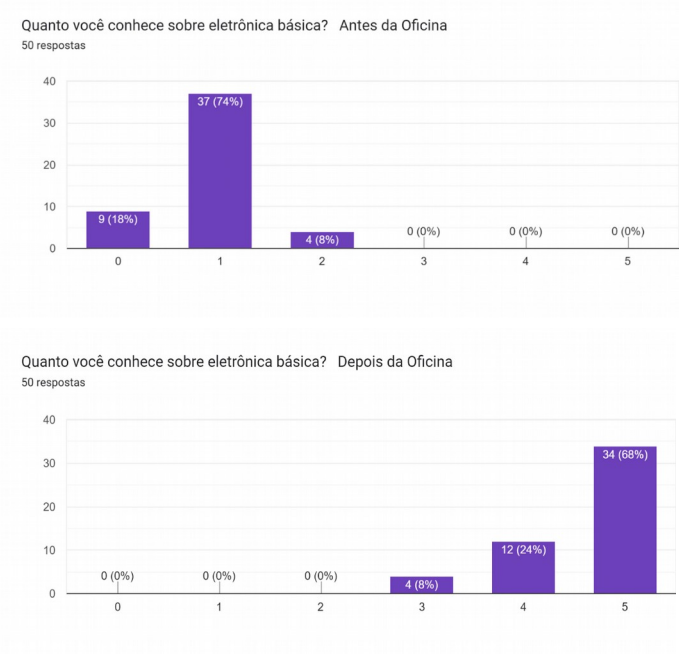


Fig. 17. Autoavaliação de conhecimentos antes e depois da oficina.

É interessante notar que 68% deste público se sente plenamente no melhor nível de conhecimento de eletrônica básica que o kit propõe. Além disso, todos os participantes registraram algum ganho de conhecimento específico com as atividades. Com base nesses registros e nas observações qualitativas dos autores, podemos afirmar que esses

resultados se devem a dois fatores: a duração da oficina, que neste grupo foi de 2 horas, e o tipo de dinâmica, que além das montagens propostas como atividades e desafios também ofereceu oportunidades para criação livre e em grupo. Alguns resultados dessas criações foram apresentados nas Figuras 11 e 12.

Esse grupo também avaliou características físicas, usabilidade e suas percepções e atitudes em relação ao kit.

Quanto à avaliação da usabilidade do kit, os alunos responderam três questões sobre a prática e percepções durante as montagens, conforme mostra a Figura 18.

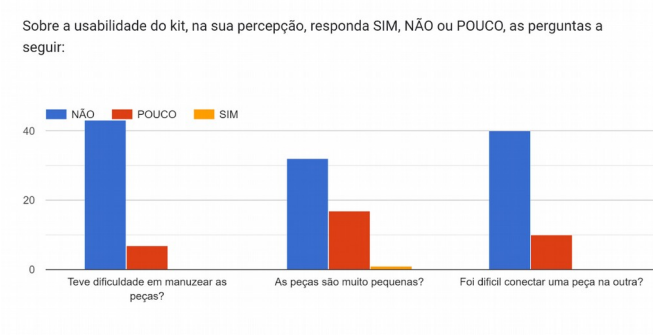


Fig. 18. Respostas sobre a usabilidade do kit.

Para a questão “Em relação à segurança e cuidados com o manuseio do Eletrokit, como você se sentiu?” tivemos as seguintes respostas:

- Tive cuidado para não danificar nada: 4%
- Não tive medo de danificar nada: 64%
- Um pouco de medo de danificar alguma coisa: 32%

Estes resultados mostram uma atitude segura e positiva em relação ao kit que não limita a sua manipulação.

VI. Conclusões

O artigo apresentou o desenvolvimento e aplicação de um kit educacional de eletrônica básica utilizado em oficinas com crianças e adolescentes de escolas públicas e de um instituto social de Florianópolis, Brasil. O objetivo das oficinas foi proporcionar aos participantes uma exposição aos elementos básicos da eletrônica, permitindo-lhes familiarizar-se com o papel dos componentes e compreender sua utilização sob uma perpectiva de lógica básica, realizar montagens livres ou guiadas e ganhar vocabulário. Estas atividades também tiveram como objetivo estimular o interesse pela área da eletrônica, proporcionando ao mesmo tempo o uso de uma ferramenta educacional alternativa e de baixo custo na perspectiva da educação STEM. Os resultados mostraram que o kit é adequado como ferramenta educacional e pode contribuir para a alfabetização científica e tecnológica e para promover o envolvimento com áreas afins. Como perspectivas, serão produzidas quantidades suficientes de componentes do grupo 2 do kit, aumentando a gama de elementos e assim as possibilidades de uso e soluções. À semelhança da fase anterior, deverão ser promovidas novas oficinas para avaliar a receptividade destes componentes e a compreensão das suas funções e utilizações. Devem também ser prosseguidas melhorias contínuas na interface física dos componentes. Para isso, invólucros impressos em 3D devem ser estudados e testados.

Referências

[1] Brasil, Base Nacional Comum Curricular. Ministério da Educação, 2017.

[2] R. Samagaia, D. Delizoicov, "Educação científica informal no movimento maker", in Proc. Encontro Nacional Pesquisa em Educação em Ciências, 2015.

[3] J. Lave, Cognition in practice: mind, mathematics and culture in everyday life. Cambridge University Press, 1988.

[4] A.W. (Tony) Bates, Teaching in a Digital Age: guidelines for designing teaching and learning. Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License, 2022.

[5] Blikstein, Paulo. Maker movement in education: History and prospects. *Handbook of technology education* 419 (2018): 437.

[6] Milko Matijascic, Carolina E. Kotovicz Rolon, Sérgio L.D. Fonseca. Educação – Políticas sociais: acompanhamento e análise. Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada. IPEA, 2022.

[7] Microduino Inc. https://www.microduinoinc.com/mpie/

[8] Scopabits. https://www.bugo.design/scopabits

[9] M. Pietrocola. Curiosidade e imaginação: os caminhos do conhecimento nas ciências, nas artes e no ensino. Ensino de ciências: unindo a pesquisa e a prática. São Paulo: Thomson Learning, 2004.

[10] F. Bezerra, Bem mais que os bits da computação desplugada, in Proc. Workshop Informática na Educação-SBC, Dourados, Brazil, 2014,vol.1,no.1,pp.116-125.

DEMOSTRADORES 6 – SESIÓN DE DEMOSTRADORES

Laboratorio Remoto de Bajo Costo Basado en Raspberry Pi para la Educación en IoT, LoRa y Programación en Python

Jose Garzón Soto
Depto. de Tecnología en Electrónica
Corporación Universitaria Minuto de Dios
(UNIMINUTO), Bogotá, Colombia
jose.garzon-so@uniminuto.edu.co

Jason Gaona Peña
Depto. de Tecnología en Electrónica
Corporación Universitaria Minuto de Dios
(UNIMINUTO), Bogotá, Colombia
jason.gaona@uniminuto.edu.co

Jonathan Álvarez Ariza
Depto. de Tecnología en Electrónica
Corporación Universitaria Minuto de Dios
(UNIMINUTO), Bogotá, Colombia
jalvarez@uniminuto.edu

Sergio González Gil
Depto. Ingeniería de Sistemas
Corporación Universitaria Minuto de Dios
(UNIMINUTO), Bogotá, Colombia
segonzalez@uniminuto.edu

***Abstract*—En este artículo se presenta un laboratorio remoto de bajo costo basado en Raspberry Pi para el aprendizaje de conceptos relacionados con el Internet de las Cosas (IoT), protocolo LoRa y programación en lenguaje Python. Para interactuar con el laboratorio, se ha desarrollado una interfaz de usuario en la que los estudiantes pueden programar usando directamente las instrucciones del lenguaje Python o mediante bloques gráficos para aquellos que se inician en las temáticas mencionadas y en la programación. El laboratorio cuenta con dispositivos como sensor de temperatura, humedad y luz ambiente, brazo robótico en impresión 3D, módulo LoRa, entro otros, con los que los estudiantes pueden interactuar y experimentar. El laboratorio ha sido usado por 41 estudiantes de primer semestre de ingeniería de sistemas y tiene el potencial de ser una herramienta de aprendizaje activo en las temáticas indicadas.**

***Index Terms*—Laboratorio remoto, IoT, LoRa, Python, Raspberry Pi**

I. Introducción

Los laboratorios remotos se han convertido en una herramienta de experimentación activa para estudiantes de ingeniería y ciencias de la computación en temáticas que abordan la programación, la robótica, el control automático, la automatización, entre otras. Aspectos como el incremento de los estudiantes en las aulas de clase, la reducción de los costos respecto a la infraestructura en los laboratorios y la necesidad de una continua adaptación de las temáticas curriculares a los desafíos de las nuevas tecnologías han guiado en parte a la popularización de estas herramientas [1], [2]. Además de lo anterior, la accesibilidad y la escalabilidad de estos laboratorios han propiciado este auge, debido a que a nivel técnico, se pueden incorporar nuevas tecnologías como realidad virtual o realidad aumentada en el desarrollo de nuevos experimentos en ingeniería o ciencias que los estudiantes requieran para su proceso de aprendizaje [3], [4].

Así, pues, la literatura reporta el desarrollo de varios laboratorios remotos e infraestructura asociada para dar soporte al proceso de aprendizaje de los estudiantes. Por ejemplo, García-Orellana et al. [5] presentan un laboratorio remoto para prácticas en microcontroladores y FPGAs que puede ser extendido para incluir experimentos de electrónica análoga. El laboratorio fue desarrollado con el computador de placa única Raspberry Pi a nivel de hardware y con Node-RED a nivel de software. De manera similar en [6] se presenta un laboratorio remoto para realizar prácticas con FPGAs, específicamente con la familia Nexys 3 de Digilent Inc que usa FPGAs Xilinx. El laboratorio cuenta con periféricos virtuales externos como teclado hexadecimal que permite simular el comportamiento de las entidades de hardware creadas por los estudiantes. Para programación en Arduino, Fernández-Pacheco et al. y Martin et al. [7], [8] describen la implementación de un laboratorio con Raspberry Pi y Arduino para la manipulación de un cubo 3D RGB creado con LEDs y de sensores de temperatura, gas, o presión. En estos trabajos, los estudiantes tienen acceso remoto a una interfaz web para programación directamente en Arduino. Complementariamente, los autores del estudio [9] presentan el laboratorio remoto Block.ino para programación en Arduino por medio de bloques gráficos. 96 estudiantes de tres colegios en Brasil respondieron la encuesta de satisfacción que mostró que el laboratorio tiene una buena aceptabilidad y recepción entre ellos.

A nivel industrial, en el estudio [10] se explica un laboratorio remoto basado en Internet de las cosas (IoT) con protocolo MQTT para el trabajo con sensores de proximidad (inductivo, capacitivo y óptico) al cual los estudiantes pueden acceder mediante un app en Android. También dentro del campo de IoT, Al-Aubidy et al. [11] ilustran un laboratorio remoto para energías renovables usando paneles solares y sensores de temperatura, humedad, luz ambiente y voltaje.

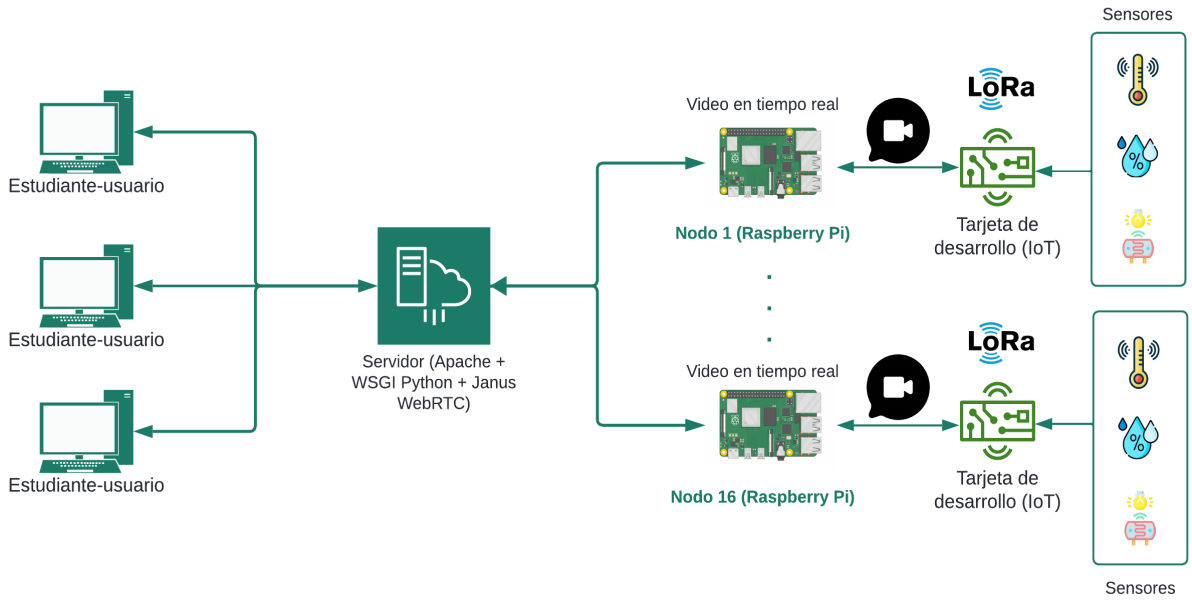


Fig. 1. Arquitectura general del laboratorio remoto.

En este laboratorio, los estudiantes pueden conectarse a un sistema en el que pueden realizar la medición de variables como voltaje, corriente y potencia ante diferentes condiciones de luz ambiente en los paneles solares.

Ahora bien, este estudio pretende complementar los anteriores trabajos debido a que en su mayoría usan Arduino como dispositivo central con el que los estudiantes pueden experimentar. Así, el presente laboratorio de bajo costo emplea Raspberry Pi, lenguaje de programación Python y dispositivos con los que los estudiantes pueden interactuar en la temática de IoT como sensores de temperatura, humedad, luz ambiente y módulo de comunicaciones mediante protocolo LoRa. Además de lo anterior, los estudiantes pueden realizar sus códigos usando dos modos de programación: por bloques y directamente en lenguaje Python. El laboratorio remoto ha sido usado por 41 estudiantes de ingeniería de sistemas con una buena percepción y aceptación. De este modo, el laboratorio remoto tiene el potencial de ser una herramienta de aprendizaje y experimentación activa que puede servir a estudiantes de ingeniería y ciencias de la computación en programas presenciales o a distancia tanto a nivel de formación inicial (cursos de fundamentación) como intermedia y avanzada.

II. Descripción del laboratorio

La Fig.1 muestra la arquitectura del laboratorio remoto, la cuál se basa en trabajos previos que hemos desarrollado [12], [13]. La arquitectura está compuesta por un servidor Apache con soporte Web Server Gateway Interface (WSGI) para trabajar con scripts de Python directamente desde la interfaz web. A nivel del servidor, todos los servicios se diseñaron usando este lenguaje, ya que permitía hacer un desarrollo y puesta en marcha más rápido de las funcionalidades del laboratorio remoto. Cabe resaltar que todo el laboratorio se construyó usando herramientas de software libre como Janus WebRTC server [14] para el video en tiempo real, Apache [15] para el alojamiento de las diferentes páginas web con la que los estudiantes interactúan o Redis [16] para el despliegue de la consola Python en tiempo real para depurar los diferentes scripts creados por los estudiantes en cada nodo y para graficar los datos que provienen de los sensores instalados. El laboratorio cuenta con 16 nodos con los que los estudiantes pueden experimentar y aprender las diversas temáticas de programación en Python e IoT. El video demostrativo del laboratorio remoto puede ser encontrado en el enlace https://youtu.be/-xj0uSeOsWM.

A. *Hardware*

A nivel de hardware cada nodo cuenta con una tarjeta de desarrollo como la mostrada en la Fig.2. Específicamente cada nodo cuenta con los dispositivos de hardware registrados en la Tabla 1.

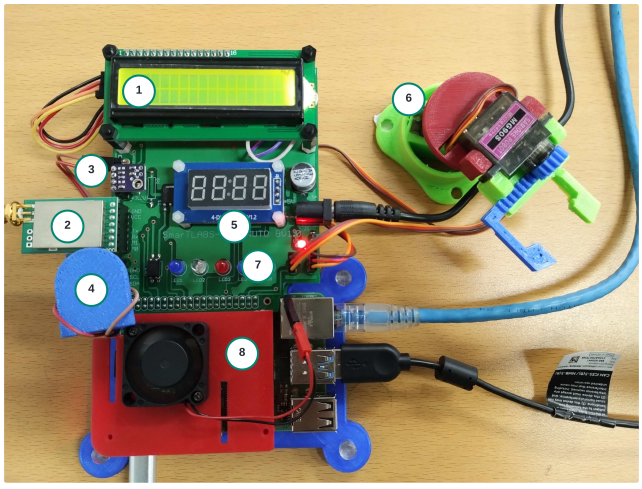


Fig. 2. Tarjeta de desarrollo creada para el laboratorio remoto.

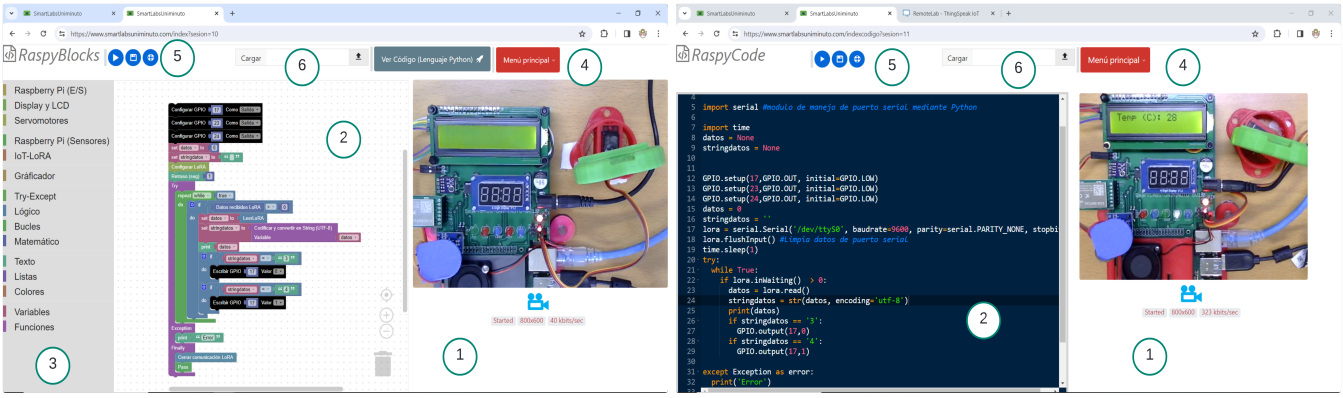


Fig. 3. Interfaces del laboratorio remoto para los estudiantes en modo de programación en bloques (izquierda) y texto (derecha).

TABLA I
COMPONENTES DE HARDWARE DE CADA NODO DE ACUERDO A LA FIG 2.

#	Componente	Descripción
1	LCD	Pantalla de cristal liquido (2 * 16 carácteres)
2	LoRa (Sx1278)	Módulo de comunicaciones con protocolo LoRa e interfaz serial (UART), alcance 3 Km
3	SHT30	Sensor de temperatura y humedad (protocolo I^2C)
4	Led de potencia (1W) y sensor BH1750	Módulo de led de potencia de 1W integrado con sensor de luz ambiente BH1750 (protocolo I^2C)
5	Display	Display 7 segmentos con integrado TM1637
6	Robot en impresión 3D	Robot en impresión 3D (2 grados de libertad)
7	LEDs	Cinco LEDs para experimentación
8	Raspberry Pi	Raspberry Pi 4 de 2GB de RAM

Estos dispositivos están enlazados a la tarjeta Raspberry Pi mediante una serie de librerías y funciones que desarrollamos en lenguaje Python. Por ejemplo, para trabajar el modulo LoRa, los estudiantes deben manipular el puerto serie de la Raspberry Pi y enviar sus comandos a través de este periférico mediante la librería Python (Pyserial). Para el módulo LoRa usamos dispositivos que no requirieran una red LoRaWAN con un gateway especifico, sino que se pudieran comunicar punto a punto (P2P). Con lo anterior reducimos los costos de implementación del laboratorio remoto. Otro componente que decidimos diseñar fue el módulo de LED de potencia y sensor de luz ambiente BH1750. Con este LED, el estudiante puede ajustar la intensidad de luz para que el sensor lo detecte usando técnicas como modulación por ancho de pulso (PWM) y lenguaje Python. Adicionalmente, en la Tabla 1 se presentan varios dispositivos de hardware con los que los estudiantes pueden interactuar aparte de los usados para fines de IoT y LoRa, por ejemplo, el brazo robótico con dos grados de libertad, la pantalla LCD, el display 7 segmentos, entre otros. Con estos componentes los estudiantes pueden aprender otras temáticas en las áreas de robótica, electrónica digital y programación o combinar su uso con los conceptos aprendidos de LoRa, IoT, etc.

B. *Interfaz web*

La Fig.3 muestra las interfaces de usuario que hemos creado en dos modos: programación por bloques (izquierda) y programación por texto (derecha). Los componentes de cada interfaz se describen en la Tabla 3.

TABLA II
COMPONENTES DE LA INTERFAZ DE USUARIO DE ACUERDO CON LA FIG.3.

#	Descripción
1	Video en tiempo real de cada nodo.
2	Área de trabajo para programación en bloques o en texto.
3	Paleta de bloques para programación de cada nodo.
4	Menú principal: Cerrar sesión, graficar, consola en tiempo real y ejemplos.
5	Botones para ejecutar script en Python, guardar script y ayuda del laboratorio.
6	Botón para cargar código en modo bloques o en texto al laboratorio

Como se ha descrito, desarrollamos el laboratorio remoto con dos modos de programación para estudiantes en nivel inicial (bloques) y aquellos que ya tengan un nivel más avanzado (texto). En el caso de la programación en bloques, se diseño un conjunto de bloques disponibles en la paleta (3) para diferentes funcionalidades del laboratorio desde la programación de pines de entrada y salida digitales (GPIOs) pasando por la pantalla LCD, los servomotores (para el robot), IoT y LoRa y finalizando con las categorías de funciones y variables que se pueden añadir a cada algoritmo visual de acuerdo con las necesidades de aprendizaje de cada curso. Sumado a ello, cada interfaz cuenta con un menú (4) con que los estudiantes pueden: (a) graficar en tiempo real variables, por ejemplo, de sensores, (b) ver la consola en tiempo real en la que pueden depurar sus scripts ya sea por bloques o texto y observar errores o imprimir variables o mensajes que deseen, (c) encontrar ejemplos para todos los dispositivos de hardware del laboratorio desde GPIOs hasta la programación de LoRa o envío de datos a plataformas como ThingSpeak de MATLAB, y (d) finalizar sesión. Ahora bien, cuando un estudiante construye su algoritmo por cualquiera de las dos interfaces, debe ejecutar su script con el botón play (5). En esta misma sección el estudiante puede guardar su script para después volverlo a cargar o editarlo cuando desee. Para el modo de programación en texto, toda la sintaxis del lenguaje

es resaltada de acuerdo con las instrucciones propias de Python para que el estudiante las identifique y tenga una mejor organización y estructura de su código. Para el modo bloques, los estudiantes pueden ver el código equivalente en Python haciendo clic en el botón (ver código lenguaje Python).

C. Ayuda educativa del laboratorio

Los estudiantes cuentan con una ayuda educativa (Wiki) para la manipulación y entendimiento de los diversos componentes del laboratorio remoto. La Wiki contiene la información de cada bloque, videos de explicación disponibles en YouTube de los componentes del laboratorio para los dos modos de programación, entre otros elementos. La Fig.4 muestra la apariencia de esta Wiki.

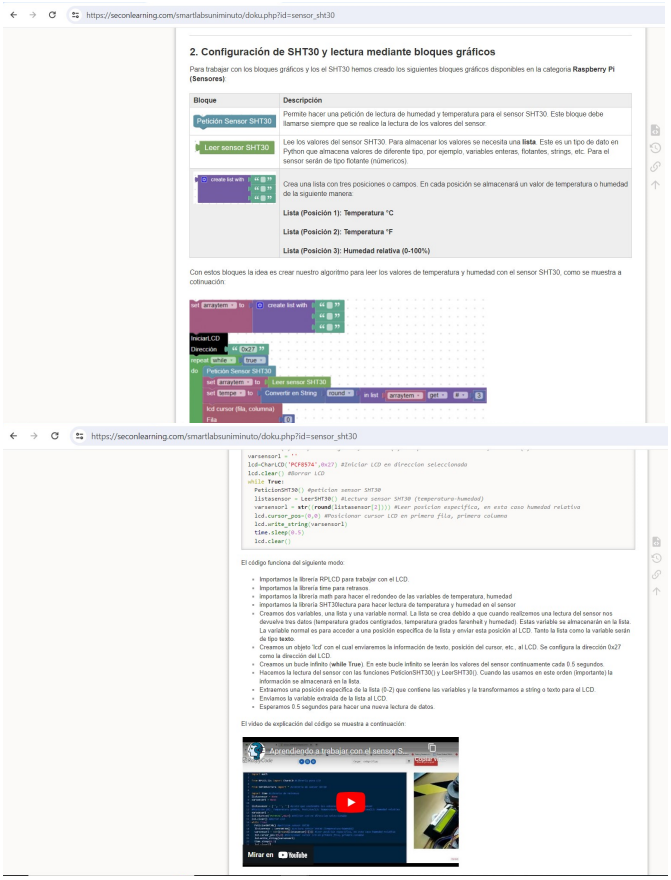


Fig. 4. Wiki construida como ayuda para el laboratorio remoto.

D. Grafica en tiempo real

Los estudiantes pueden graficar en tiempo real variables y datos de sensores directamente en el laboratorio remoto con un máximo de tres variables. Para ello, se ha construido una biblioteca que permite enviar datos al servidor de la Fig.1 mediante Redis. Los datos son posteriormente leídos desde la base de datos Redis por una página web mediante websockets y Node.js. También, con esta misma funcionalidad, los estudiantes pueden guardar los datos en formato .CSV para ser procesados posteriormente en otros software. La apariencia de esta utilidad se muestra en la Fig.5. En la figura se muestran los valores de temperatura (izquierda) y humedad (derecha) del sensor SHT30. Cabe señalar que para graficar datos se pide un tiempo de muestreo con un minino de 50 ms.

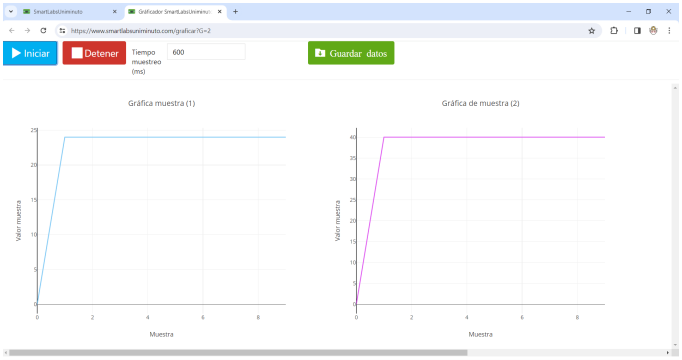


Fig. 5. Apariencia general de la utilidad para graficar en tiempo real.

III. Experimentos

En esta sección mostramos dos experimentos de manera demostrativa para las temáticas de IoT y protocolo LoRa.

A. Envío y recepción de datos mediante LoRa

En este ejemplo, los estudiantes envían datos mediante comunicación punto a punto (P2P) usando LoRa. Aquí un nodo actúa como maestro y envía los datos mientras otro nodo actúa como esclavo recibiendo los datos y procesandolos. Para el ejemplo, si se recibe un «3», el nodo esclavo apagará un LED enlazado al GPIO 17 en la Raspberry PI y si recibe un «4», encenderá dicho LED. El bloque configurar LoRa prepara el puerto serial de la Raspberry Pi para enviar o recibir datos. El algoritmo en bloques para el nodo esclavo se muestra en la Fig.6. El video de este ejemplo se muestra en el enlace https://youtu.be/5vhQ_aUvtYY.

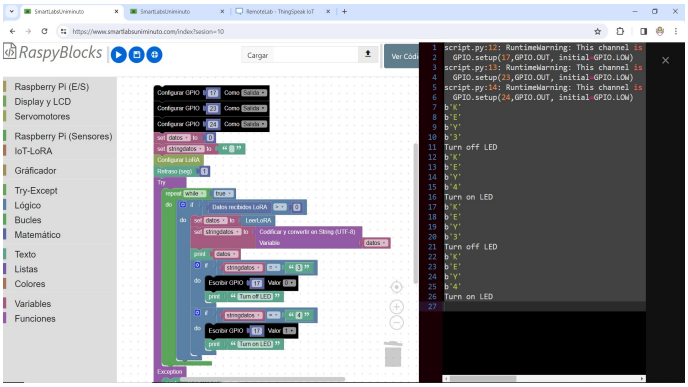


Fig. 6. Ejemplo del algoritmo para el nodo esclavo en la comunicación LoRa.

B. Envío de datos a plataforma ThingSpeak

Para este ejemplo, los estudiantes pueden enviar datos de sus sensores a plataformas especializadas IoT. De este modo, este ejemplo usa la plataforma de MATLAB (ThingSpeak) para enviar los datos. Los estudiantes necesitan colocar el

código de su API y canal para envío de datos registrado en esta plataforma. El código ejemplo en Python para el laboratorio remoto que envía datos desde el sensor SHT30 (temperatura, humedad) junto con la apariencia de estos datos en ThingSpeak se muestra en la Fig.7. De igual forma existe un equivalente en bloques para este ejemplo. El video ejemplo se ilustra en el enlace https://youtu.be/BnSG84UvPPI.

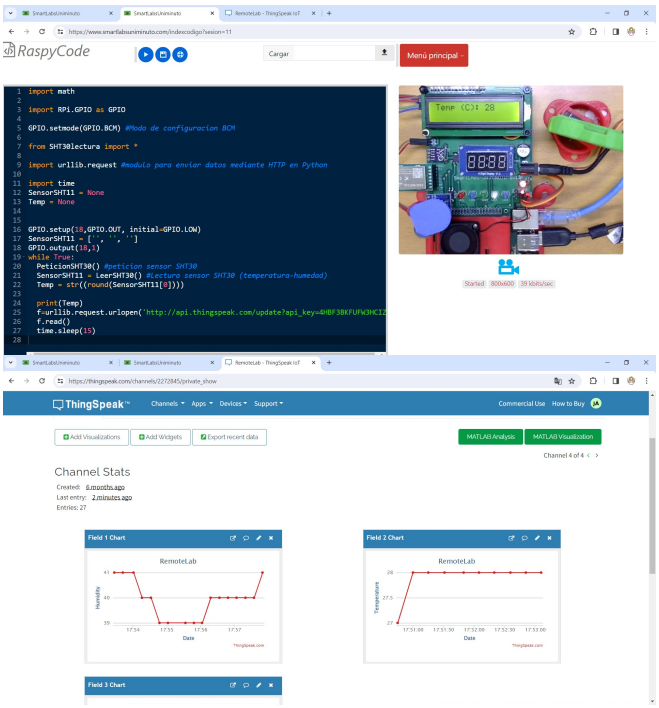


Fig. 7. Código ejemplo para enviar datos a la plataforma IoT ThingSpeak. Canal 1 (Field 1) humedad, canal 2 (Field 2) temperatura.

IV. Resultados con estudiantes y discusión

Como se mencionó, el laboratorio remoto fue probado con 41 estudiantes de primer semestre de la carrera de ingeniería de sistemas en la universidad Colombiana Corporación Universitaria Minuto de Dios-UNIMINUTO. El laboratorio remoto fue manejado por los estudiantes en sus dos modos de programación durante 6 semanas y finalizado este tiempo se aplicó una encuesta anónima en escala Likert de 4 puntos con doce preguntas cerradas en la escala (1: totalmente en desacuerdo a 4: totalmente de acuerdo) y tres abiertas para conocer su percepción sobre el laboratorio a nivel de accesibilidad, usabilidad y aprendizaje. En la Tabla 3 se describen algunas características demográficas de los estudiantes. El análisis de datos a nivel estadístico se hizo mediante el software IBM SPSS Statistics v.27.

TABLA III
Características demográficas de los estudiantes. N = 41.

Característica	Valor
Edad promedio	18.87 años
Estudiantes hombres	34 (82.92%)
Estudiantes mujeres	7 (17.08%)

A. Resultados cuantitativos de la encuesta

La Tabla 4 muestra los resultados descriptivos de la encuesta aplicada a los estudiantes. Para observar la consistencia interna del instrumento (encuesta) se usó el coeficiente Alpha de Cronbach (α). El valor de Alpha de Cronbach (α) permite conocer la validez interna del instrumento. Valores de ($\alpha \geq 0.7$) indican que el instrumento tiene una buena consistencia interna y responde a la naturaleza de los constructos que se desean conocer [17]. Para este caso, $\alpha = 0.914$, lo cual indica que la consistencia interna del instrumento puede ser considerada como excelente.

TABLA IV
Resultados descriptivos de la encuesta aplicada a estudiantes. M (Media), DE (Desviación Estándar)

Pregunta	M	DE
P1. ¿El trabajo con el laboratorio remoto me ayudó a entender cómo las temáticas del curso pueden aplicarse en situaciones reales?	3.56	0.504
P2. ¿Las herramientas del laboratorio remoto (código y bloques) me permitieron comprender y aplicar fácilmente los conceptos abordados en el curso?	3.47	0.507
P3. Mediante el uso del laboratorio remoto, ¿Pude experimentar en las temáticas del curso a mi propio ritmo de aprendizaje?	3.47	0.507
P4. ¿Considero que el laboratorio remoto es una herramienta que favorece mi aprendizaje?	3.73	0.448
P5. ¿Mediante las funciones del laboratorio remoto pude contrastar el funcionamiento de los bloques gráficos con el código equivalente en lenguaje Python?	3.35	0.594
P6. ¿Considero que el acceso al laboratorio remoto fue sencillo y rápido?	3.21	0.81
P7. ¿Considero que fue sencillo aprender a usar la interfaz del laboratorio remoto?	3.5	0.564
P8. ¿La ejecución de los algoritmos que creé fue ágil y pude contrastar el funcionamiento de estos algoritmos con el video en tiempo real?	3.32	0.726
P9. ¿Considero que la interfaz de usuario es adecuada y me permitió desarrollar mis algoritmos de manera sencilla?	3.559	0.504
P10. Considero de manera general, ¿qué es fácil aprender a usar las características del laboratorio remoto?	3.44	0.56
P11. ¿Me gustaría que las herramientas del laboratorio remoto fueran incluidas en otras materias a futuro para seguir expLoRando su funcionalidad y mejorar mi aprendizaje?	3.7	0.462
P12. ¿Usaría el laboratorio remoto en algunos de mis espacios libres para seguir experimentando y aprendiendo?	3.676	0.475

Las preguntas P1-P5 buscaban identificar si el laboratorio remoto permitió comprender y aplicar los conceptos vistos relacionados con IoT y programación, y si este favoreció la experimentación y el proceso de aprendizaje de los estudiantes. De otro lado, las preguntas P6-P10 permitieron identificar la facilidad de acceso y la asequibilidad del laboratorio remoto. Por último, con las preguntas P11 y P12, se estableció si los estudiantes estarían interesados en que el laboratorio se incorporará en otras materias del currículo de ingeniería o si

los estudiantes les gustaría usar el laboratorio en su tiempo libre con fines de aprendizaje.

En la Fig.8 se muestra la distribución de las preguntas P1-P5. Allí, por ejemplo, en la pregunta P1 sobre si el laboratorio remoto ayudó a los estudiantes a comprender las temáticas del curso y su aplicación en situaciones reales, el 53.66% de los estudiantes está totalmente de acuerdo y el 46.34% está de acuerdo. Similarmente, en la pregunta P2, los estudiantes indican que pudieron aplicar lo aprendido mediante los modos de programación por bloques y texto con un 48.78% de los estudiantes totalmente de acuerdo y un 51.22% de acuerdo. Llama la atención que en la pregunta P4 sobre si los estudiantes consideran que el laboratorio favoreció su aprendizaje, el 68.29% de los estudiantes están totalmente de acuerdo y un 31.71% de acuerdo. Esta pregunta es la que tiene un mayor porcentaje de estudiantes totalmente de acuerdo. No obstante, en la pregunta P5 un 4.88% (n = 2) estudiantes indicaron que no pudieron contrastar los bloques gráficos creados con su respectivo código en Python. Aun así en esta pregunta, un 39.02% de los estudiantes está totalmente de acuerdo y un 56.10% de acuerdo. Lo anterior evidencia que los estudiantes consideran al laboratorio remoto como una herramienta de aprendizaje y experimentación con la cual pueden observar la aplicación real de las temáticas vistas.

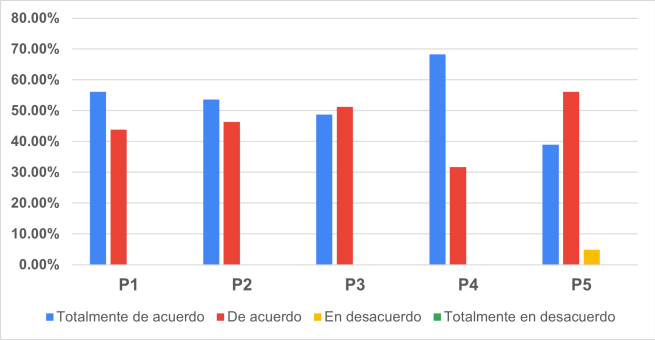


Fig. 8. Distribución de respuestas para preguntas P1-P5.

Una distribución de respuestas mucho más variada se obtuvo para las preguntas P6-P10. Esta distribución se muestra en la Fig.9.

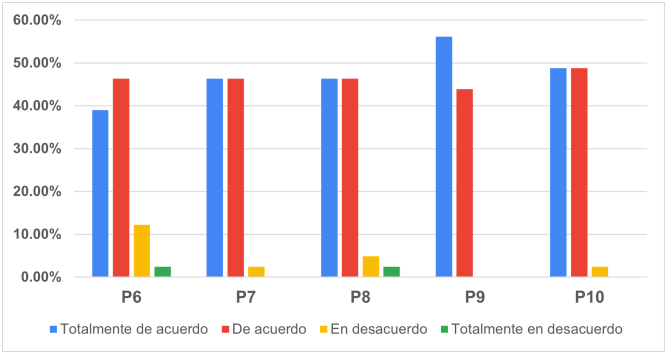


Fig. 9. Distribución de respuestas para preguntas P6-P10.

En la pregunta P6, el (14.63%, n = 6) de los estudiantes indicaron que la accesibilidad al laboratorio no fue la adecuado debido a problemas técnicos experimentados con sus buscadores web como Google Chrome o Mozilla Firefox. Debemos indicar que debido a que el protocolo de video en tiempo real del laboratorio es WebRTC, se necesita una versión mínima de navegador web para Google Chrome. Otras versiones de navegadores como Mozilla Firefox o Microsoft Edge no son soportados, lo cual puede representar problemas de accesibilidad al laboratorio. A pesar de esto, el 85.37% de los estudiantes están totalmente de acuerdo o de acuerdo con que el acceso al laboratorio remoto fue sencillo y rápido.

También en la pregunta P8 sobre si la interfaz del laboratorio fue sencilla e intuitiva de aprender, (2.38%, n = 2) estudiantes estuvieron en desacuerdo en este punto. Algunos estudiantes entraron a la interfaz desde su teléfono celular y dada la naturaleza de los bloques gráficos o incluso el modo en texto, programar puede resultar difícil como asimismo acceder a las diversas características del laboratorio remoto. Por esta razón, indicamos a los estudiantes que entraran desde sus computadores. Sin embargo, esto nos permitió robustecer los materiales educativos que dieron soporte al laboratorio remoto. Adicionalmente, las respuestas a la pregunta P9 sobre si la ejecución de los algoritmos fue ágil y si estos se pudieron contrastar con el video en tiempo real, nos permite establecer que el laboratorio responde a las características de experimentación de una forma rápida sin una excesiva latencia en el componente de video.

Finalmente, la Fig.10 muestra la distribución para las preguntas P11-P12.

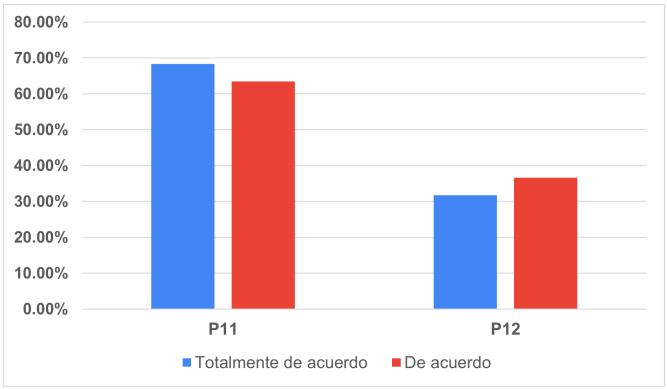


Fig. 10. Distribución de respuestas a las preguntas P11-P12.

Para estas preguntas, el 68.29% de los estudiantes está totalmente de acuerdo en que el laboratorio remoto sea incluido en otras materias del currículo, en este caso de ingeniería de sistemas. Además de ello, el 63.41% esta totalmente de acuerdo en que usarían el laboratorio remoto en sus espacios libres con fines de aprendizaje. Esto demuestra que características del laboratorio como accesibilidad, facilidad de uso, facilidad de experimentación o modos de programación por bloques o texto permiten el aprendizaje de los estudiantes y los motiva en las temáticas vistas. Por último, los estudiantes evaluaron de manera general el laboratorio con un valor promedio de 4.44 sobre 5.0.

B. Comentarios de los estudiantes

Como se describió, la encuesta aplicada tuvo tres preguntas abiertas con las cuales identificamos el modo de programación que les resultaba interesante a los estudiantes y los aspectos positivos y por mejorar en el laboratorio remoto. La Tabla 5 muestra una síntesis de los comentarios de los estudiantes. En estos se evidencia que el video en tiempo real tuvo varios problemas, especialmente en conexiones con una baja velocidad de internet. Estos problemas han sido mejorados para ofrecer a los estudiantes una mejor herramienta de aprendizaje.

TABLA V
SÍNTESIS DE LOS COMENTARIOS DE LOS ESTUDIANTES. E: ESTUDIANTE.

Característica	Comentarios
Modo de programación	**E13.** «Yo prefiero la programación en bloques porque es una manera mas innovadora de poder programar, ya que el código ya esta plasmado, lo único que hay que hacer es saber el orden en que hay que acomodarlos.» **E27.** «Me gusta más la programación con código porque con ello es mas entendible que elemento voy a usar y como se debe asignar.» **E33.** «Prefiero código, ya que es una manera mas organizada a la hora de programar, y nos ayuda a enfrentarnos a posteriores entornos de programación.» **E34.** «Prefiero código. Pienso que cuenta con mayor usabilidad, ya que es una forma de familiarizarme con el entorno de la programación» **E41.** «La programación por bloques, me pareció mejor ya que podía entender y comprender más las sentencias y la funcionalidad de cada línea.»
Aspectos positivos	**E20.** «Me gusto que las funciones que se le indicaban al laboratorio se ejecutaran en tiempo real en el laboratorio físico fue lo mas interesante a mi parecer.» **E37.** «Me gusto mucho realizar la actividad ya que nos permite ver y analizar cada parte importante del código, además de los elementos como el video que cada vez que reproducimos el código podemos observar si funciona.» **E40.** «El acceso a las herramientas del laboratorio de universidad de forma virtual me parece sumamente atractivo, mas que todo por su facilidad de uso.» **E41**. «El poder interactuar con diferentes herramientas, como el brazo robótica, el display, la pantalla LCD, y los sensores, ya que permite aprender diferentes modalidades y funcionalidades de código»
Aspectos por mejorar	**E24.** «La conexión de algunas cuentas, tuvimos algunos inconvenientes con el tema de el ingreso al Laboratorio.» **E41**. «La estabilidad de las cámaras, en ocasiones se pierde la señal.» **E37.** «me gustaría que mejore la parte que se puedan trabajar con varios compañeros al mismo tiempo.»

V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este estudio presentamos un laboratorio remoto de bajo coste para el aprendizaje de temáticas relacionadas con IoT, protocolo LoRa y programación en Python. El laboratorio usa elementos de hardware como Raspberry Pi, sensores de temperatura, humedad, luz ambiente, módulo LoRa, display LCD o robot en impresión 3D. Estos dispositivos pueden ser manejados por los estudiantes a través de dos modos de programación mediante bloques gráficos y directamente en texto usando las instrucciones propias del lenguaje Python. Sumado a ello, el laboratorio incorpora una consola en tiempo real para la depuración de los Scripts en Python, un graficador en tiempo real, y diversos ejemplos con los que los estudiantes pueden aprender y familiarizarse con este. De acuerdo con los resultados de las encuestas aplicadas a los estudiantes, el laboratorio remoto es considerado: (1) una herramienta que propicia el aprendizaje y la motivación, (2) permite aplicar las temáticas vistas y enlazarlas con aplicaciones en el mundo real y (3) permite trabajar de manera remota en espacios de tiempo durante y después de las clases. Asimismo, los estudiantes están de acuerdo con que se incorpore el laboratorio remoto en otras materias del currículo y a usarlo en tiempos libres para aprender. Por último cabe indicar que los problemas señalados por los estudiantes se han corregido, especialmente en el video en tiempo real y se planea incorporar nuevos elementos para trabajar con IoT y otros protocolos industriales como Modbus o Profinet para habilitar las funcionalidades del laboratorio remoto en temáticas relacionadas con industria 4.0.

REFERENCIAS

[1] I. Gustavsson, K. Nilsson, J. Zackrisson, J. Garcia-Zubia, U. Hernandez-Jayo, A. Nafalski, Z. Nedic, O. Gol, J. Machotka, M. I. Pettersson *et al.*, "On objectives of instructional laboratories, individual assessment, and use of collaborative remote laboratories," *IEEE Transactions on learning technologies*, vol. 2, no. 4, pp. 263–274, 2009.

[2] M. Cooper and J. M. Ferreira, "Remote laboratories extending access to science and engineering curricular," *IEEE Transactions on learning technologies*, vol. 2, no. 4, pp. 342–353, 2009.

[3] M. Hernández-de Menéndez, A. Vallejo Guevara, and R. Morales-Menendez, "Virtual reality laboratories: a review of experiences," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 13, pp. 947–966, 2019.

[4] F. García-Loro, A. Macho, M. Castro, G. R. Alves, M. A. Marques, N. Lima, L. Rodríguez-Gil, R. Najimaldeen, and R. M. Fernández, "Remote laboratory visir: recent advances, initiatives, federation, limitations and future," in *2021 IEEE global engineering education conference (EDUCON)*. IEEE, 2021, pp. 1754–1757.

[5] C. J. García-Orellana, M. Macias-Macías, E. Abengózar-García, H. González-Velasco, R. Gallardo-Caballero, and A. García-Manso, "Remote laboratory platform for microcontroller practices," in *2022 Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (XV Technologies Applied to Electronics Teaching Conference)*. IEEE, 2022, pp. 1–5.

[6] R. Navas-González, Ó. Oballe-Peinado, J. Castellanos-Ramos, D. Rosas-Cervantes, and J. A. Sánchez-Durán, "Practice projects for an fpga-based remote laboratory to teach and learn digital electronics," *Information*, vol. 14, no. 10, p. 558, 2023.

[7] A. Fernández-Pacheco, S. Martin, and M. Castro, "Implementation of an arduino remote laboratory with raspberry pi," in *2019 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. IEEE, 2019, pp. 1415–1418.

[8] S. Martin, A. Fernandez-Pacheco, J. A. Ruipérez-Valiente, G. Carro, and M. Castro, "Remote experimentation through arduino-based remote laboratories," *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologias del Aprendizaje*, vol. 16, no. 2, pp. 180–186, 2021.

[9] J. B. da Silva, G. de Oliveira, I. N. da Silva, P. M. Mafra, and S. M. S. Bilessimo, "Block. ino: Remote lab for programming teaching and learning," *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, vol. 7, 2020.

[10] M. Ramya, G. Purushothama, and K. Prakash, "Design and implementation of iot based remote laboratory for sensor experiments," 2020.

[11] K. M. Al-Aubidy, A. W. Al-Mutairi, and H. Z. Al-Kashashneh, "Iot based remote laboratory for solar energy experiments: Design and implementation," in *2021 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*. IEEE, 2021, pp. 47–52.

[12] J. Á. Ariza and S. G. Gil, "Raspylab: A low-cost remote laboratory to learn programming and physical computing through python and raspberry pi," *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologias del Aprendizaje*, vol. 17, no. 2, pp. 140–149, 2022.
[13] J. Á. Ariza and C. N. Galvis, "Raspycontrol lab: A fully open-source and real-time remote laboratory for education in automatic control systems using raspberry pi and python," *HardwareX*, vol. 13, p. e00396, 2023.
[14] A. Amirante, T. Castaldi, L. Miniero, and S. P. Romano, "Performance analysis of the janus webrtc gateway," in *Proceedings of the 1st Workshop on All-Web Real-Time Systems*, 2015, pp. 1–7.
[15] J. Koch and W. Hao, "Apache and http/2 in the cloud: A comparative study of apache architecture in aws," in *2021 IEEE 12th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*. IEEE, 2021, pp. 0673–0680.
[16] D. Eddelbuettel, "A brief introduction to redis," *arXiv preprint arXiv:2203.06559*, 2022.
[17] C. H. Yu, "An introduction to computing and interpreting cronbach coefficient alpha in sas," in *Proceedings of 26th SAS User Group International Conference*, vol. 2225. SAS Institute Inc. Cary, NC, 2001, pp. 1–6.

Enseñanza Práctica de Controladores PID Digitales

Santiago Tainta Ausejo
Departamento de ingeniería eléctrica electrónica y comunicación
Public University of Navarre
Pamplona, Spain
santiago.tainta@unavarra.es
Orcid: 0000-0003-1271-2593

Carlos A. De La Cruz Blas
Departamento de ingeniería eléctrica electrónica y comunicación
Public University of Navarre
Pamplona, Spain
carlos.aristoteles@unavarra.es
Orcid: 0000-0002-4136-5079

Jaime Cid Monjaraz
Facultad de ciencias de la electrónica
Benemerita Universidad Autonoma de Puebla
Puebla, Mexico
jaime.cid@correo.buap.mx
Orcid: https: 0000-0001-5356-1600

***Resumen*— Los controladores PID son un componente fundamental de los sistemas de control industrial. En este trabajo se presenta un sencillo demostrador que puede montarse utilizando componentes electrónicos básicos y una placa de desarrollo Arduino UNO como planta y controlador digital respectivamente. El sistema completo puede construirse fácilmente utilizando componentes que suelen estar disponibles en un laboratorio de electrónica básica, evitando sistemas mecánicos o electromecánicos. El sistema propuesto es abierto y flexible, permitiendo el estudio de sistemas de control digital PID y la evaluación experimental de diferentes métodos de sintonización.**

***Keywords*— PID, Arduino UNO, PWM, filtro Sallen-Key**

I. INTRODUCCIÓN

Los controladores Proporcional-Integral-Derivativo (PID) son un concepto fundamental en el control automático debido a su eficacia y amplia gama de aplicaciones. [1]. Debido a su uso generalizado en la industria, el diseño del control PID desempeña un papel crucial a la hora de dotar a los estudiantes universitarios de ingeniería de control de los conocimientos esenciales. Sin embargo, la incorporación de una enseñanza eficaz del control PID, que incluya ejercicios de laboratorio, supone un reto en estos cursos [2]. Esta dificultad se debe a la complejidad inherente al control PID y a la brecha existente entre la teoría y las aplicaciones reales relevantes para la industria. Para salvar esta distancia, los programas de simulación como Matlab ofrecen una valiosa herramienta de exploración teórica. [3]. Sin embargo, estas simulaciones carecen de la experiencia práctica necesaria para consolidar los conocimientos teóricos. Los experimentos de laboratorio existentes suelen requerir equipos especializados [4] o montajes complicados [5], por lo que resultan inadecuados para una clase de introducción a la electrónica, ya que el tiempo lectivo es limitado y los temarios suelen ser extensos.

Este trabajo aborda este reto proponiendo un sistema sencillo y asequible para estudiar el control PID digital basado únicamente en componentes electrónicos, evitando así complicados sistemas mecánicos o electromecánicos sensorizados y centrándose exclusivamente en los conceptos de control. El sistema utiliza un filtro de segundo orden como modelo de planta, que puede implementarse fácilmente con componentes electrónicos básicos como resistencias, condensadores y amplificadores operacionales. Una placa de desarrollo Arduino UNO sirve de plataforma para implementar la entrada, la señal de error y el algoritmo de control PID, proporcionando una interfaz fácil de usar y accesible para el estudiante. La flexibilidad inherente del sistema permite una fácil adaptación a los planes de estudios de diferentes cursos, lo que permite a los instructores adaptar el experimento a los objetivos específicos de aprendizaje y mejorar la comprensión de los estudiantes de los principios de control PID en los sistemas de retroalimentación.

II. CONTEXTUALIZACIÓN

El objetivo del demostrador propuesto es facilitar a los estudiantes la comprensión del funcionamiento de los sistemas de bucle cerrado mediante la experimentación práctica con hardware real. Para ello es necesario tener conocimientos básicos sobre lazos de control, controladores PID y métodos de ajuste, que pueden adquirirse en un curso básico de control automático. Este conocimiento garantizará una comprensión completa de las funcionalidades del demostrador.

Más allá de estos conceptos básicos, la propuesta puede adaptarse para incorporar resultados de aprendizaje adicionales. Por ejemplo, la planta, implementada mediante un filtro electrónico, puede estudiarse proporcionando directamente a los alumnos su función de transferencia o encargándoles que realicen ellos mismos el análisis, reforzando conceptos tratados en cursos de electrónica anteriores. Del mismo modo, la programación basada en Arduino es sencilla y puede ejecutarse con conocimientos básicos de programación. Sin embargo, para enfatizar las habilidades de programación, los estudiantes podrían ser asignados con el uso de programación de microcontroladores de bajo nivel y el uso de bibliotecas avanzadas como CMSIS DSP Software library's PID [6]. Para los cursos que buscan una comprensión más completa de la programación del bucle de control, el ejercicio puede ampliarse para incluir el desarrollo completo del bucle de control digital. Además, el ejercicio puede enriquecerse aún más incorporando la implementación del bucle de control utilizando componentes electrónicos analógicos, reforzando la conexión con cursos de electrónica anteriores. Esta adaptabilidad hace que el demostrador propuesto sea adecuado para diversos entornos de aprendizaje y estudiantes con formación variada.

III. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

El demostrador propuesto se basa en el uso de un filtro paso bajo de segundo orden Sallen-key como planta para generar una tensión continua a partir de una señal de modulación por ancho de pulso (PWM) de entrada. Las señales PWM son ondas cuadradas con un periodo T definido y una duración de pulso variable. El término "ciclo de trabajo" (D) se define como la relación entre el tiempo, τ, que la señal está en su valor alto y el periodo de la señal, es decir, $D = \tau/T$. Una característica crucial delas señales PWM es la capacidad de modular el ciclo de trabajo basado en una señal analógica. Esta capacidad permite a las señales PWM transportar información, como puede verse en la Fig. 1. Cuando es la señal generada por un microcontrolador, la

tensión mínima ($y_{\min}$) corresponde a un valor entre 0 y V_{OL}, mientras que la tensión máxima ($y_{\max}$)) corresponde a un valor entre V_{OH} y V_{CC}. Los microcontroladores son especialmente aptos para generar señales PWM debido a su eficiencia inherente y a su facilidad de uso. Esta aptitud explica la adopción generalizada de PWM en diversas aplicaciones.

El valor medio (denominado aquí $\bar{y}$) de una señal PWM depende directamente del ciclo de trabajo (D). Esta relación puede expresarse matemáticamente calculando la tensión media a lo largo de un único periodo (T), obteniéndose la siguiente expresión:

$$\bar{y} = D \cdot y_{max} + (1 - D) \cdot y_{min} \tag{1}$$

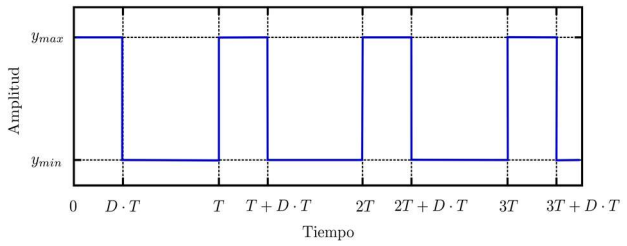


Fig. 1. Ejemplo de señal PWM con $D = 0.33$

Sin embargo, para obtenerla de forma experimental con dispositivos electrónicos, se suele emplear un filtro paso bajo. La Fig. 2 muestra el espectro de frecuencias de la señal, $Y(f)$, junto con la respuesta del filtro, representada con una línea roja. Un filtro de paso bajo extrae eficazmente el nivel de continua correspondiente al valor medio de la señal PWM atenuando el resto de componentes de alta frecuencia. Dado que el filtrado no es ideal, no se producirá un rechazo abrupto (la línea roja tiene cierta pendiente), por lo que el resultado presentará cierto rizado si las componentes de frecuencia más alta no se atenúan lo suficiente. Por tanto, es necesario seleccionar adecuadamente la frecuencia de corte del filtro en función de la frecuencia de la señal PWM. Un valor bajo de f_c resultará en un buen filtrado, sin embargo, tendrá un transitorio lento. Por el contrario, un valor alto tendrá transitorios más rápidos, pero el resultado presentará cierto rizado.

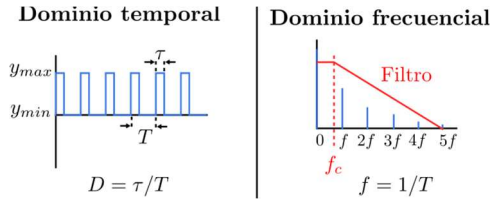


Fig. 2. Representación en los dominios del tiempo (izquierda) y freqcuencia (derecha) para una señal PWM.

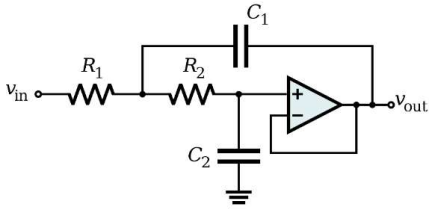


Fig. 3. Filtro Sallen-Key paso bajo de segundo orden usado como planta.

Para implementar el filtro paso bajo, se seleccionó una configuración Sallen Key de segundo orden, cuya implementación puede verse en la Fig. 3. Este filtro tiene una función de transferencia dada por:

$$P(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\alpha s + \frac{2}{0}} \tag{2}$$

donde ω_o corresponde al a frecuencia natural, α es el factor de atenuación y Q es el factor de calidad. Sus valores vienen dados por:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \tag{3}$$

$$2\alpha = \frac{\omega_0}{Q} = \frac{1}{C_1}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = \frac{1}{C_1}\left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}\right) \tag{4}$$

$$Q = \frac{\omega_0}{2\alpha} = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{C_2 (R_1 + R_2)} \tag{5}$$

El factor Q determinará la anchura y altura del pico en la respuesta en frecuencia. Un valor elevado de Q resultará un una sobre oscilación en la respuesta temporal. Asimismo, sus polos están situados en:

$$s = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \tag{6}$$

IV. Control de la planta

La respuesta temporal de la planta propuesta está influida por diversos factores, como Q. Esta dependencia puede dar lugar a características de respuesta no deseadas en el dominio temporal. Sin embargo, modificar la propia planta puede resultar poco práctico o indeseable en la mayoría de los escenarios reales. En tales casos, puede implementarse un sistema de control para regular la entrada de la planta de forma selectiva, modificando eficazmente la respuesta y consiguiendo el resultado deseado.

En un sistema de control por realimentación, la salida de la planta se mide y se devuelve al controlador. El controlador compara esta señal de realimentación con una señal de referencia deseada. Esta comparación genera una señal de error, que representa la desviación de la respuesta deseada. En función de la señal de error, el controlador calcula una entrada de control adecuada para la planta. El diseño y el ajuste del controlador son fundamentales para garantizar que el sistema alcance la respuesta deseada manteniendo la estabilidad y la robustez.

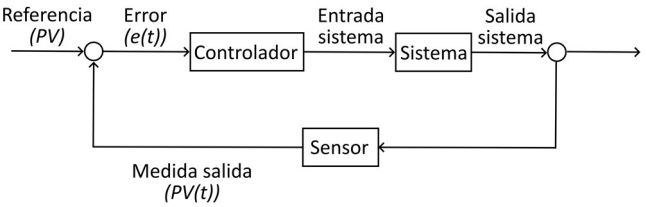


Fig. 4. Sistema de lazo cerrado

Los controladores PID [7] son herramientas ubicuas en el ámbito de la automatización industrial. Se emplean ampliamente para regular diversas variables de proceso como temperatura, presión, caudal o velocidad en una amplia gama de sistemas. Su eficacia radica en su capacidad para ajustar continuamente una señal de salida en función de la diferencia

entre un valor de consigna deseado y el valor real medido en el sistema (planta). Estos reguladores utilizan una fórmula matemática para calcular la señal de control enviada a la planta en función de la señal de error $e(t)$. Esta señal de error representa la diferencia entre la consigna deseada (SP) y la salida real (PV) de la planta:

$$\mathrm{e(t)} = \mathrm{SP} - \mathrm{PV(t)} \tag{7}$$

El controlador PID combina tres términos de control: proporcional (P), integral (I) y derivativo (D). Cada término contribuye de forma diferente a la acción de control global. El término proporcional es directamente proporcional al error actual. Proporciona una respuesta inmediata a cualquier desviación del valor de consigna. El término integral acumula el error a lo largo del tiempo. Esto ayuda a eliminar los errores de estado estacionario, en los que el error permanece constante incluso después de que el término proporcional haya alcanzado su valor máximo o mínimo. El término derivativo tiene en cuenta la velocidad de cambio de la señal de error. Ayuda a anticipar futuros errores y proporciona una respuesta más rápida a los cambios repentinos. Así pues, la respuesta global del regulador viene dada por:

$$C(s) = \mathrm{k_p} + \frac{k_i}{s} + k_d s \tag{8}$$

Mediante el ajuste de las ganancias proporcional, integral y derivativa ($\mathrm{k_p}$, k_i, k_d), los ingenieros pueden afinar el comportamiento del controlador PID para lograr las características de respuesta deseadas para el sistema específico bajo control. Este proceso de ajuste a menudo implica equilibrar factores como la velocidad de respuesta, el tiempo de estabilización y la estabilidad del sistema.

V. Implementación de la Propuesta

El sistema propuesto se introdujo en un curso especializado en Sistemas IoT impartido por la Universidad Pública de Navarra. El curso constaba de cuatro módulos, siendo la propuesta parte del Módulo II centrado en Sistemas Electrónicos Embebidos. Este módulo combinaba sesiones teóricas de 2 horas con sesiones de laboratorio de 6 horas, con una duración total de 36 horas. El módulo cubría diferentes temas como microcontroladores, comunicaciones, sensores y actuadores. El sistema propuesto se estudió dentro de esta última parte con el objetivo de explorar la implementación de lazos de control y su sintonía. Para ello, se esperaba que los alumnos tuvieran ciertos conocimientos previos, como el montaje de sistemas electrónicos en placas de prototipado, la programación a bajo nivel de Arduino y los conocimientos teóricos sobre lazos de control, tratados en clase.

La parte práctica dedicada a los actuadores comprendía tres sesiones de laboratorio de 2 horas divididas en dos bloques distintos. El primer bloque, de 4 horas, se centró en la implementación del sistema propuesto. Este bloque se dividió a su vez en dos sesiones de laboratorio de 2 horas de duración para lograr una experiencia de aprendizaje más estructurada. El segundo bloque, compuesto por las 2 horas restantes, abordó el estudio del control de motores DC mediante señales PWM. Las siguientes secciones ofrecen una descripción exhaustiva del material tratado en cada sesión del primer bloque.

A. Primera sesión

La primera sesión de laboratorio se dedica a la implementación y el estudio de la planta, es decir, el filtro Sallen Key de segundo orden. Los valores seleccionados para los componentes del filtro fueron $R_1 = R_2 = 270\,K\Omega$, $C_1 = 10\,\mu F$ y $C_2 = 47\,nF$, lo que da como resultado un filtro con un factor Q de 7,3 y una frecuencia de corte de 0,86 Hz. El ejercicio de laboratorio comienza simulando el circuito utilizando el software LTSpice. Esto permite a los estudiantes predecir la respuesta teórica, en particular el diagrama de Bode y la respuesta escalonada del circuito diseñado. Tras el montaje, los estudiantes comparan el diagrama de Bode obtenido experimentalmente con la predicción teórica. Esta comparación sirve para validar los resultados de la simulación y evaluar el impacto de las tolerancias de los componentes en un entorno real. A continuación, los alumnos evalúan la respuesta temporal del sistema a una entrada escalonada de 0 V a 1 V, comparándola con la simulación. La respuesta resultante, como se muestra en la Fig. 5, presenta un sobre impulso significativo y un tiempo de estabilización prolongado. Estas características sugieren que, aunque el sistema puede extraer el valor medio de una señal PWM, su lenta respuesta limita sus aplicaciones prácticas.

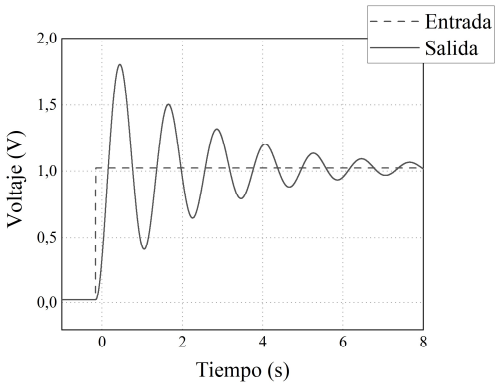


Fig. 5. Respuesta ante una entrada escalón de la planta

Una vez estudiada la respuesta escalón, se pide a los alumnos que introduzcan una señal PWM que modifique su ciclo de trabajo entre 0% y 50%. Esta señal se genera utilizando un Arduino UNO, al que se le proporciona una referencia entre 0 y 255 para modificar el ciclo de trabajo de la señal PWM y, de esta forma, establecer una tensión proporcional a la salida del filtro. El alumno puede comprobar que, aunque la planta es capaz de extraer el valor medio de la señal de entrada, presenta una respuesta temporal con una gran sobre oscilación y un tiempo de establecimiento muy elevado, lo que hace que el sistema no cumpla su finalidad, como se puede observar en la Fig. 6. Para verificar que la respuesta observada no es un rizado atribuible a la presencia de componentes espectrales de orden superior, se indica a los estudiantes que incrementen la frecuencia desde el ajuste por defecto de Arduino de 490Hz hasta 31250Hz. Los resultados obtenidos a la frecuencia más alta siguen siendo consistentes, lo que indica que la respuesta no depende de la frecuencia PWM, sino un resultado de la respuesta del filtro.

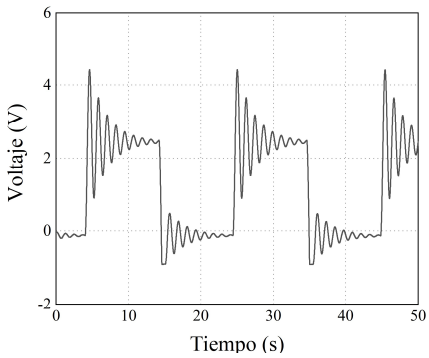


Fig. 6. Salida del sistema al cambiar el ciclo de trabajo de la señal PWM de entrada.

B. Segunda sesión

La segunda sesión de laboratorio aborda el problema de estabilización identificado anteriormente. Se presenta a los estudiantes el diseño de un sistema de control de bucle cerrado (Fig. 7) en el que el Arduino UNO utiliza su convertidor analógico-digital (ADC) para medir la tensión de salida filtrada. Este valor medido se compara con una referencia, generando una señal de error. A continuación, un controlador PID digital implementado en el software Arduino calcula el ciclo de trabajo adecuado para la señal PWM, regulando eficazmente la salida del sistema. Para facilitar la implementación en la sesión de dos horas, se proporciona a los estudiantes un esquema del código básico a emplear utilizando una biblioteca externa [8].

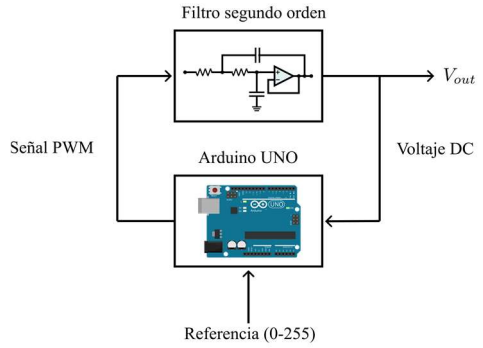


Fig. 7. Sistema de bucle cerrado utilizando Arduino Uno como sensor, controlador y generador de entrada.

Tras el montaje del sistema, los estudiantes se embarcan en la tarea crucial de ajustar el controlador para mejorar el rendimiento general del sistema. Aunque se podían utilizar varios métodos de ajuste, tanto teóricos como experimentales, se consideró que un enfoque práctico era más adecuado para estas sesiones de laboratorio. Para ello, se presentó a los alumnos el método Ziegler-Nichols de lazo cerrado [1]]. Este método consiste en identificar el punto en el que el sistema empieza a oscilar al aumentar k_p, como se puede observar en la Fig. 8. Basándose en los valores de ganancia crítica (k_c) y periodo crítico (T_u) obtenidos en este punto, los estudiantes pueden calcular las correspondientes ganancias proporcional (k_p), integral (k_i) y derivativa (k_d) para ajustar el controlador PID.

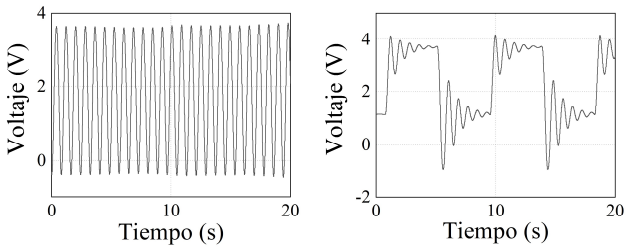


Fig. 8. Salida del sistema (izda.) con $k_p = 0.45$ y $T_u = 0.8s$ y después del ajuste de los parámetros (dcha.) dea cuerdo al método de Ziegler-Nichols.

Una vez fijadas estas ganancias, se anima a los estudiantes a evaluar el funcionamiento del sistema y discutir los resultados observados. Esta evaluación se centra en cómo la respuesta pasa del sobre impulso que puede verse en la Fig. 6 a una trayectoria suave al modificar el ciclo de trabajo de la señal PWM. Sin embargo, como puede verse en la Fig. 8, la respuesta presenta todavía algunas oscilaciones que la hacen inadecuada para un sistema real Para superar este problema, se anima activamente a los estudiantes a modificar de forma independiente los parámetros de sintonía calculados para observar el efecto resultante sobre la señal de salida. Esta exploración práctica les permite obtener una comprensión más profunda de la relación entre las ganancias del controlador y el comportamiento del sistema, siendo capaces de mejorar la respuesta del sistema a un comportamiento casi libre de oscilaciones (Fig. 9). Mientras que la implementación actual se centra en la experiencia práctica de laboratorio, una mayor exploración del comportamiento del sistema podría lograrse a través de software de simulación como Matlab. Este análisis complementario tiene el potencial de proporcionar información valiosa sobre el impacto de diversos parámetros en el rendimiento del sistema. Sin embargo, por falta de tiempo, este aspecto no se incluyó en la presente iteración.

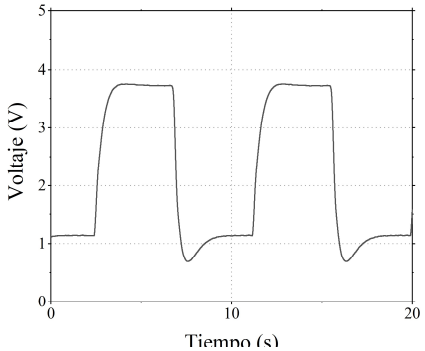


Fig. 9. Salida del sistema tras ajustar los parámetros del controlador PID.

VI. CONCLUSIONES

Este artículo presenta un sistema sencillo y asequible para estudiar el control digital PID. El sistema propuesto utiliza un filtro de segundo orden fácil de implementar como modelo de planta y un Arduino UNO para la realizar el control, lo que lo hace accesible para fines educativos. Los estudiantes pueden observar de primera mano las limitaciones de la planta no controlada, caracterizada por una respuesta lenta y un sobre impulso significativo. La introducción de un sistema de control en lazo cerrado con un controlador PID proporciona una clara demostración de su eficacia para mitigar estas limitaciones. Mediante la implementación de un controlador PID y el empleo de varios métodos de ajuste, en particular el enfoque práctico de Ziegler-Nichols, los estudiantes participan activamente en el proceso de optimización. Esta

experiencia práctica les permite profundizar en el conocimiento de la relación entre las ganancias del controlador y el comportamiento del sistema, tendiendo un puente entre los conceptos teóricos y las aplicaciones en el mundo real.

El sistema propuesto ofrece una valiosa herramienta para los educadores que pretendan dotar a los estudiantes de las habilidades y la experiencia práctica necesarias en el control PID digital. Esto es especialmente importante, ya que el control PID sigue siendo un concepto fundamental en el ámbito de los sistemas de control automático. La asequibilidad y flexibilidad del sistema lo convierten en un complemento adecuado para los cursos universitarios de ingeniería de control. Los instructores pueden adaptar el experimento a objetivos de aprendizaje específicos, fomentando una comprensión más profunda de los principios de control PID. Las mejoras futuras podrían incluir la exploración de diseños de filtro alternativos, la incorporación de algoritmos de control adicionales y el desarrollo de un módulo de aprendizaje complementario con fundamentos teóricos y ejercicios guiados. Estas mejoras aumentarían aún más el valor educativo del sistema propuesto.

REFERENCIAS

[1] K. Ogata, Modern Control Engineering, Pearson, 2010.

[2] N. Wang, J. Zhu, Q. Lan, X. Chen, G. Song, and H. Parsaei, “Integration of a remote PID motor speed control experiment with teaching in engineering education,” Engineering Education Letters, 2017.

[3] L. Q. Tran, Y. Sun, R. Guan, J. Saeed, L. Wang y P. J. Radcliffe, «Development and Outcomes of Teaching PID Control in Classroom with Hands on Learning Experience,» de 2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Melbourne, 2019

[4] M. Gunasekaran and R. Potluri, "Low-cost undergraduate control systems experiments using microcontroller-based control of a dc motor", IEEE Transactions on Education, vol. 55, no. 4, pp. 508-516, 2012.

[5] https://controlautomaticoeducacion.com/arduino/control-pid-de-temperatura-con-arduino

[6] https://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/DSP/html/group__PID.html

[7] K. Ogata, Discrete-time control systems, Prentice-Hall, Inc, 1995.

[8] https://github.com/br3ttb/Arduino-PID-Library

Aprendizaje Basado en Proyectos de Electrónica Aplicada

Federico Barrero
Dpto. de Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
fbarrero@us.es

Jose L. Mora
Dpto. de Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
jolumo@us.es

Manuel A. Perales Esteve
Dpto. de Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
mperales@us.es

***Abstract*— La reciente puesta en marcha de planes de estudio relacionados con la Ingeniería y el Espacio Europeo de Educación Superior ha favorecido la implantación de nuevas metodologías docentes de tipo práctico y de titulaciones cercanas al sector productivo. La puesta en marcha de experiencias educativas prácticas atractivas para el alumnado se antoja como una tarea compleja, que plantea dudas entre el profesorado y requiere de un notable cambio de la metodología docente que predomina en el aula. En este trabajo se presenta el desarrollo de dos sistemas mecatrónicos de bajo coste realizados por alumnos del grado y máster de Ingeniería Industrial en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, utilizados durante el curso 2022-2023 como método de aprendizaje y forma de evaluación en dos asignaturas y que, posteriormente, se han extendido y concretado en un trabajo de fin de grado y otro trabajo de fin de master. Los sistemas desarrollados integran aspectos relacionados con la electrónica, la mecánica y la informática, basándose en cuerpos articulados impresos a partir de modelos 3D y con un elemento central que aloja una placa microcontroladora, base del sistema embebido que controla el mecanismo.**

Keywords*— *Aprendizaje basado en proyectos, electrónica aplicada, mecatrónica.

I. INTRODUCCIÓN

La creación del Espacio Europeo de Educación Superior (EEES) ha supuesto la adopción de una nueva organización de los estudios universitarios oficiales [1]. Los cambios han afectado a la organización de la enseñanza universitaria, la organización de los estudios a partir del trabajo del estudiante y la adopción del Crédito Europeo como la unidad de medida y la formación en competencias. Así, muchos de los grados de ingeniería habilitantes se han desarrollado con idea de acercar a los profesionales de nueva formación a las tecnologías innovadoras, aumentando la carga lectiva práctica de los estudios. Este es el caso de los diferentes Grados de Ingeniería que se imparten en la Universidad de Sevilla.

A pesar del esfuerzo realizado [2], creemos importante incidir en el hecho de la existencia de una resistencia del entorno Universitario a favorecer el cambio descrito anteriormente [3], [4]. En la práctica, existe una escasa coordinación, o como poco una coordinación necesariamente mejorable, entre las asignaturas que aparecen en los diferentes planes de estudio. Si bien se presupone que la coordinación descrita es fundamental para el desarrollo de una docencia de calidad, ésta es mejorable en la mayoría de los casos por la inexistencia de mecanismos efectivos de coordinación interdepartamentales. Un caso evidente de esta falta de coordinación aparece en la carga lectiva de tipo práctico que recibe el alumno de los nuevos grados y másteres, que habitualmente no se coordina entre las diferentes asignaturas de un departamento y menos aún entre las diferentes asignaturas de la titulación.

Este artículo muestra los resultados que pueden conseguirse con una mínima coordinación entre asignaturas de cualquier titulación. En nuestro caso, hemos cambiado la metodología docente de dos asignaturas, centrándolas en un aprendizaje basado en proyectos (ABP) en la que el estudiante se convierte en protagonista de su propio aprendizaje y donde el aprendizaje de conocimientos tiene la misma importancia que la adquisición de habilidades y actitudes [5], convergiendo los sistemas electrónicos desarrollados por los alumnos con los trabajos de desarrollo e investigación realizados en el Dpto. de ingeniería Electrónica de la Universidad de Sevilla [6]-[10].

En este artículo se presentan dos de los sistemas que se han desarrollado por parte de los alumnos: un robot hexápodo y un brazo robótico articulado. Ambos dispositivos incorporan diferentes elementos electrónicos y mecánicos para lograr su movimiento, tanto manual como autónomo, en sus diversos grados de libertad e integran la impresión 3D para ilustrar sus posibles usos y explorar la intersección de dos tecnologías avanzadas como son la robótica y la impresión 3D. Al tratarse de proyectos aplicables al entorno industrial, se han integrado diferentes sensores, actuadores y sistemas electrónicos analógicos y digitales, desarrollándose dos prototipos de sistemas robóticos que combinan eficazmente aspectos de la electrónica, el control y la mecánica y que pueden interactuar de manera inteligente con su entorno. En la sección II se describe, brevemente, el contexto docente y las asignaturas que han servido de punto de partida para los sistemas desarrollados. Posteriormente, en la sección III se describen las características principales de los sistemas desarrollados, así como los resultados obtenidos en ambos proyectos. Las conclusiones alcanzadas se detallan en la sección IV.

II. PUNTO DE PARTIDA: CONTEXTO DOCENTE

La metodología docente empleada implica que los estudiantes diseñen, desarrollen y construyan soluciones prácticas a un problema, en equipos pequeños de no más de dos alumnos, desarrollando la capacidad creativa de los estudiantes para resolver problemas difíciles [11]. Se han planteado trabajos adecuados a los contenidos docentes de las asignaturas, que pueden ser complementados en otras asignaturas de la titulación, y que, en los dos casos que se presentan, han constituido la base de un Trabajo de Fin de Grado y un Trabajo de Fin de Máster.

A. Electrónica Industrial

La asignatura está adscrita al cuarto curso de la titulación de Grado de Ingeniero en Tecnologías Industriales, e impartida durante el primer cuatrimestre en la Escuela Técnica Superior de Ingenierías de la Universidad de Sevilla [12]. El plan de estudios y la descripción de la asignatura aparecen recogidos en las resoluciones de 20 de julio de 2011 y 15 de abril de 2015 de la Universidad de Sevilla, en las que se

publica el plan de estudios de Graduado en Ingeniería de Tecnologías Industriales, BOE de 11 de Octubre de 2011, Núm. 245, y BOE de 19 de Mayo de 2015, Núm. 119, respectivamente. En ellas se establece que la asignatura es obligatoria para la especialidad de Electrónica Industrial, con 6 créditos asignados, de los cuales 3 corresponden a créditos teóricos y 3 a créditos prácticos o de laboratorio (2 horas de clases teóricas y de clases prácticas a la semana durante el primer cuatrimestre lectivo). Los descriptores de la asignatura incluyen los sistemas lógicos programables, microprocesadores y periféricos, microcontroladores, procesadores digitales de señal, sistemas empotrados y codiseño hardware/software, siendo la metodología docente empleada la siguiente:

- Clases magistrales de teoría en pizarra con apoyo gráfico de transparencias, centradas en el diseño de sistemas electrónicos basado en microprocesador y en la arquitectura del DSP TMS320F28335 (ver Fig. 1).
- Prácticas de laboratorio obligatorias para introducir al alumno en el manejo del entorno de programación Code Composer Studio, así como en la programación del DSP TMS320F28335 (ver Fig. 2).
- Clases de seguimiento para controlar el desarrollo del diseño de un sistema electrónico de aplicación industrial y basado en el DSP TMS320F28335, que deben implementar los alumnos.

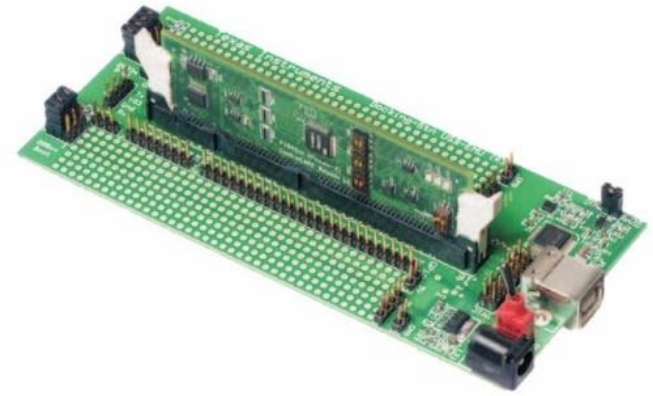


Fig. 1. Plataforma "delfino c2000 kit", sistema de desarrollo para el DSP TMS320F28335 del fabricante Texas Instruments.

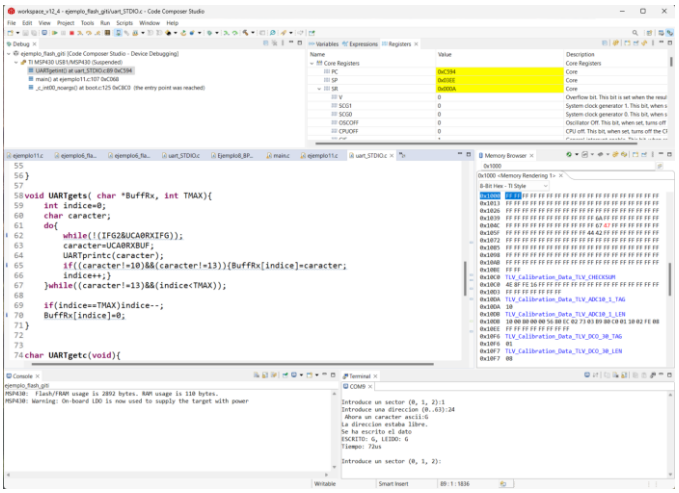


Fig. 2. Entorno "Code Composer Studio" para el desarrollo y depuración de microprocesadores del fabricante Texas Instruments.

Dado que tanto las clases magistrales como las prácticas de laboratorio se encuadran en una metodología tradicional de enseñanza, nos centraremos en este trabajo en los resultados alcanzados en el diseño del sistema electrónico realizado por los alumnos, al revelar el grado de competencias adquiridas por los mismos. Comentar que el trabajo realizado se hace de manera individual o en grupos de dos alumnos.

B. Diseño Electrónico e Instrumentación Industrial

Según el enfoque de tipo generalista dado al Máster, que admite multitud de perfiles de alumnos de nuevo ingreso, la asignatura en cuestión se caracteriza por ser la segunda asignatura relacionada con la electrónica que cursarán la gran mayoría de los alumnos, a modo de continuación de una asignatura de electrónica general que se imparte de forma obligatoria en los Grados de Ingeniería en Tecnologías Industriales [13]. El objetivo principal de la misma es incidir en conceptos relacionados con la Tecnología Electrónica, pasando del mero conocimiento de los dispositivos, componentes y sistemas electrónicos al diseño de circuitos y sistemas electrónicos de aplicación industrial, asentando el conocimiento del alumno de la Tecnología Electrónica, de su aplicación industrial y en el manejo de la instrumentación electrónica. Es por tanto imprescindible que el alumno haya cursado previamente una asignatura básica de electrónica, donde se hayan visto conceptos relacionados con el funcionamiento y características de los dispositivos electrónicos y los circuitos electrónicos analógicos y digitales básicos (como sería el caso de la asignatura "Electrónica General", de segundo curso y segundo cuatrimestre del Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales impartido en la ETSI de Sevilla).

La metodología docente empleada incide en la creación de grupos de trabajo, de manera que los alumnos se enfrentan a un problema real, cercano al ámbito industrial en el que son expertos (los alumnos provienes de especialidades mecánicas, energéticas, químicas o de organización) y que deben solucionar diseñando e implementando un sistema electrónico real. El sistema es construido a lo largo del cuatrimestre y probado en los laboratorios del Departamento de Ingeniería Electrónica de la ETSI. Esto se traduce en:

- Clases magistrales en las que se impartirán algunas (aproximadamente un 35% del total) clases de teoría en pizarra con apoyo gráfico de transparencias (para exponer material docente y sobre todo presentar problemas a los alumnos que deben solucionar). La mayoría de las clases magistrales (el 65% restante) serán de seguimiento y apoyo al alumno para guiarlo en la solución de los problemas que se vayan planteando en la propia clase.
- Prácticas de laboratorio en las que los alumnos desarrollan el sistema electrónico diseñado, lo ponen en marcha y lo calibran.

Fig. 3. Sistema de desarrollo MSP430 LaunchPad.

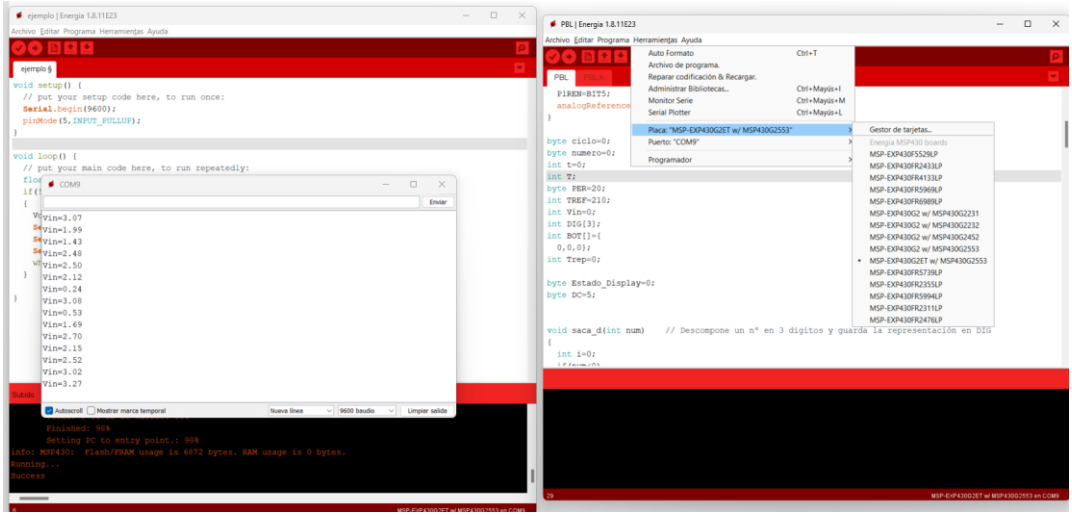


Fig. 4. Entorno de programación Energía.

Se plantean una serie de limitaciones asociadas al diseño para guiar la experiencia en clase, basadas en establecer un sistema de desarrollo que deben ser empleado (MSP430 LaunchPad, Fig. 3), con entorno de programación Energía (Fig. 4), un simulador de circuitos electrónicos concreto (Microcap) y una herramienta de diseño de placas de circuito impreso concreta (Eagle).

III. Resultados obtenidos

Durante el curso 2022-2023, se realizaron diferentes trabajos (4 en la asignatura de grado y unos 40 en la asignatura de máster) en grupos de dos alumnos, bajo la supervisión y seguimiento de los profesores de las asignaturas involucradas, y dejando libertad a los alumnos en el planteamiento de los mismos. En este artículo se describen dos de los proyectos desarrollados (uno de ellos dentro del grado y otro en el máster), consistente en la implementación de dos sistemas robotizados. Ambos trabajos tienen en común el empleo de la denominada fabricación aditiva que emplea impresión 3D, tecnología ideal para el prototipado rápido industrial.

A. Spiderbot: robot hexápodo

El diseño del hexápodo se inspira en insectos y arácnidos, imitando su capacidad para sortear obstáculos y de movimiento de manera eficiente en entornos variados. Se trata de un robot caracterizado por tener seis patas articuladas con dos servos, lo que permite un control ágil del movimiento y ofrece una importante adaptabilidad a diferentes tipos de terreno y superficies (ver Fig. 5). La longitud total de cada pata es de 12 cm, con una sección de 7.5 cm. El sistema ofrece tres grados de libertad que consisten en una rotación en el eje Z y dos translaciones a lo largo de los ejes X e Y.

El cuerpo central del robot, con un diámetro de 12 centímetros y una altura de 5.4 centímetros, proporciona la base de soporte para las patas. En posición sentada, el robot tiene una altura de 10 centímetros, mientras que al estar levantado alcanza los 18 centímetros. Se han dejado algunas aperturas laterales para situar componentes tales como un botón de encendido y apagado (permite cortar la fuente de alimentación del robot), un zumbador, un sensor de ultrasonido de corto alcance para la detección de obstáculos cercanos y un pulsador para cambiar los modos de funcionamiento del robot.

En el diseño y construcción del hexápodo, se busca lograr una combinación entre la mecánica de las patas articuladas y la programación de controladores que gestionen el movimiento. La elección de materiales, la disposición de los servomotores y la estructura general han sido factores clave en el diseño y desarrollo del hexápodo. En este caso se ha escogido PLA (ácido poliláctico) para la construcción del hexápodo, por estar derivado de recursos naturales renovables y ofrecer una opción más sostenible en comparación con los plásticos convencionales.

Las patas se agrupan en tres pares, controlándose cada par de manera conjunta para lograr el movimiento deseado. El proceso de movimiento implica una secuencia de pasos que se repite para cada conjunto de patas. En resumen, el movimiento generado puede describirse de una forma resumida y simple de la siguiente manera:

1. Elevación: Cada conjunto de tres patas se eleva del suelo de manera coordinada. Durante esta fase, las patas se retraen y se mueven hacia adelante.
2. Avance: Las patas elevadas se mueven hacia adelante y se colocan en una nueva posición delante del robot. Durante esta fase, el robot se desplaza hacia adelante en un proceso similar al paso de una araña.
3. Apoyo: Las patas que fueron elevadas previamente se colocan nuevamente en el suelo para proporcionar soporte y estabilidad al robot. Durante esta fase, el robot se apoya en tres patas mientras las otras tres se preparan para la siguiente fase de elevación.

Esta secuencia se repite de forma alternada entre los dos conjuntos de tres patas para lograr un desplazamiento uniforme. Para lograr una optimización de la técnica diseñada de locomoción es necesario tener en cuenta para la calibración los parámetros característicos de cada pata (alturas, ángulos y velocidades).

Como ejemplo que ilustre más claramente el movimiento del robot podemos tomar el retroceso, ya que el resto de movimientos se basa en los mismos principios de funcionamiento. De esta forma, explicando éste de forma detallada se puede crear una imagen conceptual del movimiento en sus tres grados de libertad del SpiderBot.

1. Elevación Inicial: La pata del centro izquierda y las no centrales derechas se elevan a 90°, de forma que dejan de estar en contacto con el suelo. Evidentemente, siempre debe haber 3 patas no correlativas en contacto con la superficie para evitar la caída del robot.
2. Avance y Retroceso: Las patas elevadas se desplazan hacia adelante (110°), mientras que el resto se mueve hacia atrás (70°) consiguiendo este efecto de retroceso el desplazamiento hacia delante del robot.
3. Descenso: Las patas que se habían elevado ahora bajan a 30° hasta conseguir que la terminación de la pata conforme un ángulo de 90º con la horizontal para buscar el mínimo esfuerzo por parte del servo a la hora de sustentar el peso del robot y se genere el contacto con la mesa.
4. Elevación Secundaria: Ahora, la pata central derecha y las no centrales izquierdas se elevan a 90°.
5. Movimiento Horizontal: La pata central izquierda y las patas no centrales derechas se desplazan hacia atrás a 110°, mientras que las otras avanzan a 70°.
6. Descenso Final: Las patas que se elevaron en la segunda fase ahora bajan a 30°.

Los pasos 4, 5 y 6 serían los contrarios a los pasos 1, 2 y 3 consiguiendo así recuperar la posición inicial del robot.

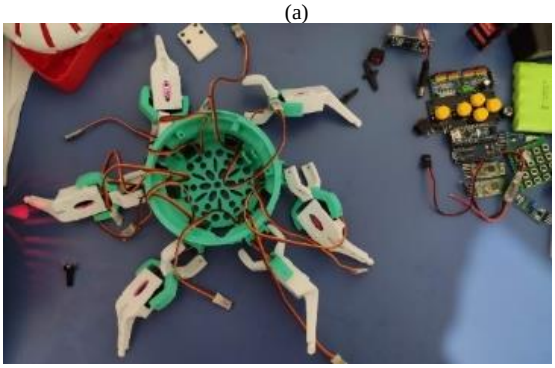
El robot desarrollado ofrece por software tres modos de operación:

1. Manual, en el que el usuario tiene el control total, permitiendo la transmisión de órdenes de movimiento (dirección avance o atrás, giro sobre sí mismo o parada) a través de un mando conectado por cable al robot.
2. Autónomo, inspirado en los robots aspiradores de uso doméstico, en el que el robot se mueve de forma independiente evitando obstáculos según la información recibida de un sensor de ultrasonido situado en la parte delantera. Spiderbot no llega a colisionar con objetos, redirigiendo antes su movimiento. A pesar del movimiento autónomo, el usuario mantiene la opción de parada con el mando manual como medida de seguridad.
3. El tercer modo de funcionamiento es de calibración y se enfoca al mantenimiento del robot. En este modo, todos los servos que controlan las articulaciones de las patas se ajustan automáticamente a un ángulo de 90 grados, colocando al hexápodo en posición neutral, lo que facilita la realización de tareas como reemplazos de componentes o comprobaciones de funcionamiento.

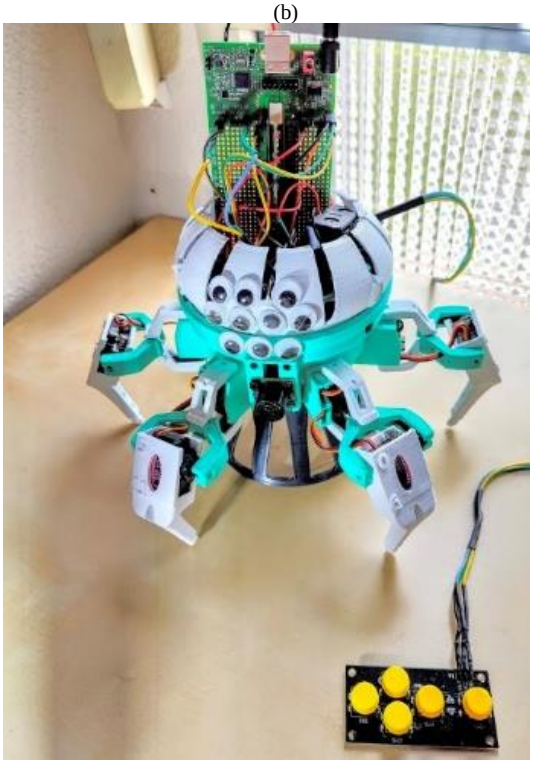
B. Brazo robótico

El objetivo general de este trabajo era desarrollar un brazo robótico industrial completo (ver Fig. 6) capaz de manipular objetos de peso relativamente bajo, controlado mediante cualquier teléfono móvil smartphone, y todo ello a un costo económico muy reducido.

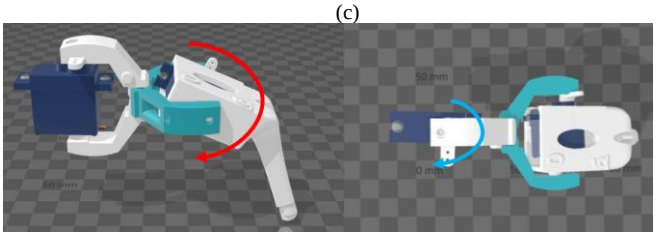
(a)



(b)



(c)

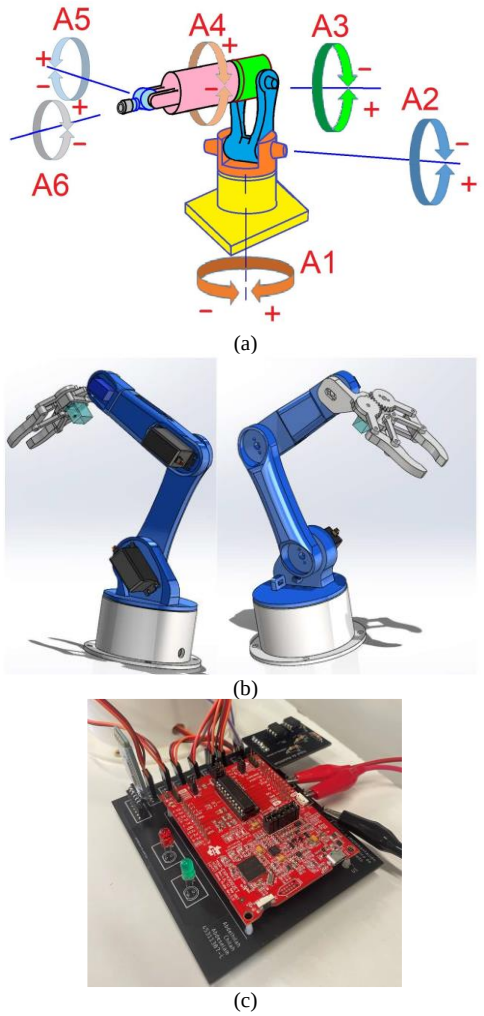


(d)

Fig. 5. Spiderbot: Desarrollo de un robot electrónico de Tipo arácnido, realizado por D. Francisco Javier Jimenez Pareja (Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales). (a) Ilustración de componentes. (b) Ensamblaje parcial. (c) Sistema desarrollado. (d) Grados de libertad de una pata.

Se han implementado 6 grados de libertad, imitando los movimientos de una persona, con un elemento terminal de sujeción tipo pinza.

El brazo robótico dispone de algunas de las medidas de seguridad de los brazos robóticos industriales que propone la norma UNE-EN ISO 10218-1:2012. Dispone de parada de emergencia por accionamiento manual y por acción automática, es decir, se paralizará el robot cuando encuentre algún obstáculo en su movimiento. Además, dispone de medidas de prevención visual mediante luces verdes y rojas, que identifiquen cuándo el robot está en funcionamiento, cuándo hay un obstáculo y cuándo está parado. Además, se ha incluido una opción de tele operación empleando tecnología inalámbrica bluetooth.



(a)

(b)

(c)

Fig. 6. Brazo robótico de bajo coste controlado por bluetooth, realizado por D. Abdelhilah Chilah Abdeselam. (a) Grados de Libertad. (b) Diseño de brazo articulado. (c) Componentes electrónicos del sistema.

Las partes principales del brazo robótico se clasifican en:

1. Sistema Actuador o elementos que se encargan de transformar el entorno para lograr los objetivos del robot. Para aportar la movilidad al brazo robótico se han considerado tres servomotores SG90, ligeros y pequeños, instalados en las primeras articulaciones del robot. A éstos se suman otros tres servomotores MG995, que aportan los 3 grados de libertad restantes (codo, muñeca y hombro), que son capaces de mover una mayor carga para desplazar los productos objetivo y soportar el peso del brazo robótico completo incluyendo sus partes y servomotores.
2. Sistema de Sensores para supervisar el entorno en el que se encuentra el robot. En este caso se ha añadido un sistema de anticolisión que capte los posibles obstáculos que puedan aparecer en los alrededores del brazo robótico, instalándose un sensor de infrarrojos Sharp GP2Y0A21YK0F
3. Sistema de Control o controlador del brazo robótico, basado en un microcontrolador de bajo coste de la familia MSP430. Permite establecer una vía de comunicación usuario-robot mediante un módulo Bluetooth HC05, que recibe y envía información desde el dispositivo móvil del usuario (aplicación Bluetooth Electronics) al robot.

En la Fig. 7 se muestra una imagen del brazo robótico montado completamente.

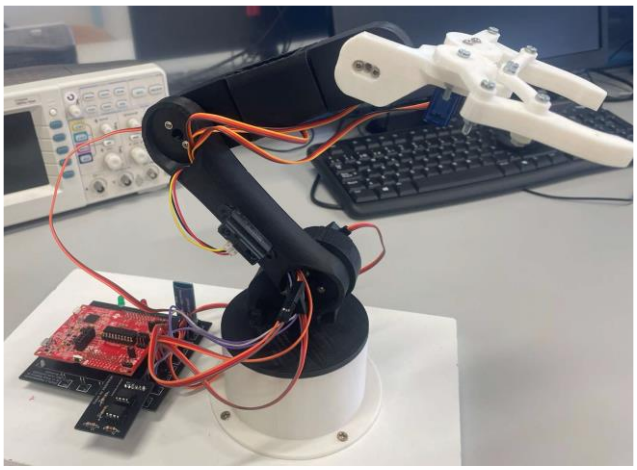


Fig. 7. Brazo robótico de bajo coste controlado por bluetooth, realizado por D. Abdelhilah Chilah Abdeselam (Máster Universitario en Ingeniería Industrial). Sistema desarrollado.

IV. Conclusiones

En este trabajo se describe el contexto docente de dos asignaturas de grado y máster, relacionadas con el diseño electrónico basado en microprocesador e impartidas en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. El enfoque lectivo de ambas plantea un procedimiento de aprendizaje PBL (“Project Based Learning”), basado en la realización de un prototipo industrial. Se han presentado los trabajos desarrollados por dos alumnos, consistentes en la realización de dos sistemas robotizados como ejemplo. La realización de estos trabajos proporciona a los alumnos la adquisición de conocimientos y destrezas en distintos ámbitos de la ingeniería (electrónica, mecánica, robótica, informática, etc), no sólo de la asignatura que los motiva y les permite poner en práctica los conocimientos y habilidades adquiridos en las clases meramente teóricas. Por otra parte, al requerir la integración de conocimientos adquiridos en otras ramas proporciona una visión global del proceso de diseño de un prototipo industrial.

Hay que destacar lo enriquecedor, positivo y gratificante que resulta además para el profesorado este tipo experiencias docentes, que requieren de un importante esfuerzo para el correcto seguimiento de los trabajos realizados por alumnos, muchas veces difícilmente asumible por el elevado número de alumnos involucrados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte de los proyectos TED2021-129558B-C22 (financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación Agencia Estatal de Investigación de España MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y también por Unión Europea NextGenerationEU/PRTR) y PID2021-125189OB-I00 (financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE Ministerio de Ciencia e Innovación, Agencia Estatal de Investigación de España y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional).

REFERENCIAS

[1] A. Calvo-Bernardino, A.C. Mingorance-Arnáiz, "La estrategia de las universidades frente al Espacio Europeo de Educación Superior," Revista Complutense de Educación, Vol. 20, no. 2, pp. 319-342, 2009.

[2] R. Quevedo Blasco, G. Buela Casal, "Influence of the Implementation of the European Higher Education Area on Engineering and Architecture University Teachers," DYNA, Vol. 92, no. 3, pp. 333-338, 2017.

[3] E. Cano García, M. Fernández Ferrer, "Competencias de los egresados del Espacio Europeo de Educación Superior: relatos de vida de los nuevos estudiantes universitarios frente a los antiguos licenciados," Revista de Docencia Universitaria, Vol. 14, no. 2, pp. 187-203, 2016.

[4] M. Valero, "Challenges, difficulties and barriers for engineering higher education," Journal of Technology and Science Education, Vol. 12, no. 3, pp. 551-566, M. 2022.

[5] J.R. Savery, "Overview of Problem-based Learning: Definitions and Distinctions," Interdisciplinary Journal of Problem-Based Learning, Vol. 1, 2006. DOI:10.7771/1541-5015.1002.

[6] F. Colodro, J.L. Mora, F. Barrero, M.R. Arahal, J.M. Martinez-Heredia, "Analysis and simulation of a novel speed estimation method based on oversampling and noise shaping techniques," Results in Engineering, Vol. 21, 2024.

[7] D. Soto-Marchena, F. Barrero, F. Colodro, M.R. Arahal, J.L. Mora, "On-Site Calibration of an Electric Drive: A Case Study Using a Multiphase System," Sensors, Vol. 23, Iss. 17, 2023.

[8] M.R. Arahal, F. Barrero, M.G. Satué, M. Bermúdez, "Fast Finite-State Predictive Current Control of Electric Drives," IEEE Access, Vol. 11, pp. 12821-12828, 2023.

[9] M.G. Satue, M.R. Arahal, D.R. Ramirez, F. Barrero, "Multi-phase predictive control using two virtual-voltage-vector Constellations," Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Vol. 20, Iss. 4, 2023.

[10] M.R. Arahal, F. Barrero, M. Bermúdez, M.G. Satué, "Predictive Stator Current Control of a Five-phase Motor using a Hybrid Control Set," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 11, Iss. 2, pp. 1444-1453, 2023.

[11] M. Perales, F. Barrero, S. Toral. "Experiencia PBL en una asignatura troncal de electrónica general," 11º Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica (TAEE-2012), Vigo, España. 2012.

[12] F. Barrero, A. Ruiz, I. González-Prieto, C. Martín, F. Gañán, M. Perales, "Aprendizaje basado en Proyectos en una Asignatura de Electrónica Industrial," 13er Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica (TAEE'2018), Tenerife, España, pp. 418-423, 2018.

[13] F. Barrero, J.L. Mora, M. Bermúdez, M. Perales, "Aprendizaje Basado en Problemas como Metodología Docente de una Asignatura de Electrónica Básica en un Máster Universitario de Ingeniería Industrial," 13er Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica (TAEE'2018), Tenerife, España, pp. 126-130, 2018.

VIERNES 28

S6A – FUNDAMENTALS OF ELECTRONICS

Módulos para prácticas de Instrumentación Electrónica

Luis Gil Sánchez
Department of Electronic Engineering
Universitat Politècnica de València
Valencia, España
lgil@eln.upv.es

Álvaro Tormos Ferrando
Department of Electronic Engineering
Universitat Politècnica de València
Valencia, España
atormos@eln.upv.es

Salvador Coll Arnau
Department of Electronic Engineering
Universitat Politècnica de València
Valencia, España
scoll@eln.upv.es

Emilio Royo Carratalá
Department of Electronic Engineering
Universitat Politècnica de València
Valencia, España
emrocar@eln.upv.es

***Resumen*— En esta comunicación se presentan varios módulos de prácticas para la asignatura Instrumentación Electrónica dentro del Grado de Ingeniería Electrónica Industrial y Automática que se imparte en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial y Diseño Industrial de la Universitat Politècnica de València. Las dos primeras placas corresponden al tema de Amplificador de Instrumentación (AI), una para caracterizar el AI con tres Amplificadores Operacionales y otra para amplificar la señal de una celda de carga con AI integrado implementando una báscula. Las dos siguientes prácticas corresponden a los temas de conversión A/D y D/A. La experiencia con numerosos alumnos a largo de varios años ha demostrado su validez y eficacia en el aprendizaje de los conceptos propuestos.**

Palabras Claves*— *Instrumentación Electrónica, Amplificador de Instrumentación, Convertidores A/D y D/A.

I. Asignatura Instrumentación Electrónica

La asignatura Instrumentación Electrónica es una asignatura troncal del Grado de Ingeniería Electrónica Industrial y Automática de la Universitat Politècnica de València. Esta asignatura se imparte en el segundo cuatrimestre del tercer curso y posee seis créditos, de los cuales tres son de teoría, uno de prácticas de aula y dos de prácticas de laboratorio. Al ser una asignatura troncal, todo el alumnado de la titulación debe cursarla y su número suele ser elevado, en el curso 2023-24 hay 167 matriculados, y durante los últimos diez años el número está en el intervalo de 138 y 169. La asignatura se divide en tres grupos de teoría y cada grupo de teoría se divide en dos grupos de prácticas, que posee cada uno de 25 a 30 alumnos.

Cada estudiante debe poseer conocimientos previos básicos de componentes electrónicos, electrónica analógica y electrónica digital, que se imparten en tres asignaturas homónimas en el curso anterior. A su vez, los contenidos de esta asignatura sirven de base a otras asignaturas optativas de cursos posteriores de carácter más específico. La información detallada sobre los contenidos de la asignatura se incluye en su página de intranet y en la bibliografía recomendada [1].

A. Programa de la Asignatura

El contenido de la asignatura se divide en los siguientes temas:

1. Introducción a los Sistemas de Medida. Sistemas de medida. Ejemplos. Especificaciones y terminología. Errores de medida.
2. Puentes de Medida. Sensores resistivos (temperatura, posición, aceleración, presión, fuerza, etc.) y su acondicionamiento en puente de medida. Configuraciones, variantes, referencias de tensión y medidas ratiométricas. Medidas a tres y cuatro terminales. Puentes activos [2].
3. Amplificación en Instrumentación. Configuraciones de amplificador de instrumentación, topologías y versiones integradas (AD620). Interferencias y técnicas de reducción de ruido [3].
4. Filtrado Analógico. Circuitos con Amplificadores Operacionales (AO), filtros de segundo orden y superiores, diseño de filtros de cualquier orden. Software de diseño. Filtros Universales y de Capacidades Conmutadas [4].
5. Introducción a la Conversión de Datos. Teoría de la conversión: multiplexado, muestreo, cuantificación, codificación, Teorema de Nyquist-Shannon [5]. Multiplexores analógicos y sistemas de muestreo/retención.
6. Conversión Digital/Analógica (D/A). Convertidores D/A lineales. Especificaciones, tecnologías y variantes. Modelos integrados (Ejemplo: DAC0800). Interconexión de D/A con µP. Aplicaciones [6]
7. Conversión Analógica/Digital (A/D). Clasificación y especificaciones. Convertidores directos: flash, aproximaciones sucesivas (ADC0801), segmentados. Convertidores A/D de integración: Doble rampa y Sigma-Delta (ΣΔ). Aplicaciones [7].

B. Prácticas de Laboratorio

Cada grupo de prácticas se suelen distribuir en puestos de dos o tres alumnos, por lo que el número de puestos de trabajo necesarios suele ser de 12 a 15. Cada puesto posee un instrumental electrónico formado por fuente de alimentación, polímetro, osciloscopio, fuente de alimentación, placa de pruebas, junto con el cableado necesario. Además, cuenta con ordenador personal con el software apropiado para seguir las clases y realizar las prácticas.

Las prácticas de laboratorio se dividen en ocho sesiones de dos horas cada una. Para realizar las prácticas el alumnado posee previamente el enunciado, donde se indica paso a paso las tareas que tiene que realizar. La evaluación de las prácticas se realiza mediante preguntas tipo test en un programa de ordenador, donde a cada alumno de forma individual (no en equipo), se le pregunta al finalizar la práctica algunas preguntas referidas directamente sobre la tarea realizada. Estas preguntas se seleccionan aleatoriamente de un conjunto amplio de preguntas previamente preparadas. Las notas de estas breves pruebas se combinan para obtener una nota de prácticas que, a su vez, se acumula a las notas de exámenes

escritos de teoría y problemas y la de un trabajo final, para así obtener la nota global de la asignatura.

C. *Programa de Prácticas de Laboratorio*

El programa de prácticas es el siguiente:

LAB 1. Puentes de medida. La práctica consiste en simular el acondicionamiento de un sensor de temperatura resistivo mediante una resistencia variable. El sensor se incluye en un puente de medida, primero pasivo y posteriormente activo, comprobando las diferencias entre ellos.

LAB 2, 3. Amplificadores de Instrumentación. Para este tema se realizan dos prácticas, la primera de caracterización del AI de tres amplificadores operacionales (AO) utilizando c.i. discretos, con acceso a la primera etapa de amplificación. Se realizan medidas con distintas tensiones de entrada, comprobando los efectos del modo común.

La segunda práctica consiste en utilizar un AI integrado (AD620) para una aplicación de medida de masa donde, a partir de una celda de carga, se desarrolla el sistema electrónico para obtener el valor del peso, dispuesto en una báscula electrónica formada por el sensor y una plataforma. Mediante pesas de distintas masas se calibra y caracteriza el sistema.

LAB 4, 5, 6. Filtros analógicos. Para este tema se realizan tres prácticas de laboratorio.

La primera práctica consiste en el diseño y caracterización de un filtro paso-bajo de segundo orden de Butterworth. Se obtienen los valores de componentes, se monta el circuito y se caracteriza. El filtro se emplea para discriminar componentes frecuenciales de una entrada compuesta.

La segunda práctica consiste en la aplicación de un filtro pasa-banda activo de respuesta tipo resonante. Para ello, se propone a los alumnos que monten un filtro, previo diseño específico, para potenciar una única frecuencia y rechazar el resto. La aplicación consiste en suministrar una señal cuadrada e ir obteniendo a la salida los distintos armónicos de la correspondiente serie de Fourier. Para obtener los armónicos sin modificar el filtro, se disminuye la frecuencia de la señal de entrada.

La tercera práctica consiste en caracterizar un filtro universal (UAF42) que posee tres salidas de tipo paso-bajo, paso-banda y paso-alto. Posteriormente, se aplica una señal senoidal compuesta de tres frecuencias comprobando las amplitudes de cada componente en las distintas salidas. Esta práctica se realiza íntegramente simulada con el programa Proteus, ya que no se dispone de dispositivo real y, en cambio, se desarrolló un modelo para la simulación.

LAB 7, 8. Conversión de datos. Para este tema se realizan dos prácticas, una para conversión D/A y otra para conversión A/D.

La primera práctica utiliza el convertidor DAC08, al que se le aplican primero valores digitales estáticos y se mide el correspondiente valor analógico de salida. Posteriormente, se emplean dos contadores digitales de 4 bits para generar una salida analógica en forma de rampa, ya sea ascendente o descendente según el sentido de conteo del contador.

La segunda practica utiliza el convertidor ADC0804 con los elementos de control necesarios para que, al aplicar una señal analógica se obtenga su correspondiente valor digital. Se acopla a la salida un convertidor DAC08 para volver a obtener una señal analógica. Se analizan las especificaciones estáticas y dinámicas de los convertidores, comprobando entre otras, la limitación en frecuencia y el fenómeno de "aliasing" al aumentar la frecuencia de la señal de entrada.

D. *Características de la prácticas de laboratorio*

En general, las prácticas de laboratorio se habían realizado de forma tradicional con placas de montaje de pruebas, con componentes discretos interconectados con cablecillos (excepto la práctica LAB6 que se realiza de forma simulada). Debido al sistema de cableado, puede resultar un circuito complejo para el tiempo disponible. En ocasiones, se consume la mayor parte del tiempo de la sesión en aspectos de montaje y verificación, dificultando el desarrollo completo o la finalización de la práctica, con la consiguiente sensación de frustración por parte del alumno.

Por otro lado, el número de puestos de trabajo de la asignatura en cada grupo de prácticas es bastante elevado, y el profesor no siempre puede atender a todos de forma rápida y eficaz.

Para intentar subsanar los inconvenientes indicados, los profesores de la asignatura hemos desarrollado a lo largo de los últimos años algunos módulos que permiten realizar las prácticas de forma más ágil y eficaz en términos de aprovechamiento [2]. En esta comunicación se presentan dos montajes ya muy experimentados y otros en dos en desarrollo. Se analiza las ventajas y también sus limitaciones y posibles inconvenientes.

II. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO REALIZADO

A continuación, se presentan cada uno de los cuatro módulos que se han desarrollado para sus correspondientes sesiones, algunos llevan varios años funcionando satisfactoriamente, otros han tenido que ser modificados para sacarles mayor provecho y otros están en fase de desarrollo.

A. *Práctica para el análisis del Amplificador de Instrumentación*

El objetivo de esta práctica es el estudio de las características principales de los AI, que son amplificadores muy apropiados para los sistemas de medida de señales diferenciales. Para ello, se plantea el montaje por etapas de la configuración más típica de este amplificador, que es el AI compuesto por tres AO (Fig. 1).

En la práctica, se pide obtener el valor adecuado de la resistencia R_G para obtener una determinada ganancia (cercana a 100) y con ella determinar la tensión en el punto intermedio (V'_1-V'_2).

$$V'2 - V'1 \;=\; (1 + \tfrac{2 \cdot R}{Rg}) \cdot (V2 - V1) \qquad (1)$$

Posteriormente, hay que obtener la tensión en la salida Vo:

$$Vo \;=\; \tfrac{R2}{R1} \cdot (V'2 - V'1) \qquad (2)$$

Para proporcionar una señal de entrada diferencial de pequeño valor, y que no esté conectada a masa, se propone un divisor de tensión conectado a la tensión de 5 V con dos resistencias de valor elevado (120 kΩ) y un potenciómetro multivuelta de 10 kΩ (*Fig 1a*).

La práctica consiste básicamente en variar la tensión de entrada diferencial y comprobar el efecto tras la primera etapa y en la salida final, De este modo, se comprueba los factores que intervienen en la exactitud y las limitaciones de la

amplificación. También se le aplica una tensión en modo común (conectando ambas entradas a una fuente de voltaje variable) para determinar la ganancia en modo común y calcular el valor de la relación de rechazo de modo común del montaje CMRR (*Common Mode Rejection Rate*).

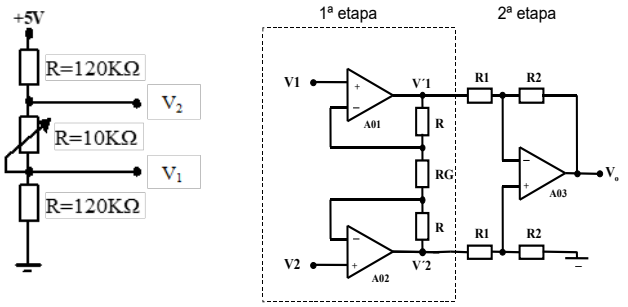


Fig.1. Amplificador de Instrumentación con tres Amplificadores Operacionales y circuito para señal proporcionar la señal de entrada

El montaje se realiza mediante tres Amplificadores Operacionales básicos en C.I. TL081. El montaje del AO es bien conocido por el alumnado, ya que en asignaturas previas de electrónica analógica lo han utilizado en algunas aplicaciones. En general, es una práctica que no da problemas pero que conlleva un cierto tiempo de cableado y verificación.

Módulo PCB para la práctica

Por agilizar el montaje de la práctica de AI con tres AO, hemos propuesto el desarrollo de una placa de circuito impreso donde ya están conectados los circuitos integrados, de manera que solamente haya que diseñar y colocar la resistencia RG, realizar las conexiones de tensión de alimentación, de entrada y de salida. Se han previsto terminales para la medida de la tensión intermedia (V'_1-V'_2), de manera que pueda comprobarse el efecto de saturación interna por tensiones comunes altas (Fig. 2). Esta placa se encuentra, de momento, en fase de desarrollo, se espera que el próximo curso se pueda utilizar en las prácticas.

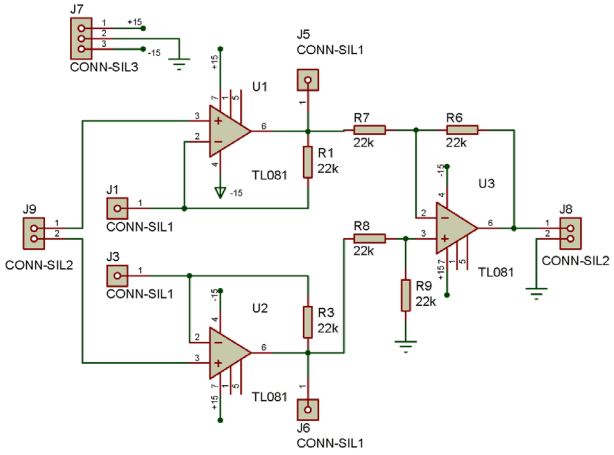


Fig. 2. Esquema de la PCB para práctica de Amplificador de Instrumentación con tres Amplificadores Operacionales

B. Práctica de aplicación de Amplificador de Instrumentación. Báscula electrónica.

La segunda práctica del tema de Amplificador de Instrumentación consiste en utilizar el c.i. AD620, que posee una configuración interna de tres AO. Se emplea para una aplicación cotidiana y conocida, medida de masa mediante báscula electrónica.

Para realizar está práctica se utiliza una celda de carga modelo 3133 - CZL635, obtenida de una báscula simple de cocina, donde se ha eliminado la carcasa y sistema de medida y visualización (Fig 3b). La celda de carga está formada por cuatro galgas extensiométricas distribuidas simétricamente, de forma que al depositar un peso se produce una pequeña deformación que conlleva un aumento/disminución de su longitud con el consecuente aumento/disminución de la resistencia eléctrica de los sensores. La tensión de salida es proporcional linealmente a la variación de resistencia (y de masa aplicada) y a la tensión de alimentación.

La celda está diseñada para un peso máximo de 5 kg y una sensibilidad a peso máximo de 1 mV por cada voltio de la tensión de excitación del puente V_E. Por lo tanto, la tensión de salida con V_E=5 V y peso 5 kg es V_{S+}-V_{S-} = 5 mV.

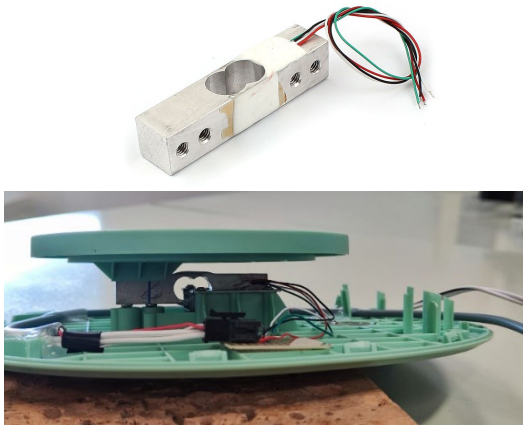


Fig. 3. Plataforma y Celda de Carga a modo de báscula

La celda tiene cuatro cables accesibles, dos para la tensión de excitación (alimentación) y otros dos para la tensión de salida. Esta tensión es directamente proporcional a la masa (y por tanto al peso) que se deposita sobre el plato apoyado en el sensor. La salida de la celda se conecta al amplificador AD620, con control de la tensión de referencia para el ajuste del cero (offset del sistema) mediante un potenciómetro de 100 kΩ. La salida del AI se conecta a una segunda etapa de amplificación (A2) mediante circuito con AO en configuración amplificador no inversor para acabar ajustando la ganancia total del circuito de manera independiente al ajuste del cero (Fig. 4).

La práctica consiste, en su primera fase, en compensar la tensión de offset del conjunto celda de carga y AI. Para ello, se mide en la salida del AI (V_A) en vacío (sin peso). Para realizar esta compensación se utiliza el circuito de ajuste, variando el potenciómetro (ZERO) hasta lograr 0 V. Para lograr una mayor precisión en este ajuste se puede conectar resistencias (18 kΩ o 1k8 Ω) en paralelo al potenciómetro multivuelta para que así obtener un valor de resistencia menor y ajuste fino. El AO en modo seguidor de tensión consigue aplicar el voltaje de calibración con baja impedancia en la tensión de referencia del AI.

Una vez ajustado el cero, se procede a colocar en la báscula pesas de hasta 5 kg, ajustando la ganancia hasta obtener a la salida una tensión de 5 V para dicha carga máxima. Para ello, se ajusta el potenciómetro GAIN (100 kΩ)

del amplificador A2. En la Fig. 4 se muestra el proceso realizado en el ajuste de cero (ZERO) y ganancia (GAIN).

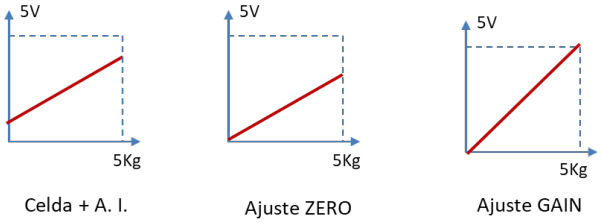


Fig. 4. Procesos de ajuste del circuito de medida de la balanza

En la última parte de práctica se colocan en la balanza pesas de valores inferiores, entre 0 kg y 5 kg, en pasos de 500g, y se mide y anota su correspondiente tensión de salida. Mediante una hoja Excel se realiza una gráfica de relación voltaje-masa, comprobando la linealidad del sistema de medida mediante ajuste por mínimos cuadrados. Las masas "exactas" de las pesas han sido previamente determinadas y anotadas en cada pieza mediante calibración con una báscula de referencia.

Módulo PCB para la práctica

El desarrollo de esta práctica con dispositivos conectados en placa de pruebas puede resultar complejo por el número de conexiones, y en este caso incómodo por trabajar en un espacio reducido gran número de personas con múltiples elementos como son las básculas, la placa de montaje y las pesas sobre la mesa. Por ello, se decidió que, al menos una parte, estuviera ya conexionada en un módulo donde se encuentra todo el sistema de amplificación y ajuste (Fig. 5).

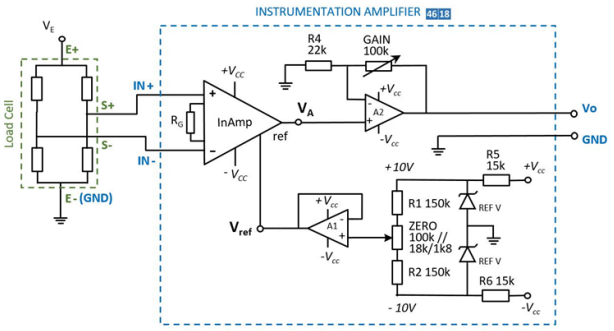


Fig. 5. Esquema de circuito de medida de la báscula

Para obtener el sistema de amplificación hemos construido una PCB que dispone de todos los componentes excepto la resistencia RG, ya que su valor concreto debe calcularse como parte de las tareas previas, debiendo elegirse un valor normalizado e incorporarlo en los terminales dedicados a este componente (Fig. 6). La placa posee tres conectores para una fácil conexión de la tensión de alimentación simétrica (±15 V) y conectores para la entrada y la salida de señal. También dispone de terminales de test para el ajuste de la tensión de cero y un "jumper" selector para elegir entre tres posibles márgenes de variación de la tensión de referencia, de manera que pueda lograrse la mejor combinación entre precisión de ajuste y margen ajustable en cada caso. Con el segundo potenciómetro multivuelta se ajusta la ganancia. Los terminales de tensión de referencia (Vref) y tensión de salida del AI (V_A) cuentan con sendas puntas de prueba de fácil acceso para su comprobación.

Esta placa ha sido utilizada durante varios cursos, y se ha comprobado su utilidad en el desarrollo ágil y exitoso de la práctica. El alumno debe de realizar los ajustes y las mediciones para calibrar y caracterizar la báscula.

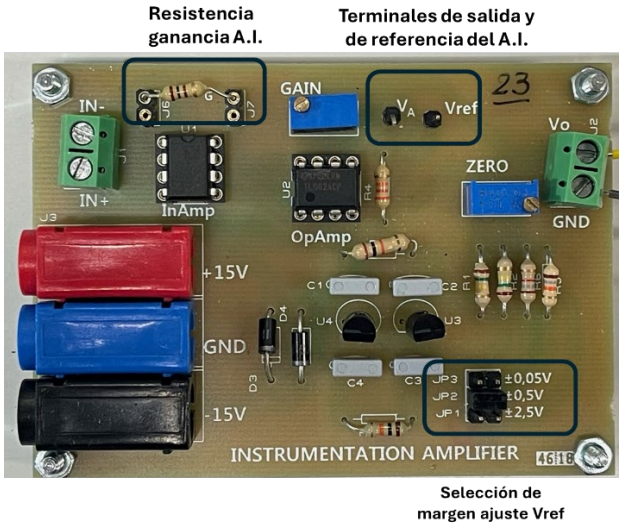


Fig. 6. PCB para el control de la báscula

C. *Convertidor Digital-Analógico*

La última parte de la asignatura trata la Conversión Digital-Analógico y Analógico-Digital. Para ello, se empieza con un tema teórico sobre la Conversión de Datos, donde se explican los principios generales de la adquisición y muestreo de señales (Nyquist-Shannon). Posteriormente, se desarrollan dos temas para cada tipo de conversión. En cada uno de ellos se presentan los principios y técnicas de conversión y se presentan dispositivos electrónicos que realizan esa tarea, mostrando distintas variantes con el uso de entradas/salidas y cálculo de componentes para el funcionamiento adecuado.

La primera práctica de esta parte consiste en trabajar con el c.i. del convertidor D/A DAC0800. Este dispositivo incorpora un circuito electrónico de tecnología bipolar, a base de fuentes internas de corriente mediante transistores y una red R-2R. Posee una entrada de 8 bits en binario natural o desplazado, se alimenta con tensión de ±15 V, hace uso de dos tensiones de referencia externas que se aplican mediante sendas resistencias para lograr una corriente de referencia interna entre 1 mA y 5 mA. La salida tiene formato de corriente, y se transforma en tensión mediante resistencias.

La práctica consiste en el montaje del DAC0800 con valores de resistencias de referencia (6k8 Ω) para obtener una corriente de Iref=2.2 mA y resistencias de salida de 2k2 Ω. La tensión de salida viene determinada por la expresión:

$$Vo = 5 - R4 \cdot \bar{I}out = 5 - 2K2 \cdot \frac{2{,}2m \cdot \overline{[DIG]}}{256} = 5 - 0{,}0189 \cdot \overline{[DIG]} \quad (3)$$

Siendo $\overline{[DIG]}$ = 255- [DIG]

Inicialmente, son aplicadas a las entradas manualmente algunas combinaciones digitales de ocho bits comprobando que a la salida se obtiene el valor de tensión esperado para esa combinación. Se suelen reproducir únicamente tres combinaciones, con objeto de no alargar demasiado la práctica.

Para realizar una variación rápida de las entradas digitales, se utiliza un c.i. contador (74LS191) bidireccional con cuatro salidas QD..QA (Fig. 7). Como el contador tiene cuatro salidas y el convertidor ocho entradas, se emplean cuatro (en un primer momento, la mitad de mayor peso) del convertidor. En la salida se debe obtener una señal en forma de escalera de 16 escalones, que tras el último escalón vuelve a iniciarse desde el escalan inferior. Una de las tareas de la práctica es determinar la tensión de resolución (altura del escalón) en la conversión. En caso de que el contador esté en modo descendente la señal de salida tendrá forma de escalera descendente.

Un siguiente punto de la práctica consiste en conectar las salidas del contador a las entradas de menor peso del convertidor, con lo cual se obtiene una rampa a una escala 16 veces menor a la anterior. Se puede interconectar dos c.i. contadores para obtener en total 8 salidas digitales y aprovechar toda la resolución del convertidor, pero la tarea de conexión de dichos contadores y su comprobación hace que no haya tiempo en la duración de la práctica si se realiza en placa de montaje.

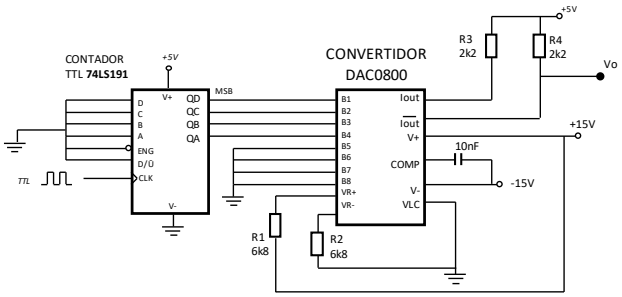


Fig. 7. Esquema de la práctica del DAC con contador a la entrada

Módulo PCB para la práctica

Al igual que en las prácticas anteriores, hemos desarrollado una placa de circuito impreso donde se ha incluido la mayoría de los componentes y terminales para realizar las conexiones necesarias en las distintas fases de la práctica. En este caso se ha incluido el segundo contador, con lo cual se puede realizar la cuenta completa de 8 bits. Además, se han incluido dos conectores de ocho pines cada uno con tensiones a 5 V y masa respectivamente, para así poder realizar todas las combinaciones posibles para una entrada manual al convertidor D/A. En la fig. 7 se muestra el esquema del circuito de la placa y en la Fig. 8 un aspecto de esta placa con todos los componentes y cables de conexión entre contador y convertidor.

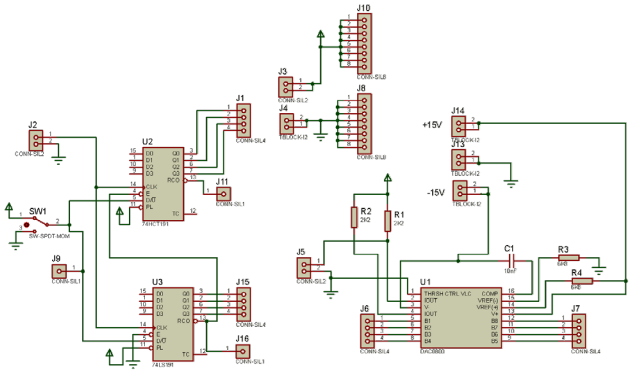


Fig. 8. Esquema eléctrico de la PCB de la práctica del DAC con dos contadores de 4 bits interconectados

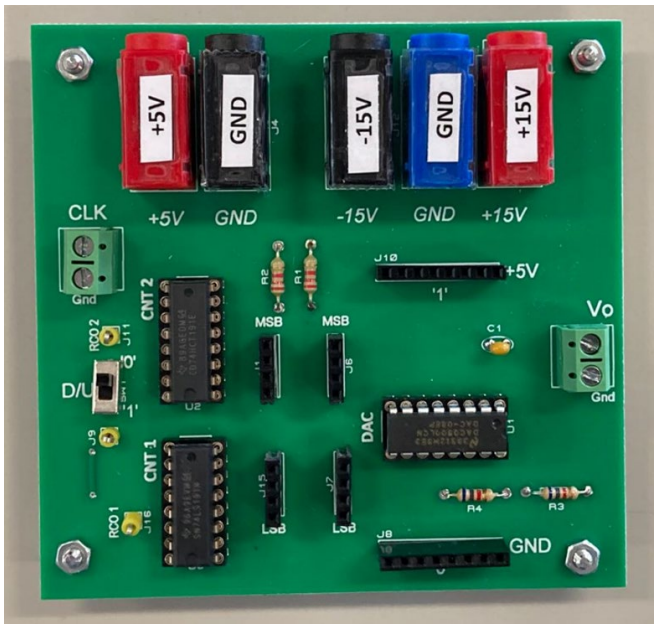


Fig. 9. Vista de la PCB para la práctica DAC y contadores

Mediante esta placa se realiza la práctica utilizando todas las entradas del convertidor. A la entrada se aplica una señal de reloj de 1 kHz y a la salida del convertidor se obtiene una señal en diente de sierra (Fig. 9). Se trata de una escalera ascendente con 256 escalones (2^8) desde 0 a 5 V, que una vez llevado al máximo valor vuelve a empezar desde cero. La altura de cada uno de los escalones es 5/256=0.019V.

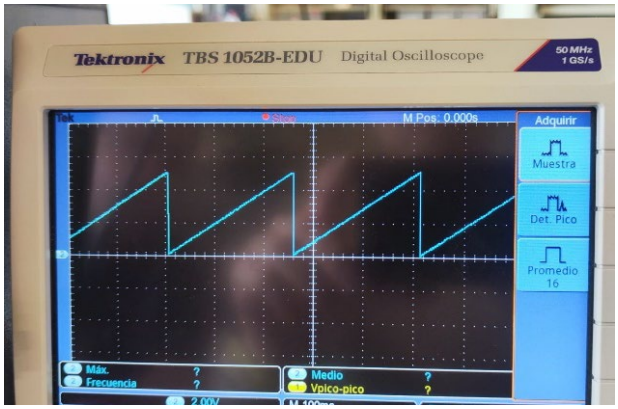


Fig. 10. Señal de salida utilizando los dos contadores (8 bits)

Si en lugar de utilizar los dos contadores y 8 bits, se utilizase un solo contador y 4 bits, y estos se aplican a los 4 bits de mayor peso del convertidor, obteniendo una señal en forma de escalera con 16 escalones, que al llegar a la parte superior vuelve a cero (Fig. 10). En este caso, la altura de cada escalón es de 5/16=0.31V, lo que resulta fácilmente medible en el osciloscopio. Si en lugar de haber elegido los bits de mayor peso del convertidor, se eligen los cuatro de menor peso, se obtiene una señal de la misma forma, pero de amplitud 16 veces menor.

Esta placa se ha puesto en uso en las clases de prácticas durante este curso 2023-24.

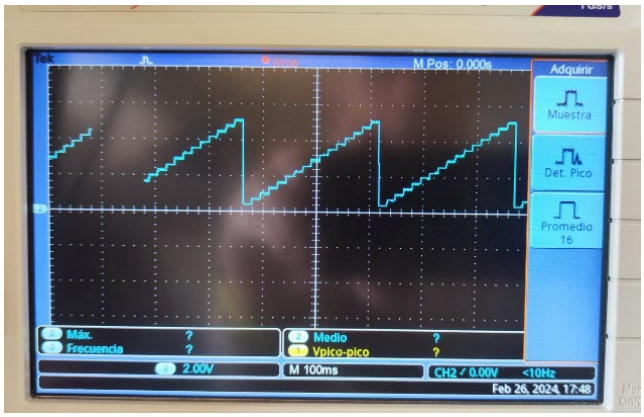


Fig. 11. Señal de salida utilizando un solo contadores (4 bits)

D. Práctica para Convertidor Analógico-Digital

La última práctica del curso corresponde al convertidor A/D. Esta práctica se realiza al final porque se utiliza los dos tipos de convertidores A/D y D/A.

El convertidor A/D utilizado es el AD0800/01/04, de 8 bits, que realiza la conversión mediante la técnica de aproximaciones sucesivas. La entrada en diferencial unipolar. El tiempo de conversión es 100 µs. Posee entradas y salidas auxiliares para una interconexión a microcontrolador, con señales de inicio y final de la conversión. Resulta un c.i. sencillo e ilustrativo para entender el funcionamiento y las especificaciones de este tipo de convertidores. Cuando se trabaja sin conexión a microcontrolador hay que conectar adecuadamente los terminales de control para que funcione la conversión de manera autónoma. Mediante un interruptor en la placa, se lleva momentáneamente a masa la entrada de arranque de conversión, iniciando el "autocebado" de conversión continua (Fig. 12).

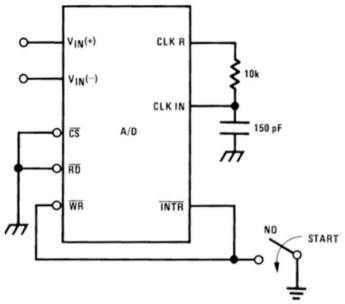


Fig. 12. Conexión del ADC0800 con funcionamiento autónomo

La idea general de la práctica es simplificar el proceso para que el alumnado pueda fijarse en los conceptos generales vistos en teoría (entradas diferenciales, reloj de la conversión, tensión de referencia de la cuantificación, frecuencia de conversión, etc.). Hay que conectar una señal analógica al convertidor A/D, los ocho bits de salida a la entrada del convertidor D/A, y a la salida de éste hay que medir la tensión analógica (Fig.13). La tensión de salida final debe ser una réplica de la entrada analógica original, pero con la afectación y limitaciones de la digitalización de 8 bits. Además, se debe observar la influencia de la frecuencia de la señal, en relación con los tiempos necesarios para realizar la conversión. Esto es apreciable al aumentar ostensiblemente la frecuencia de la señal de entrada y comprobar el retardo y escalonado de la salida.

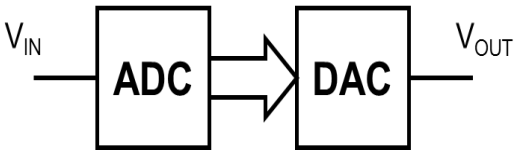


Fig. 13. Interconexión de bloques en la práctica ADC-DAC

La práctica tiene dos partes, primero se conecta una señal de entrada analógica continua, a través de un potenciómetro, y se registra la señal de salida, similar a la de entrada, pero previa digitalización con resolución limitada. Posteriormente, se sustituye el potenciómetro por una señal alterna senoidal de amplitud 0 a 5 V a la que se va aumentando la frecuencia para comprobar las limitaciones dinámicas de la conversión, y encontrar las frecuencias a las que produce claramente "aliasing" (Fig.14).

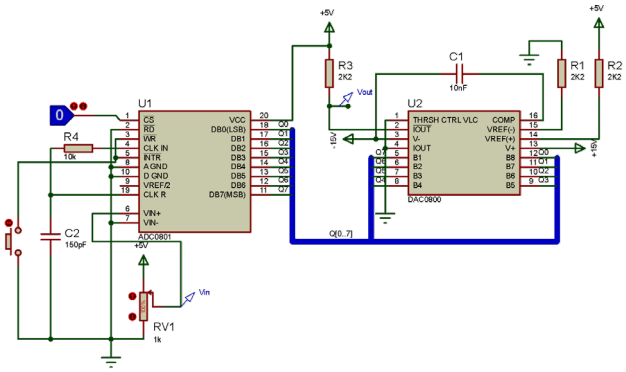


Fig. 14. Esquema electrónico de conexión ADC-DAC

Módulo PCB para la práctica

Es fácil de imaginar que la conexión de este circuito resultaría laboriosa en una placa de prototipos cableada, y que difícilmente los alumnos la podrían completar con éxito en el tiempo disponible. Por ello, fue la primera práctica que se desarrolló sobre una placa de circuito impreso. Esta placa tiene todos los elementos para realizar la práctica, incluido el potenciómetro para obtener la señal analógica continua de entrada al convertidor A/D. Además, se ha implementado el interruptor para realizar la conversión y un "jumper" para elegir la tensión de referencia (Fig. 15 y Fig. 16).

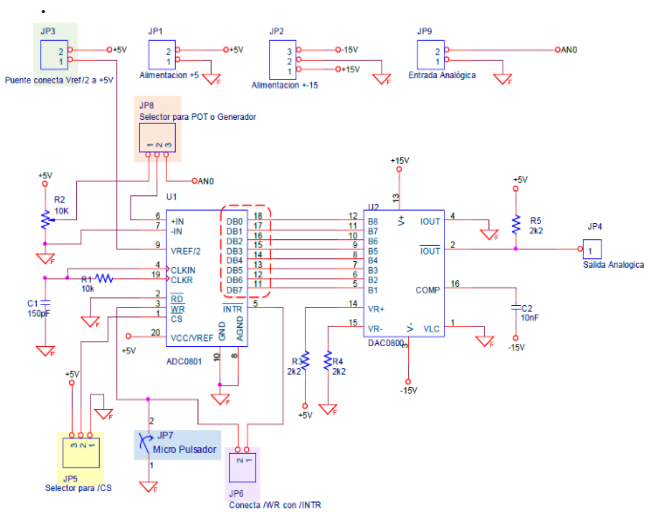


Fig. 4. Esquema electrónico de la PCB de práctica ADC-DAC

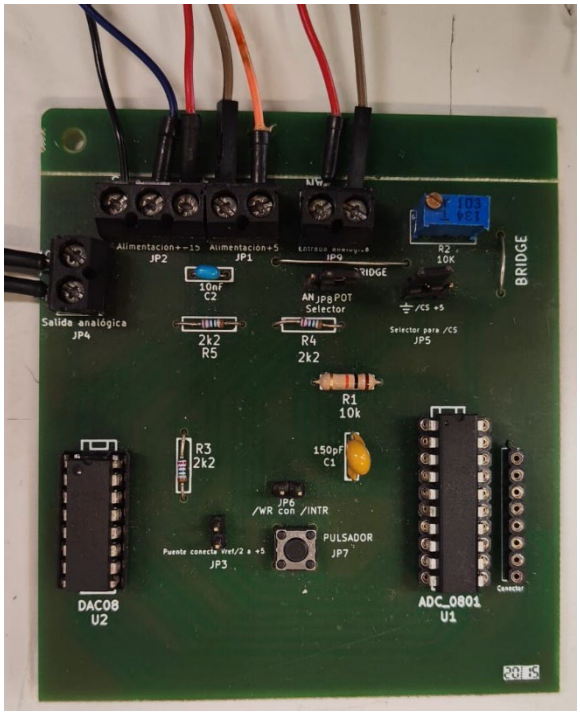


Fig. 56. Vista de la PCB para práctica ADC más DAC

III. RESULTADOS OBTENIDOS Y POSIBLES PROBLEMAS

Dos de los módulos de prácticas (balanza con celda y convertidor D/A) llevan utilizándose desde hace varios cursos en las prácticas de Instrumentación Electrónica y puede decirse que con resultados satisfactorios. Han funcionado correctamente, permitiendo que el alumnado se centre en tareas de medidas y obtención de conclusiones más que en el montaje en sí. De los otros dos módulos, uno se ha desarrollado para el curso actual y el otro estará disponible para el próximo curso (la sesión de esa práctica ya se ha celebrado), y por ello no hay experiencia previa. Las pruebas realizadas hasta ahora, y el bagaje con módulos previos, pronostican buenos resultados.

La demostración de la bondad de estas placas comparando resultados de la evaluación global del alumnado antes y después de su implantación es difícil de obtener, ya que los módulos se han desarrollado de forma progresiva a lo largo de varios cursos y afectan de forma limitada al desarrollo y evaluación de las prácticas. Por otra parte, los alumnos que experimentan con nuevas placas no son los mismos que los que tenían que realizar el montaje mediante cableado de componentes. Quizás el mejor indicio de su efecto es la experiencia del profesorado que imparte las prácticas, que anteriormente encauzaba sus esfuerzos en que los circuitos de la práctica funcionaran adecuadamente y ahora se preocupa más de que el alumno saque conclusiones del tema que se está abordando.

Sin embargo, no todo son ventajas proporcionar el circuito en una placa preparada. Una de las preocupaciones inherentes es que, si se facilita mucho la tarea al alumnado, éste tiende a relajar su atención sobre el circuito. Además, se deja de practicar el conexionado de los componentes. Esta tarea, lejos de ser un mero trámite en la realización de las prácticas, constituye una experiencia de aprendizaje, en cuanto que necesita de la comprobación de componentes, interpretación de hojas de características de circuitos integrados, soltura en el conexionado, identificación y resolución de problemas, etc. Hay que decir, que las prácticas de esta asignatura emplean dispositivos y componentes que, en parte, se han utilizado ya en asignaturas anteriores, y en éstas todas las prácticas se realizan sobre placas de prueba de forma manual. Este hecho puede ser un factor favorable a la disposición de circuitos preparados o simplificación del montaje por parte del alumnado en asignaturas posteriores, evitando así retrasos y frustraciones en la parte más "mecánica" de la práctica y permitiendo una mayor atención a la realización de medidas con tiempo y obtención de conclusiones a partir de los resultados. De todas formas, siempre hay una parte que de conexión en las prácticas preparadas en PCB que el alumno debe modificar, ajustar, o interconectar de manera razonada para realizar cada uno de los puntos de las prácticas. Por otro lado, el gran número de puestos de trabajo en cada grupo de prácticas hace que el profesor tenga un papel más orientado a detectar y resolver fallos puntuales en los circuitos si éstos han de ser montados enteramente en placa de prototipos.

REFERENCIAS

[1] M. A. Pérez García. "Instrumentación Electrónica". Ed. Paraninfo 2023.

[2] B. Lizon, J. Wu. "Bridge Measurement Systems", Analog Applications Seminar - Texas Instruments, 2022

[3] S. Franco. "Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits". 3ª ed. McGraw-Hill, 2002.

[4] P. Bildstein. "Filtros Activos". Ed. Marcombo, 1997.

[5] A. V. Oppenheim, R. W. Schafer "Discrete-Time Signal Processing".

[6] R. Pallás Areny "Adquisición y Distribución de señales". Ed. Marcombo, 1993

[7] David F. Hoeschelle, Jr. "Analog-to-digital and Digital-to-Analog Conversion Techniques", Ed. Wiley-Interscience, 1994

[8] R. Capilla, S. Coll, A. Tormos, B. Trénor, L. Gil. "Curso de instrumentación electrónica". Publicaciones UPV- 2008.

[9] R. Pallàs Areny. "Sensores y acondicionadores de señal". 4ª ed. Barcelona. Marcombo. 2005.

Frente a la moda de la enseñanza en subgrupos pequeños, el potencial del aprendizaje individual

Jaime Jiménez
Department of Electronic Engineering
Universidad del País Vasco/Euskal
Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)
Bilbao, Spain
jaime.jimenez@ehu.es

Aitzol Zuloaga
Department of Electronic Engineering
Universidad del País Vasco/Euskal
Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)
Bilbao, Spain
aitzol.zuloaga@ehu.es

Iñigo Kortabarria
Department of Electronic Engineering
Universidad del País Vasco/Euskal
Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)
Bilbao, Spain
inigo.kortabarria@ehu.es

Armando Astarloa
Department of Electronic Engineering
Universidad del País Vasco/Euskal
Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)
Bilbao, Spain
armando.astarloa@ehu.es

Jesús Lázaro
Department of Electronic Engineering
Universidad del País Vasco/Euskal
Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)
Bilbao, Spain
jesus.lazaro@ehu.es

***Abstract*— Ciertos tipos de asignaturas -sobre todo, los laboratorios- han sido impartidos tradicionalmente en parejas o pequeños subgrupos. De un lado, por reducir los gastos en instrumentos, compartiendo estos entre varios estudiantes, pero, de otro, proclamando las fértiles y abundantes ventajas del aprendizaje en equipo -las cuales no son automáticas (por el mero hecho de trabajar en parejas), sino que requieren ciertas condiciones en el alumnado-. Sin negar esos beneficios, conviene recordar que el aprendizaje, o es individual, o simplemente no es -los conocimientos que solo tiene mi compañero no son míos-. Ante esto, proponemos volver a la enseñanza individual, también en laboratorios. Exige mayor esfuerzo al profesorado -aunque, indefectiblemente, los alumnos se van a ayudar entre ellos, aliviando un poco la dedicación-, pero las ventajas son incuestionables. El presente texto expone cómo distribuir a los estudiantes según esta estrategia y describe un método mixto que combina el desempeño individual y el cooperativo, mediante la telemática.**

Keywords*— *Aprendizaje individual, aprendizaje en equipo.

I. Introducción

Tradicionalmente, las asignaturas prácticas en Ingeniería -sobre todo, informáticas o de laboratorio- se han impartido en parejas o pequeños subgrupos, dependiendo de los recursos disponibles. Esto reducía los gastos en equipamiento, puesto que los instrumentos eran compartidos; ciertamente, algunos, de tecnología avanzada, llegan a ser tan caros que no resulta viable disponer de uno por estudiante; incluso, a veces, solo es factible adquirir unos pocos. Por otro lado, el sistema de parejas, supuestamente, favorecía el aprendizaje en equipo: cada miembro del subgrupo aprende de y gracias a los otros. En verdad, un alumno va a entender más claramente las dificultades de su compañero y sin duda se las explicará en un lenguaje más cercano. También se van a apoyar mutuamente en resolver todos los obstáculos y seguramente llegarán más lejos que cada uno por su cuenta.

Sin embargo, no todo es tan idílico en la enseñanza grupal. Frecuente y desgraciadamente, uno o varios miembros se inhiben, dejando que otros se encarguen de las prácticas, con lo que estos últimos de verdad aprenden, pero no los primeros. Antaño solíamos manifestar que "uno aprendía, otro colaboraba y los demás miraban"; desde hace tiempo, debemos corregirnos: "… los demás miran … el móvil". De manera similar, al evaluar un equipo, la tentación es dar la misma nota a todos sus miembros, y, de hecho, intentar discriminar la nota de cada cual, además de ser arduo, suele generar conflictos. Ahondando en estas objeciones, varios estudios [1-2] recogen que no siempre el aprendizaje en grupo alcanza mejores resultados académicos ni profesionales que el individual.

Por último, la pandemia nos obligó a enseñar individualmente, por razones sanitarias -evitar los contagios-, lo cual desveló las virtudes del aprendizaje individual. Y por tanto, ¡era posible!

II. Maximizar el número de puestos individuales

Frente a la clásica praxis de repartir los n alumnos de un grupo de laboratorio en parejas o, sobre todo, si no hay suficientes puestos, tríos -u otros-, nuestra propuesta consiste, para un local de m puestos (Fig. 1), en asignar un solo alumno por ubicación, dentro de los límites físicos del recinto.

Si el número de estudiantes, en vez de n, es p <= m, la distribución propuesta es trivial (Fig. 2) –en contra del hábito de emparejarlos-.

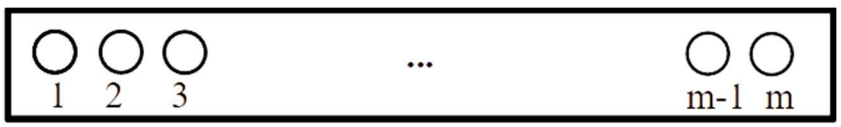


Fig. 1. Laboratorio de m puestos para 1, 2, 3 … personas cada uno.

This work has been supported by Union Europea-NextGeneration EU through the Cátedras Chip program, SOC4SENSING TSI-069100-2023-0004, and by the Basque Government within the fund for research groups of the Basque university system IT1440-22, SOC4CRIS KK-2023/00015 and TSNAERO ZL-2023/00023 projects; the latter also by the Ministerio de Ciencia e Innovación of Spain through the Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) within the project IDI-20230111, and the Fondo Europeo de Desarrollo Regional 2021-2027 (FEDER funds).

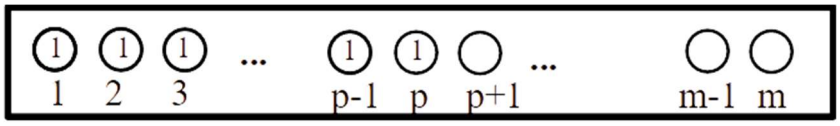


Fig. 2. Distribuir p <= m estudiantes, según nuestra propuesta.

Lógicamente, cuando n >= m, no queda más remedio que crear parejas -aunque, mientras n<= 2m, evitando tríos o grupos de tamaño superior a 2- (Fig. 3). El límite serían 2m estudiantes (Fig. 4). A partir de este valor, no quedaría más remedio que constituir tríos.

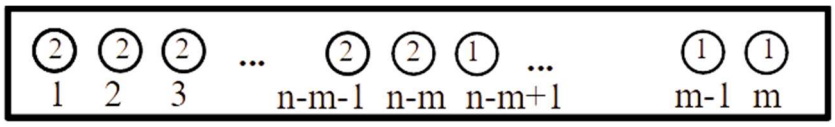


Fig. 3. Distribuir n estudiantes (m<=n<=2m).

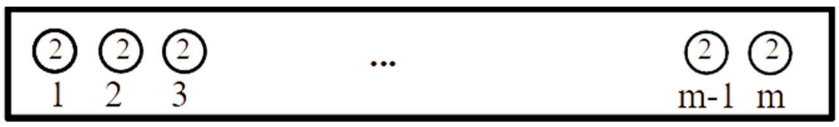


Fig. 4. Distribuir 2m estudiantes.

Ahora bien, otra discusión es si combinar cada alumno repetidor con un no repetidor o, por el contrario, aparear a los repetidores -o a los no repetidores; en nuestra opinión, lo menos deseable-. Esperando que se arreglen con mayor soltura, tendemos a dejar solos a los repetidores; no obstante, ambas alternativas tienen ventajas e inconvenientes. Nosotros apostamos por la segunda opción, de forma que, salvo casos excepcionales muy desfavorables, cada estudiante realizará las prácticas, al menos el primer año, individualmente. Sea q el último puesto ocupado por repetidores; si q>=n-m, todos los no repetidores -y, potencialmente, algunos repetidores- harán las prácticas individualmente (Fig. 5).

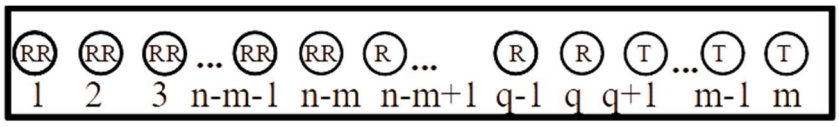


Fig. 5. Distribuir los alumnos repetidores. R: repetidor, T: no repetidor, q: último puesto con repetidores. q>=n-m.

De esta manera, a los que están solos no les queda más remedio que adiestrarse personalmente en la instrumentación. Si q<n-m, la única salida es que algunos no repetidores se emparejen (Fig. 6). Las Fig. 7 y 9 muestran que, en este caso, cuando el número de repetidores es impar, obligatoriamente debemos juntar un no repetidor con un repetidor.

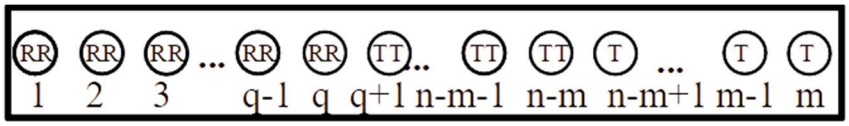


Fig. 6. q<n-m. Por lo menos dos no repetidores deben emparejarse.

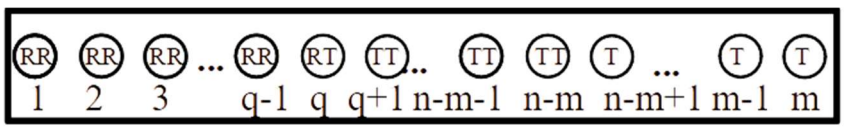


Fig. 7. Número de repetidores impar. Hay que emparejar un repetidor con un no repetidor.

Las Fig. 8 y 9 recogen el caso particular de que q=n-m.

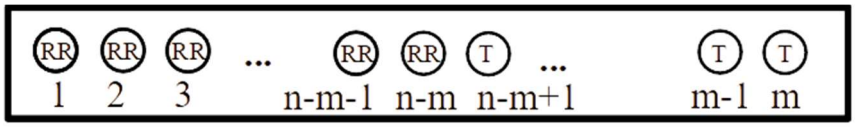


Fig. 8. q = n-m. Número de repetidores par.

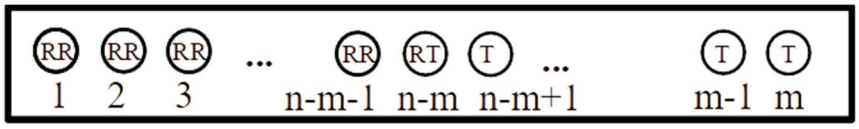


Fig. 9. q = n-m. Número de repetidores impar.

Nos hemos encontrado con otro supuesto argumento en contra de nuestro planteamiento -y, por ende, a favor de las parejas, tríos, etc.-: es demasiado arriesgado ocupar todos los puestos de laboratorio, ya que, en caso de averías y otros obstáculos, no disponemos de respaldos libres. En resumen, debemos dejar puestos vacíos a los que poder enviar a una pareja cuando surgen problemas irresolubles al momento. Además de otras objeciones que se pueden aducir, es una postura sospechosamente cómoda; siempre es más relajado reducir el número de "llamadas de socorro".

Aun así, ciertamente un solo docente atendiendo a, por ej., 24 estudiantes, cada cual con sus propias dificultades, puede volverse insostenible. Ante esto, las universidades suelen ofrecer dos soluciones eficaces:

1. Recurrir al técnico de laboratorio, cuyas funciones habitualmente incluyen apoyar a la docencia. Resultan de ayuda para resolver dificultades del alumnado con la instrumentación, soldar, etc.
2. El personal investigador en formación –es decir, doctorandos- suelen tener capacidad docente bajo ciertas restricciones. Además, les interesa acumular experiencia en el aula, a fin de acreditarse como profesorado. Se conviertes en un segundo docente, de apoyo, en el laboratorio.

III. Resultados obtenidos con las prácticas individuales

Esta medida ha sido llevada a cabo en Electrónica básica de primero del Grado en ingeniería en tecnología de telecomunicación de la Escuela de Ingeniería de Bilbao [3], con resultados satisfactorios, desde la Pandemia -curso 2019-20-. El alumnado se ha adiestrado con la instrumentación, según muestran las asignaturas subsiguientes. En la evaluación, ha quedado resuelto el problema de discriminar la nota de cada matriculado y ha evitado tener que examinar a estudiantes después de acabar las prácticas -ante la duda de si las ha aprovechado-.

IV. Un método que combina el aprendizaje en parejas con el individual

Durante la Pandemia el alumnado estaba obligado a trabajar individualmente también en los laboratorios, lo cual nos desveló algunas metodologías inexploradas hasta entonces. A continuación, un ejemplo sugestivo.

La asignatura de Sistemas digitales en tercero del Grado en ingeniería en tecnología de telecomunicación de la Escuela de Ingeniería de Bilbao [3] incluye una práctica final, tradicionalmente demasiado compleja como para ser abordada individualmente. Por tanto, o la simplificábamos, o buscábamos un método "paliativo". La salida fue distribuir el grupo en dos subgrupos, de forma que cada miembro de una pareja estuviera en subgrupos distintos; además, que dispusieran de sendas tarjetas microprocesadas en las que probar las prácticas -las habían tenido que montar individualmente-.

La clave era que, comunicándose por videoconferencia o medios equivalentes, estuvieran continuamente interactuando y al corriente, ambos, de los detalles del proyecto. El profesor iba pasando de un aula a la otra alternativamente, y en todo momento ambos miembros de la pareja debían poder contestar a cualquier pregunta sobre la tarjeta, el programa, la aplicación, etc. Los resultados fueron satisfactorios, ya que, de un lado, permitió mantener la distancia de seguridad sanitaria y, del otro, llevar a cabo una práctica en parejas.

V. Conclusiones

Sin negar las virtudes del aprendizaje cooperativo, este lleva tiempo enmascarando la importancia de adquirir conocimientos personalmente.

En las prácticas de laboratorio, la tentación es recurrir al trabajo en parejas, y descartar el hacerlas individualmente. La presente comunicación aboga por esto último y expone un procedimiento para asignar puestos en consecuencia.

También aborda el dilema de emparejar repetidores o no, apostando por lo primero; así, garantizamos, dentro de unos límites, que todo alumno realiza las prácticas individualmente al menos un año.

Por último, describe una distribución mixta de trabajo en parejas e individual, con ventajas docentes y sanitarias, a costa de ocupar dos laboratorios.

Referencias

[1] J. Zambrano, F. Kirschner, J. Sweller and P. Kirschner. "Effects of prior knowledge on collaborative and individual learning", Learn.

Instr., vol. 63, p. 101214, 2019, doi:10.1016/j.learninstruc.2019.05.011.

[2] B. D. Clinton and J. M. Kohlmeyer, “The effects of group quizzes on performance and motivation to learn: Two experiments in cooperative learning”, J. Account. Educ., vol. 23, no. 2, pp. 96-116, 2005, doi: 10.1016/j.jaccedu.2005.06.001.

[3] https://www.ehu.eus/es/web/graduak/grado-ingenieria-tecnologia-de-telecomunicacion.

Osciloscopio Wi-Fi de bajo coste para el aprendizaje autónomo del uso de instrumentación de laboratorio

D. Antolín-Cañada
Área de Electrónica
Escuela Universitaria Politécnica de la Almunia,
La Almunia de Doña Godina,
Zaragoza, España
dantolin@unizar.es

A. Rodríguez
Área de Electrónica
Escuela Universitaria Politécnica de la Almunia,
La Almunia de Doña Godina,
Zaragoza, España
610342@unizar.es

D. Enériz
Dept. Ingeniería Electrónica,
Facultad de Ciencias,
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
eneriz@unizar.es

N. Medrano
Dept. Ingeniería Electrónica,
Facultad de Ciencias,
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
nmedrano@unizar.es

B. Calvo
Dept. Ingeniería Electrónica,
Facultad de Ciencias,
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
becalvo@unizar.es

***Abstract*— El presente trabajo muestra una propuesta para la implementación de un osciloscopio FHDM TECH DSO-500K, basado en una Raspberry Pi Pico: y la aplicación Scoppy. El uso de esta herramienta se propone como una forma de facilitar el aprendizaje autónomo para el estudiantado de asignaturas de electrónica y la mejora en la instrumentación básica de laboratorio como es un osciloscopio. El aprendizaje en el manejo y uso de la instrumentación se basa en gran medida en la repetición en el manejo de la misma. Proporcionar al alumnado de una herramienta que les permita práctica fuera de las limitadas horas de laboratorio en las que disponen acceso a la instrumentación.**

Keywords— Osciloscopio, instrumentación electrónica, aprendizaje autónomo

I. Introducción

Este artículo muestra la propuesta en el uso como herramienta de laboratorio y de autoaprendizaje fuera del aula del uso de un osciloscopio comercial de bajo coste FHDM TECH DSO-500K [1], basado en una Raspberry Pi Pico y la aplicación para Android Scoppy [2] que permite el uso de la Raspberry Pi Pico como un osciloscopio conectado a un teléfono móvil o Tablet. La herramienta dispone además un pequeño generador de señales.

La necesidad de este trabajo parte de las dificultades en el manejo de la instrumentación básica del laboratorio, principalmente el osciloscopio, del estudiantado que cursa asignaturas de electrónica en el grado de ingeniería mecatrónica que se imparte en la Escuela Universitaria Politécnica de la Almunia, si bien el trabajo se ha extendido a las diferentes titulaciones del centro. Estas dificultades por parte del estudiantado se aprecian año tras año, incluso en ocasiones se mantiene conforme el alumnado va superando los diferentes cursos. En ocasiones el estudiantado alcanza las destrezas necesarias bastante avanzada la titulación.

El objetivo principal es poner a disposición del estudiantado una herramienta que les proporcione autonomía en el aprendizaje del uso de la instrumentación del laboratorio, que además sea atractiva, por lo que se propone el uso de un instrumento basado en un teléfono móvil o tableta. Siguiendo la premisa que recoge la frase de Rita Dunn: " Si un niño no puede aprender de la manera que enseñamos, quizá debemos enseñarles de la manera que ellos aprenden." No podemos olvidar que nuestro estudiantado aprende mucho a través de sus teléfonos y tabletas.

Como objetivo secundario se pretenden reducir el coste en el mantenimiento de equipos del laboratorio debido al mal uso, y malas conexiones realizadas por el estudiantado durante las sesiones prácticas, debidas a esas deficiencias en el manejo de la instrumentación, y que no se consiguen evitar a pesar de la supervisión del profesorado en las sesiones prácticas.

El proyecto se encuentra en fase de estudio para ver el interés del estudiantado en el mismo, así como en la forma de implantación, ya que proporcionar al estudiantado de una herramienta para el aprendizaje que pueda sacar del centro puede suponer un coste elevado para el mismo por un mal uso sin supervisión.

Para ver el interés el alumnado se ha dejado probar la herramienta utilizando sus propios dispositivos móviles o tabletas digitales para posteriormente pedirles que rellenen un formulario con una serie de cuestiones relativas al mismo.

Este trabajo está estructurado de la manera siguiente. En la sección II se presenta el contexto en que se enmarca la propuesta. La sección III muestra el dispositivo propuesto para la experiencia, las pruebas realizadas por el estudiantado para evaluar el sistema propuesto. La sección IV muestra la encuesta realizada al alumnado, así como los resultados obtenidos de la misma. Finalmente, la sección V expone las conclusiones.

II. Contexto

La Escuela Universitaria Politécnica de la Almunia imparte tres grados y un programa conjunto en los que se imparten asignaturas relacionadas con la electrónica: Ingeniería Mecatrónica, Ingeniería de Datos en Procesos Industriales e Ingeniería de Organización Industrial, además del programa conjunto en Ingeniería Mecatrónica e Ingeniería de Organización Industrial. Siendo Ingeniería Mecatrónica la titulación que mayor contenido en electrónica tiene dentro de su memoria de verificación [3], adquiriendo los titulados en este grado adquieren las competencias de Ingeniero Técnico Industrial según la orden CIN/351/2009 (BOE-A-2009-2893, 2009) [4].

Dadas las atribuciones profesionales y el mayor número de asignaturas en el plan de estudios del Grado en Ingeniería

Mecatrónica (BOE-A-2010-18363, 2010) [5] hacen que la propuesta sea especialmente interesante en dicha titulación.

La Tabla I muestra las diferentes asignaturas donde se imparte electrónica en la Escuela Universitaria Politécnica de la Almunia.

TABLA I. ASIGNATURAS DE ELECTRÓNICA EN LAS TITULACIONES IMPARTIDAS EN LA EUPLA

Grado	Asignatura
Ingeniería Mecatrónica	Ingeniería Electríca
	Tecnología Electrónica I (Electrónica Analógica)
	Tecnología Electrónica II (Electrónica Digital)
	Electrónica de Potencia
	Instrumentación Electrónica
	Instrumentación Avanzada
Ingeniería de Datos en Procedos Industriales	Circuitos y Fundamentos de Electrónica
	Electrónica Digital
	Instrumentación Electrónica
Ingeniería de Organización Industrial	Fundamentos de Electrónica

Dadas las necesidades de mejora en el uso de la instrumentación electrónica por parte del alumnado y la importancia para el centro dada la elevada carga en electrónica de alguna de las titulaciones que en el mismo se imparten se propone el presente estudio.

III. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

A. *Descripción del Hardware*

La Fig. 1 muestra el osciloscopio que utiliza como base una Raspberry Pi Pico, el cual se ha dado a probar al estudiantado para obtener información sobre el interés que esta herramienta puede generar en ellos.

Existe un modelo comercial que consta de una Raspberry Pi Pico con conectividad WiFi y tiene un precio de 35€ y qué además integra un pequeño generador de señales. El sistema puede adaptarse a un modelo DIY (*Do It Yourself*) más económico y utilizarse únicamente con una Raspberry y algunos componentes pasivos, reduciendo las prestaciones del sistema comercial, ya que a priori se estaría perdiendo la funcionalidad como generador de señales. Para esta última opción el corte podría reducirse hasta los 10€ aproximadamente.

En la imagen de la Fig. 1 se observan un osciloscopio Hantek DSO2D15 con generador de señales integrado, el cual está generando la señal triangular que se ve tanto en ambos osciloscopios. Sin embargo, la onda senoidal esta generada a partir del propio del osciloscopio FHDM TECH DSO-500K. Con esta imagen se pretende demostrar que la herramienta propuesta es adecuada dentro de sus especificaciones de trabajo. A continuación, se detallan algunas de sus características:

- Frecuencia de muestreo 500kS/s (250kS/s con ambos canales habilitados
- Ancho de banda analógico: 150kHz

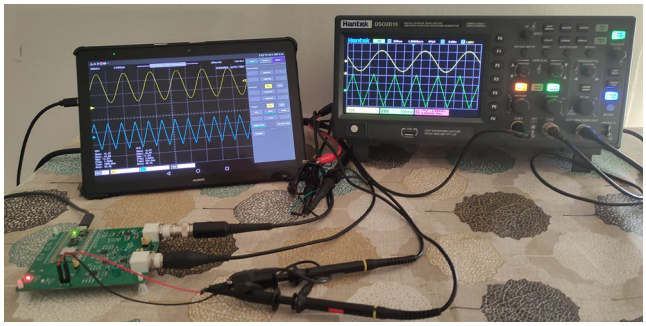
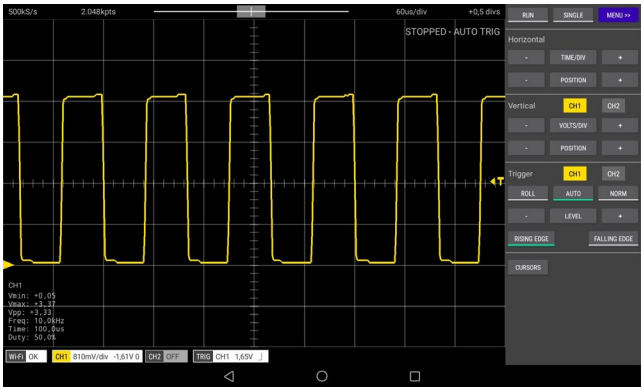


Fig. 1. Osciloscopio basado en Raspberry Pi Pico frente a un osciloscopio convencional

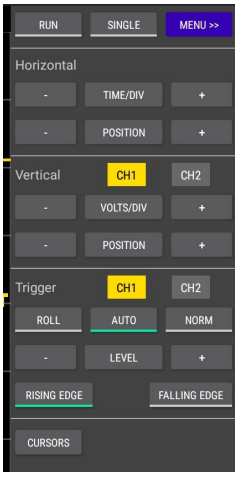
- Impedancia de entrada: 1MΩ / 22pF
- Rango máximo de voltaje de entrada: +/- 6 V (sondas x1)
- Modos de acoplamiento: AC/DC
- Conectividad: USB, Wi-Fi
- Modos del display: YT, FFT, FFT+YT, X-Y, X-Y+YT
- Modos de Disparo (Trigger Types): Flanco de subida/Flanco de Bajada
- Trigger Modes: Auto/Normal (Run Mode + Single captures)
- Cursores: YT y FFT cursores horizontales y verticales
- Medidas en pantalla: Vmin, Vmax, Vpp, Frecuencia, Periodo, Ciclo de Trabajo (Duty)
- Medidas instantáneas: media, DC RMS, AC RMS
- Formato de exportación de datos: CSV
- Generador de Señales → frecuencia de la onda cuadrada hasta 1.25 MHz, onda senoidal 1 kHz

Por otro lado, como pantalla de visualización de datos es necesario conectar vía Wi-Fi un teléfono o una tableta digital Andriod que tenga instalada la aplicación Scoppy. Esta aplicación resulta intuitiva y con características y controles simulares a un osciloscopio convencional como pueden ser el nivel de "trigger", la escala del canal de entrada, etc. En la Fig. 2a se presenta una captura de la pantalla de la aplicación Scoppy, mientras que la Fig. 2b muestra el detalle de algunos de los controles de la aplicación. La aplicación es gratuita para su uso con un único canal de adquisición, si se quiere hacer uso de la adquisición en los dos canales el coste es de 2€.

Como se puede ver en las imágenes de la Fig. 2, a y b, la herramienta permite la adquisición de las competencias necesarias para la utilización de un osciloscopio convencional. Una de las ventajas que presenta el uso de la misma viene dada por el aislamiento existente entre la placa de adquisición de datos con la Raspberry Pi Pico y el dispositivo móvil. En caso de una mala conexión que pudiera llegar a dañar el circuito, únicamente estaría en riesgo la placa de adquisición de datos, cuyo coste es contenido y muy inferior a un teléfono móvil o tableta digital.



(a)



(b)

Fig. 2. Capturas de pantalla de la aplicació Scoppy. a) Captura de la pantalla completa. b) Detalle del menú de control del osciloscopio.

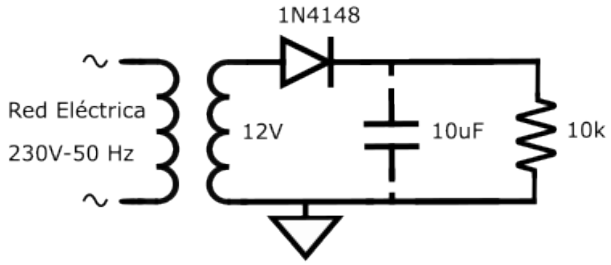
B. *Descripción de las Pruebas Llevadas a Cabo por los Estudiantes*

Para mostrar a los estudiantes la funcionalidad y utilidad del osciloscopio FHDM TECH DSO-500K se prepara un circuito rectificador en media al que se puede conectar un condensador de filtrado cuyo esquema se muestra en la Fig. 3 a. Cuando los miembros del estudiantado comenzaron a realizar las pruebas habían estudiado estos circuitos y realizado una práctica de laboratorio relacionada con estos circuitos. De esta manera pueden comprar el uso de la herramienta propuesta con la instrumentación del laboratorio proporcionando una realimentación en el cuestionario con un mayor conocimiento del circuito y del uso de la instrumentación, por lo que a priori se entiende que las respuestas se proporcionaran con una mayor comprensión por parte del alumnado.

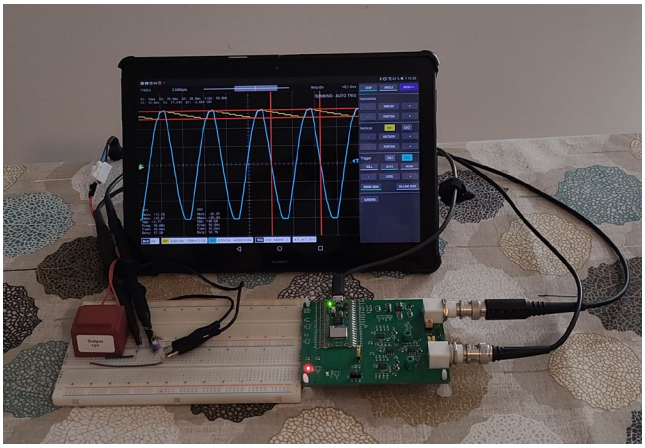
La Fig. 3 b muestra el circuito montado para las pruebas de los estudiantes realizando una medida del rizado del condensador, utilizando para ello los cursores de la aplicación.

IV. Formulario y Resultados

Las pruebas han sido supervisadas por un estudiante de últimos cursos, de esta manera se trata de evitar la posible influencia del profesorado en los estudiantes a la hora de utilizar la herramienta y de responder al formulario.



(a)



(b)

Fig. 3. Circuito rectificcador utilizado para las pruebas de los estudiantes. a) Esquema de circuito. b) Montaje experimental.

En el momento de la redacción de el presente documento han participado 25 estudiantes, de los cuales 17 cursan el grado en ingeniería mecatrónica, 6 en el programa conjunto de en ingeniería mecatrónica e ingeniería de organización industrial y 2 grado de ingeniería de organización industrial. Mostrando que son los estudiantes del grado en ingeniería mecatrónica los que presentan un mayor interés en la propuesta. La distribución por cursos es la siguiente: 8 estudiantes de segundo, 6 de tercero y 11 de cuarto.

Las preguntas planteadas al estudiantado son las siguientes:

- **Te parece interesante el uso de la aplicación para Android y el osciloscopio de bajo coste como herramienta de autoaprendizaje en el manejo de instrumentación de laboratorio:** a todos los participantes les ha resultado interesante.
- **¿Para qué asignaturas crees que es interesante?** Para analizar estos datos se han agrupado la asignatura con contenidos similares de las diferentes titulaciones. Las respuestas a esta pregunta se muestran en la Tabla II. De esta se extrae que el estudiantado considera la instrumentación propuesta en este trabajo interesante para el aprendizaje de las asignaturas: Ingeniería Eléctrica, Tecnología Electrónica I (Electrónica Analógica) e Instrumentación Electrónica. Si bien algunos estudiantes la consideran interesante para todas las asignaturas relacionadas con la electrónica.

TABLA II. INTERÉS DE LA HERRAMIENTA POR ASIGNATURAS.

Asignatura	Número de Alumnos
Ingeniería Electríca	20
Tecnología Electrónica I (Electrónica Analógica)	20
Tecnología Electrónica II (Electrónica Digital)	12
Electrónica de Potencia	5
Instrumentación Electrónica	14
Instrumentación Avanzada	5

- **¿Crees que esta herramienta te hubiera ayudado a aprobar alguna asignatura que hayas cursado previamente? Indica cual.:** de manera general las respuestas proporcionadas coinciden con las mostradas en la tabla anterior una vez los alumnos han cursado la asignatura en concreto.
- **¿Estarías dispuesto a pagar el precio que cuesta esta herramienta?:** 22 de los 25 participantes manifiestan estar dispuestos a pagar para poder utilizar esta herramienta.
- **La aplicación Android es gratuita para el uso del osciloscopio con un canal. En la versión de pago permite el uso de dos canales y cuesta 2$. ¿Pagarías la versión completa?** 21 de los 25 estudiantes participantes estarían dispuestos a asumir dicho coste.

La última pregunta tiene que ver con la forma de adquirir el osciloscopio FHDM TECH DSO-500K como instrumentación de aprendizaje autónomo. Las opciones que se proponen son:

- Adquisición por parte del estudiante.
- Préstamo por parte del centro con fianza.
- Ninguna de las opciones anteriores.

De los 25 alumnos que han participado de la experiencia hasta el momento 22 de ellos estarían dispuestos a adquirir el dispositivo, mientras que los 3 restantes estarían dispuestos a utilizarlo en un modelo de préstamo con fianza. Todos ellos han mostrado interés en el uso de la herramienta.

Se plantean estos métodos de disposición del osciloscopio de bajo coste ya sean la adquisición particular o bien el préstamo con fianza para fomentar la responsabilidad en el uso de la instrumentación de laboratorio.

V. CONCLUSIONES

Todos los estudiantes que han participado de la experiencia consideran interesante el uso de la herramienta para el aprendizaje autónomo en diferentes asignaturas del área de electrónica.

La mayoría de ellos, 22 de 25 han manifestado su disposición para adquirir a título particular el osciloscopio FHDM TECH DSO-500K mientras que el resto optan por un sistema de préstamo con fianza.

Actualmente, la participación del estudiantado no ha sido elevada por lo que se van a proponer diferentes medidas para mejorar la participación. También se va a tratar de fomentar el uso de esta herramienta a través del Moodle proporcionando los enlaces necesarios para la adquisición del dispositivo.

Además, se van a realizar diferentes vídeos que mostraran las opciones de uso y el manejo de la herramienta, proporcionando al estudiantado la información necesaria y suficiente para su utilización de manera autónoma para que puedan hacer uso de esta instrumentación

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realiza gracias al apoyo institucional de la Convocatoria competitiva de Proyectos de Innovación: Docencia, Tecnología, Orientación, Social y Transferencia de la Universidad de Zaragoza (PI_DTOST) en el año 2023, con referencia ID 4774 y título " Osciloscopio basado en teléfono móvil o tableta como herramienta de aprendizaje autónomo de instrumentación de laboratorio en asignaturas donde se imparten conocimientos de Electrónica".

REFERENCIAS

[1] FHDM-TECH, "DSO-500K operating instructions" [Online]. Disponible: https://oscilloscope.fhdm.xyz/dso-500k (último acceso 04/04/2024).

[2] FHDM-DEV, "Scoppy" [Online]. Disponible: https://github.com/fhdm-dev/scoppy (último acceso 04/04/2024).

[3] Memoria para la solicitud de verificación del título oficial graduado o graduada en ingeniería mecatrónica. Universidad de Zaragoza [Online]. Disponible: https://academico.unizar.es/sites/academico.unizar.es/files/archivos/oficiplan/memorias/grado/ingenieria/mv_150.pdf (último acceso 04/04/2024).

[4] BOE-A-2009-2893, 2009. [Online]. Disponible: https://www.boe.es/eli/es/o/2009/02/09/cin351 (último acceso 04/04/2024).

[5] BOE-A-2010-18363, 2010 [Online]. Disponible: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2010-18363 (último acceso 04/04/2024).

Diseño e Implementación de un Modelo de Páncreas Artificial para Jóvenes Estudiantes

Jorge Jiménez-Sánchez
Departamento de Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
jjsanchez@us.es

Daniel Narbona Miguel
Departamento de Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
dnarbona@us.es

Pedro Blanco-Carmona
Departamento de Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
pblanco@us.es

José María Hinojo-Montero
Departamento de Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
jhinojo@us.es

Eduardo Hidalgo-Fort
Departamento de Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
ehidalgo@us.es

Esperanza María Suárez Sánchez
Departamento de Matemáticas
I.E.S Virgen del Valme
Dos Hermanas, Sevilla, España
esuasan736@g.educaand.es

Fernando Muñoz-Chavero
Departamento de Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
fmunoz@us.es

***Abstract*— El fomento de carreras científico-técnicas en las etapas iniciales de la formación de los estudiantes es vital para formar a los investigadores, científicos y/o profesionales del futuro. Para ello, la comunidad científica y académica debe acercar el trabajo desarrollado en los Centros de Investigación y/o Universidades a los alumnos que cursan estudios en los Institutos de Enseñanza Secundaria. Con este objetivo, surge el programa STEM "Jóvenes Investigadores", cuya finalidad es acercar al alumnado de 4º de la ESO y 1º de Bachillerato al método científico y su aplicación para la resolución de una determinada problemática. La presente contribución describe la metodología de trabajo desarrollada por investigadores y profesores del Departamento de Ingeniería Electrónica y el Grupo de Ingeniería Electrónica, perteneciente a la Universidad de Sevilla, para acercar a dicho alumnado al diseño de sistemas electrónicos, de forma amena y llamativa. Para ello, se ha desarrollado un proyecto de investigación que consiste en la creación de un modelo de páncreas artificial, cuyo funcionamiento sea equivalente al de un paciente de diabetes de tipo 1. El trabajo se ha organizado de forma que el alumnado, a través de 4 sesiones prácticas, aprende los conceptos básicos de electrónica y programación de sistemas empotrados necesarios para poder implementar y simular el comportamiento de este órgano. Para finalizar el artículo, se presentarán algunas de las conclusiones extraídas por los alumnos, profesores e investigadores participantes de la experiencia.**

Keywords—Páncreas artificial, realimentación, modelo, Arduino.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el mercado laboral ha experimentado un cambio significativo, impulsado en gran medida por los avances en las ingenierías y la investigación en España [1]. Este progreso ha llevado consigo la necesidad de adaptarse a un entorno cada vez más tecnológico y competitivo. En este contexto, la educación juega un papel crucial en la preparación de los jóvenes para enfrentar los desafíos que les depara el futuro, tanto en el ámbito académico como en el profesional.

Paralelamente, la investigación en España ha experimentado una mejora significativa en los últimos años [2]. Muchas empresas del sector privado en España están incluyendo departamentos de I+D+i o recurriendo a universidades o centros de investigación para realizar una transferencia tecnológica desde el sector público al sector privado. Por tanto, es fundamental poner en valor estas investigaciones y nuevas metodologías de transferencia tecnológica.

De la anterior necesidad surgen iniciativas que ofrecen a los jóvenes una visión práctica del mundo de la investigación y la importancia de la transferencia de conocimiento desde las instituciones académicas y de investigación hacia la sociedad.

Una de esta iniciativa surge con el Proyecto STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics) "Jóvenes con Investigadores" [3]. Este proyecto ha contribuido a fomentar la cultura científica desde edades tempranas, promoviendo una conexión directa entre el ámbito educativo y el mundo de la investigación. La metodología que persigue esta iniciativa es permitir a estudiantes de secundaria y bachillerato desarrollar pequeños proyectos con investigadores de universidades y centros de investigación españoles. Dentro de este proyecto se ha promovido la interacción entre estudiantes y profesores y/o investigadores, fomentando la colaboración interdisciplinaria y el desarrollo de habilidades investigativas.

En este contexto, es relevante destacar el compromiso con la investigación por parte del Departamento de Ingeniería Electrónica (DINEL) de la Universidad de Sevilla [4], que desempeña un papel fundamental en el avance de la tecnología electrónica y su aplicación en diversos campos. Este departamento ejerce una labor docente e investigadora de gran relevancia, contando con una destacada plantilla de profesores e investigadores. A través de su labor de investigación, el Departamento contribuye significativamente al desarrollo de tecnologías electrónicas avanzadas, que abarcan desde sistemas de comunicación hasta dispositivos médicos,

reflejándose en una labor de transferencia de tecnología hacia el entorno industrial y social con la creación de 8 spin-offs.

La Investigación en DINEL se lleva a cabo a través de sus grupos de investigación. Particularmente, el Grupo de Ingeniería Electrónica (GIE, TIC-192) impulsa proyectos innovadores y colaborativos que contribuyen al avance científico y tecnológico, tanto a nivel nacional como internacional, y proporciona una plataforma para la formación de futuros investigadores y profesionales en el campo de la electrónica.

El Departamento DINEL mantiene un fuerte compromiso fomentando las habilidades investigadoras y de transferencia con el alumnado. Es por ello por lo que participa activamente en diversas asociaciones de alumnos, como ARUS[5], USRacing[6], VANTUS[7] y FyCUS[8], apoyando la labor de investigación entre los estudiantes y fomentando el desarrollo de habilidades investigativas desde las etapas formativas.

Para ampliar dicho compromiso y dar a conocer la amplia labor de investigación desarrollada, varios profesores e investigadores pertenecientes al grupo GIE adscrito al departamento DINEL se unen al proyecto "Jóvenes con Investigadores" en el año 2023. Este compromiso refleja el enfoque integral del Departamento y el Grupo de Investigación hacia la formación de futuros alumnos, investigadores y profesionales en el campo de la electrónica.

Dentro del Proyecto "Jóvenes con Investigadores", y dada la experiencia previa en instrumentación electrónica y proyectos relacionados con el sector sanitario en el grupo GIE [9] [10], se propone desarrollar un proyecto destinado al diseño y montaje de un modelo de páncreas artificial basado en [11].

Este proyecto está destinado a mostrar a los participantes como un páncreas artificial puede mejorar la calidad de vida a personas que padecen diabetes tipo I proporcionando una monitorización continua de la concentración de glucosa en sangre e inyectando insulina de manera automática. Además, busca iniciar al alumnado en los conceptos básicos de electrónica, control y programación, proporcionándoles una base sólida para comprender y abordar proyectos tecnológicos más avanzados en el futuro. De esta forma, el desarrollo del presente proyecto da a conocer el sector de la ingeniería y la labor de investigación a los alumnos participantes, con la finalidad de ayudarlos en su futura elección de grado universitario. Nótese que estos objetivos están completamente alineados con el propósito del proyecto "Jóvenes con Investigadores", ampliando su alcance para incluir también la promoción de la ingeniería y la educación en tecnología entre los participantes.

El objetivo de este artículo es mostrar cómo se ha desarrollado la experiencia educativa y el proyecto propuesto durante una serie de sesiones guiadas por parte del grupo de investigadores. En estas sesiones, a partir de diversos métodos de aprendizaje, los estudiantes aprendieron desde los conceptos básicos necesarios para crear el modelo de páncreas artificial hasta la obtención de un dispositivo final funcional que se mostró y defendió en un congreso con el resto de los grupos participantes en "Jóvenes con Investigadores".

El presente artículo está organizado de la siguiente manera: la Sección II recoge la planificación temporal del proyecto, así como una descripción de los métodos de aprendizaje utilizados. En la Sección III, se muestra la descripción del trabajo y del problema de la diabetes, junto con un modelado de alto nivel del sistema a desarrollar. La implementación del páncreas artificial y los resultados se muestran en la Sección IV. Finalmente, la Sección V recoge las conclusiones extraídas de esta experiencia.

II. Planificación y Métodos de Aprendizaje

Para estructurar el desarrollo del proyecto, se diseñó un plan que consta de cuatro sesiones guiadas por los profesores e investigadores encargados. La Tabla 1 muestra el plan desarrollado.

TABLA 1. Planificación de la Sesiones del Proyecto

Sesión	Fecha	Tareas
1	16/01/2023	Introducción al problema
		Conceptos básicos teóricos
		Introducción al laboratorio
		Fabricación de prototipo del sensor y desarrollo hardware de la etapa de adaptación del sensor
2	30/01/2023	Introducción a Arduino y programación en C++
		Realización de ejemplos básicos con Arduino
		Desarrollo software del algoritmo de gestión de insulina.
3	20/02/2023	Desarrollo hardware de la bomba de insulina
		Integración de pantalla para el sistema
		Montaje hardware del sistema completo
		Pruebas con el sistema completo
4	20/03/2023	Preparación de memoria final
		Preparación de diapositivas para el congreso
		Preparación de póster para el congreso

Dentro del desarrollo del proyecto se han utilizado diferentes métodos de aprendizaje en cada una de las diferentes sesiones del proyecto definidas. La selección de métodos y actividades recayó en los profesores e investigadores basándose cuidadosamente en los objetivos del aprendizaje.

Durante la exposición del problema inicial en la primera sesión, se optó por aprendizaje basado en escenarios prácticos. Para la explicación de los conceptos básicos, instrumental de laboratorio y conceptos de programación, en la primera y la segunda sesión, se eligió el método expositivo. En el desarrollo e integración del prototipo del modelo del páncreas artificial (tercera sesión) se optó por un método de aprendizaje basado en proyectos. Finalmente, en la cuarta sesión, para la integración y la elaboración de la memoria final, la presentación y la preparación del congreso se basó en el método de aprendizaje colaborativo.

A continuación, se presentan una breve descripción de cada uno de los métodos de aprendizaje utilizados en esta experiencia educativa.

A. Método de aprendizaje basado en escenarios prácticos

El método de aprendizaje basado en escenarios prácticos (ABEP) es una estrategia pedagógica que sumerge a los estudiantes en situaciones simuladas, ya sean reales o ficticias, que reflejan contextos profesionales o de la vida cotidiana [12].

En este enfoque, los alumnos se enfrentan a desafíos específicos dentro de un marco narrativo estructurado, donde asumen roles y toman decisiones que les permiten aplicar conocimientos teóricos en un entorno práctico. A través de la

resolución de problemas contextualizados, los estudiantes desarrollan habilidades cognitivas, sociales y emocionales, promoviendo un aprendizaje activo, significativo y transferible a situaciones reales. Este método fomenta la colaboración, la creatividad y la reflexión crítica, potenciando el desarrollo integral de los estudiantes y preparándolos para enfrentar con éxito los retos del mundo laboral y académico.

Dentro de nuestro contexto, se utilizó dicha metodología para introducir al alumno en el problema de la diabetes. Se llevó a cabo una serie de debates donde los estudiantes analizaron diversas soluciones tecnológicas desde el punto de vista de los investigadores que pretende mejorar las condiciones de vida de los pacientes con diabetes. Este enfoque permitió que los alumnos exploraran las ventajas y desventajas de cada solución, fomentando la reflexión crítica y la creatividad en la búsqueda de soluciones innovadoras. De esta manera, los estudiantes no solo adquirieron conocimientos teóricos sobre el tema, sino que también desarrollaron habilidades prácticas y analíticas que son fundamentales en el campo de la ingeniería y la tecnología.

B. Método expositivo

El método expositivo es una técnica pedagógica que implica la presentación estructurada de un tema con el objetivo de proporcionar información organizada. Se centra en la transmisión de conocimientos, la promoción del pensamiento crítico y la capacitación para abordar problemas y seleccionar métodos para resolverlos.

Esta metodología se basa principalmente en la exposición verbal por parte del profesor, conocida a veces como "lección magistral". Las exposiciones verbales pueden variar en su formato y medios, pero la característica distintiva es su naturaleza unidireccional, donde el profesor transmite información a los estudiantes. Aunque comúnmente se asocia con la entrega de teoría a un gran número de alumnos, el método expositivo puede adaptarse para diferentes propósitos didácticos, como exponer contenidos básicos, explicar relaciones entre fenómenos, demostrar hipótesis y teoremas, y presentar experiencias prácticas para ilustrar la aplicación de los contenidos.

En el contexto que nos ocupa, este método se utilizó para presentar los conceptos básicos de carácter biológico para entender la enfermedad de la diabetes y sus consecuencias. Por otra parte, también se utilizó para presentar a los alumnos el instrumental básico de laboratorio que dispusieron para las diferentes sesiones, aplicando pequeños conceptos prácticos con cada uno de los equipos. Finalmente, también se usó este método para introducir a los alumnos los principios básicos de la programación y las características del dispositivo Arduino.

C. Método de aprendizaje basado en proyectos

El método de aprendizaje basado en proyectos es un enfoque interactivo en el aula en el cual los alumnos asumen la responsabilidad de su aprendizaje y el de sus compañeros, trabajando juntos para lograr metas y objetivos grupales [13]. En este método, los estudiantes aprenden unos de otros, del profesor y del entorno. El objetivo principal de este método es desarrollar el pensamiento crítico y las habilidades para resolver problemas, a medida que los alumnos planifican y llevan a cabo proyectos complejos y motivadores [14].

Este método guarda una estrecha relación con el ámbito de la investigación y los proyectos de ingeniería, ya que promueve un enfoque interactivo y colaborativo que refleja la dinámica de trabajo en equipos multidisciplinarios tan común en la investigación y desarrollo de proyectos en ingeniería.

En el ámbito de la investigación, este método fomenta la exploración activa y el descubrimiento de soluciones a problemas complejos, lo que refleja el proceso investigativo. Los estudiantes no solo adquieren conocimientos teóricos, sino que también desarrollan habilidades para identificar preguntas de investigación, diseñar experimentos y recopilar y analizar datos de manera crítica, simulando así el trabajo de un investigador.

Es por ello por lo que este método se ha utilizado para el desarrollo y la implementación del objetivo principal del proyecto, mediante la división en diversas tareas o pequeños proyectos, que en su globalidad da como resultado el desarrollo completo de un modelo funcional de páncreas artificial.

Además, este método de aprendizaje fomenta la colaboración y el trabajo en equipo, habilidades esenciales en la investigación y en la industria de la ingeniería, donde los proyectos suelen requerir la colaboración de expertos de diversas áreas para alcanzar soluciones integrales y efectivas.

En nuestro contexto, los alumnos se han dividido en diversos grupos dedicándose a cada una de las partes del sistema (sensor, actuador, notificaciones) y, finalmente, han compartido dichos conocimientos adquiridos para la integración del modelo final.

D. Método de aprendizaje colaborativo o cooperativo

El aprendizaje colaborativo o cooperativo es un enfoque interactivo de organización del trabajo en el aula donde los estudiantes asumen la responsabilidad tanto de su propio aprendizaje como del de sus compañeros, con el objetivo de alcanzar metas e incentivos grupales. Este método se caracteriza por la colaboración entre grupos pequeños y heterogéneos de estudiantes, quienes trabajan juntos para lograr los objetivos de aprendizaje mediante una propuesta de trabajo determinada [15].

A través del aprendizaje colaborativo, se busca desarrollar aprendizajes activos y significativos de forma cooperativa, promoviendo un aprendizaje profundo y por comprensión. Este enfoque resulta especialmente útil en actividades donde el trabajo en equipo garantiza mejores resultados que el trabajo individual.

Es importante que los grupos sean lo suficientemente diversos para garantizar una riqueza de interacciones, pero también lo bastante pequeños para facilitar la participación de todos los miembros. Esta estrategia es versátil y puede combinarse con otros métodos, como el aprendizaje basado en proyectos, para potenciar el desarrollo de competencias sociales y colaborativas.

En nuestro contexto, esta metodología se realizó en la última parte del proyecto de cara a la preparación del congreso. Se realizaron grupos pequeños, de 4 a 6 alumnos, que recibieron consignas de los profesores para realizar la memoria final, la presentación y el póster. Los propios grupos se organizaron y planificaron la tarea mediante el consenso. Cada miembro del grupo asume responsabilidades específicas y se convierte en un "experto" en áreas determinadas.

El aprendizaje colaborativo se ha llevado a cabo tanto dentro como fuera del aula (en el congreso), y el éxito de cada

alumno, al final, ha dependido del logro de las metas del grupo en su conjunto.

III. Descripción del Trabajo

El objetivo central del proyecto es diseñar e implementar un modelo de páncreas artificial que simule como actúan estos dispositivos para, de manera automatizada, realizar una monitorización continua de la glucosa y una administración de insulina automática.

Para comprender la relevancia y el contexto de este trabajo, es esencial abordar primero el problema de la diabetes y la necesidad imperante de soluciones innovadoras y comerciales que se desarrollan en el ámbito de la investigación electrónica para este campo específico. Posteriormente, se presenta el funcionamiento del páncreas artificial, junto con el concepto de realimentación, relacionado tanto con el funcionamiento del páncreas real como el artificial. Una vez afianzados los anteriores conceptos, se presenta el modelo que se realizará en este proyecto.

A. Diabetes

La diabetes es una enfermedad crónica que afecta la capacidad del cuerpo para regular la cantidad de azúcar (glucosa) en la sangre [16]. Si no se detecta y trata a tiempo, puede derivar en problemas graves para la salud. La glucosa es un monosacárido crucial en el metabolismo, permitiendo que las células realicen funciones vitales como la respiración celular.

En cuanto al funcionamiento del páncreas y la insulina, el páncreas produce una hormona llamada insulina, que actúa como una "llave" para regular los niveles de azúcar en la sangre, permitiendo que la glucosa entre en las células del cuerpo para su uso como energía.

Existen varios tipos de diabetes. En aquella catalogada como tipo 1 [17], el páncreas no produce insulina. Los síntomas incluyen sed, micción frecuente, cansancio y pérdida de peso sin razón aparente. Este tipo de diabetes suele aparecer normalmente en niños y jóvenes y suele alcanzar entre el 5% y el 10% de los casos totales. Suele ser una enfermedad de por vida que no se puede evitar y el tratamiento con insulina es obligatorio. En la diabetes tipo 2, hay niveles altos de glucosa debido a la producción insuficiente de insulina o a una resistencia a la misma. Aparece normalmente en adultos y puede estar ocasionada por obesidad, predisposición genética o falta de ejercicio. Los síntomas incluyen aumento de sed y hambre, visión borrosa y cansancio. Este tipo de diabetes se puede revertir y evitar, siendo necesario el tratamiento con insulina sólo aquellos casos que revisten mayor gravedad. Por último, como caso especial, la diabetes gestacional ocurre durante el embarazo cuando el cuerpo no produce suficiente insulina. Puede aumentar el riesgo de complicaciones tanto para la madre como para el bebé. Es común que desaparezca después del parto, pero se recomienda realizar pruebas de sangre para su prevención.

B. Soluciones tecnológicas para la diabetes

En el mercado existen una variedad de dispositivos diseñados para la monitorización e inyección de glucosa en sangre. Por un lado, se encuentran los medidores de azúcar en sangre que permiten realizar pruebas puntuales. Por otro lado, existen bombas manuales de insulina que son controladas de forma manual por el paciente. Cuando se integra un sensor junto con una bomba y se controla de forma automatizada, el sistema resultante se denomina páncreas artificial.

El objetivo principal de un páncreas artificial es mejorar la calidad de vida de las personas que padecen diabetes tipo 1, cuyo páncreas no produce insulina [18]. Estos dispositivos son capaces de medir de manera automática el nivel de glucosa en sangre y administrar la cantidad necesaria de insulina para mantener un nivel óptimo de glucosa en el cuerpo, permitiendo que las células realicen funciones vitales y obtengan energía.

En el desarrollo del páncreas artificial, se emplea el concepto de retroalimentación, comúnmente utilizado en diversos campos como la ingeniería y la biología, para controlar de manera autónoma el sistema. La retroalimentación implica medir la salida del sistema para estimar el error cometido en el control del sistema y poder actuar de forma inversa a la variación de este, permitiendo al sistema alcanzar el valor deseado. La retroalimentación negativa, usada en el diseño del páncreas artificial, busca reducir o contrarrestar los efectos de una acción que haya alterado el sistema, manteniendo así su equilibrio o estado original (ver Figura 1).

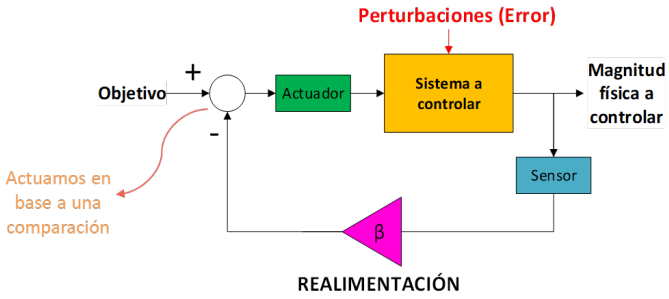


Fig. 1. Diagrama Genérico de Realimentación Negativa

El propio proceso biológico que regula el nivel de azúcar en sangre tras la ingesta de alimentos es un ejemplo de retroalimentación negativa.

Tras la ingesta de alimentos, el cuerpo absorbe la glucosa del torrente sanguíneo, lo que aumenta su concentración en la sangre y desencadena la liberación de insulina por parte del páncreas. Este proceso se muestra en la Figura 2.

El mecanismo de retroalimentación negativa se observa en cómo los niveles elevados de glucosa activan la liberación de insulina, lo que a su vez reduce los niveles de glucosa en sangre. Cuando los niveles de glucosa disminuyen demasiado, se cierra este proceso para evitar hipoglucemia.

El uso de la retroalimentación negativa en el diseño del páncreas artificial permite replicar este proceso biológico para mantener los niveles de glucosa en sangre dentro de un rango específico, mejorando así el control de la diabetes y la calidad de vida de quienes la padecen.

Un páncreas artificial, siendo un sistema realimentado, se componen principalmente de tres elementos:

- Un **monitor/sensor** continuo de glucosa que registra la cantidad de glucosa en el cuerpo y envía esta información al controlador.
- Un **controlador** que calcula la cantidad de insulina que se debe administrar y envía una señal a la bomba.

- Una **bomba** que administra la insulina en pequeñas cantidades. Hay diferentes tipos, como bombas externas que se sitúan fuera del cuerpo y bombas de almohadilla que insertan la insulina a través de un catéter bajo la piel.

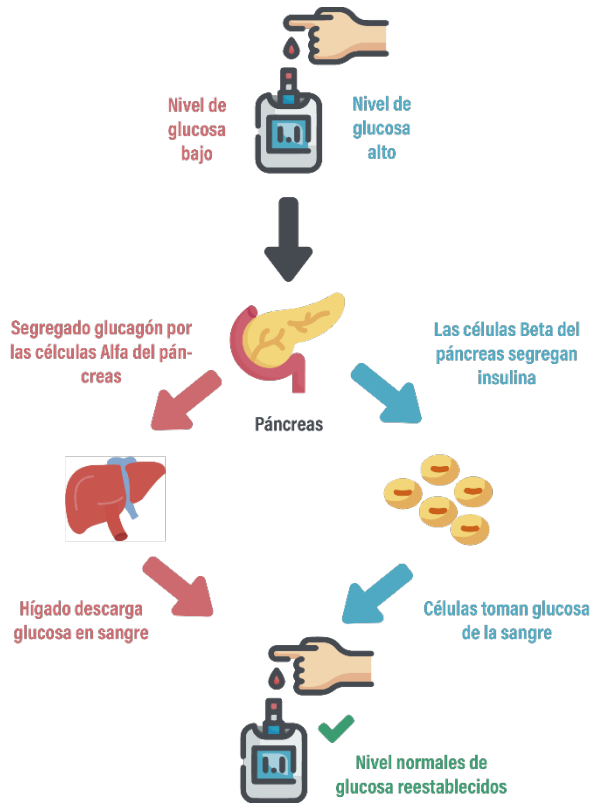


Fig. 2. Diagrama funcionamiento del páncreas

Estos dispositivos automatizados mejoran la calidad de vida de quienes padecen esta enfermedad, aunque requieren que el paciente controle la cantidad de carbohidratos consumidos. Tenemos varios ejemplos comerciales como el MedtrinicMinimed670G [19], aprobado en 2016. La baja proliferación de dispositivos comerciales que simulan un páncreas se debe a los constantes estudios y ensayos clínicos requeridos antes de su comercialización. Sin embargo, varias empresas están trabajando en comercializar sus productos y adaptarlos a diferentes pacientes y tipos de insulina.

C. Modelo

En la ciencia, la experimentación y las pruebas son fundamentales para validar hipótesis, avances e investigaciones. Sin embargo, en muchos casos, no es posible experimentar directamente con el sistema real objeto de estudio. Es en este contexto donde entran en juego los modelos.

Los modelos son representaciones simplificadas de la realidad. Para su implementación, se requiere un estudio exhaustivo que equilibre el grado de complejidad con el costo y la precisión respecto a la realidad. Un modelo detallado puede reflejar con mayor precisión el comportamiento real, pero suele implicar un alto costo computacional y de tiempo.

El modelo páncreas artificial que se realizó en este trabajo, mediante agua destilada y agua normal (conductora), simula el comportamiento de la glucosa en sangre cuando se administra insulina en un cuerpo humano. El uso de agua para el modelo se debe a la imposibilidad de trabajar con elementos reales, como sangre y medidores de glucosa, debido a razones de seguridad sanitaria y coste.

El modelo consta de los siguientes elementos:

- **Recipiente 1:** Contiene agua destilada, que simula la sangre.
- **Recipiente 2:** Contiene agua normal (conductora), que actúa como insulina.
- **Bomba:** Inyecta agua desde Recipiente 2 (agua normal conductora) a Recipiente 1 (agua destilada), simulando la inyección de insulina.
- **Sensor:** Sensor de conductividad compuesto por un soporte de corcho con dos electrodos conductivos (clavos). Este sensor se sumerge en el Recipiente 1 y mide la conductividad del agua, actuando como una resistencia variable en función del contenido del recipiente.

En la Tabla 2, se muestra una comparativa de los elementos en la realidad y en el modelo.

TABLA 2. COMPARATIVA DE LOS ELEMENTOS USADOS EN EL SISTEMA DE PÁNCREAS ARTIFICIAL Y EL MODELO

Sistema Real	Modelo
Sangre	Recipiente 1 (agua destilada)
Sensor de glucosa en sangre	Sensor de conductividad en recipiente 1
Insulina	Recipiente 2 (agua normal conductiva)
Azúcar debido a la ingesta de alimentos	Vaso de agua destilada en recipiente 1 (disminuye resistividad del agua)
Bomba de insulina	Bomba para inyectar agua normal conductiva desde el recipiente 2 al recipiente 1 (aumenta resistividad del agua)

Tras la definición de los componentes del modelo, tendríamos el siguiente comportamiento:

- Si al Recipiente 1 (agua destilada que simula la sangre del paciente) le añadimos un vaso de Agua Destilada, la resistividad aumenta. Esto equivaldría a una subida de azúcar debido a la ingesta de alimentos.
- En cambio, si al mismo Recipiente 1 le añadimos Agua del Recipiente 2 (agua normal conductiva que simula insulina), la resistividad disminuye. Esto equivaldría a la inyección de insulina.

El funcionamiento del modelo de páncreas artificial es el siguiente:

1. El sensor mide la conductividad del agua destilada (representa la sangre) en el Recipiente 1 y determina un nivel inicial de resistividad (representa la glucosa).
2. Si el microcontrolador detecta niveles alto de resistividad (representa un exceso de glucosa), indica que se requiere inyección de agua normal conductiva (representa inyección de insulina) para disminuir la resistividad (representa una reducción de glucosa).
3. La bomba suministra agua normal conductora del Recipiente 2 al Recipiente 1, aumentando la conductividad y emulando la acción de la insulina.

Este modelo simplificado nos permite simular el comportamiento del sistema de forma segura y económica, proporcionando una herramienta efectiva y fácil de implementar de cara a la etapa de diseño y el desarrollo del modelo de páncreas artificial.

IV. Organización de las Sesiones

El proceso de la implementación del modelo de páncreas artificial se ha llevado a cabo en cada una de las sesiones planificadas, permitiendo al alumnado familiarizarse con los conceptos e instrumentos de forma progresiva. La implementación del modelo se llevó a cabo abordando aspectos clave como el desarrollo del hardware, la programación del sistema y la integración de componentes para obtener un dispositivo funcional y eficaz.

A continuación, se ha dividido por puntos la implementación realizada en cada sesión incluyendo sus respectivas actividades y resultados obtenidos.

A. Sesión 1: Introducción y diseño hardware

En la primera sesión, tras presentar el proyecto y la planificación de las sesiones. se realizó una introducción al problema de la diabetes mediante un debate estructurado para introducir a los participantes en el contexto. Se facilitó un diálogo donde se discutieron las diversas facetas de la enfermedad, incluyendo sus causas, síntomas, tratamientos y desafíos asociados. Se fomentó la participación de todos los presentes para promover una comprensión más profunda del problema. Al mismo tiempo, mediante un enfoque expositivo, se explicaron el funcionamiento biológico del páncreas y el concepto de realimentación en el contexto de la regulación de la glucosa en sangre.

Se utilizaron ejemplos básicos y se emplearon recursos visuales para facilitar la comprensión del concepto de realimentación. Estos recursos iban desde un pequeño experimento de percepción táctil con y sin visión hasta ejemplos mostrados en diapositivas (regulación manual de la temperatura del agua en la ducha, aire acondicionado, luz que entra por el globo ocular o el proceso de homeostasis).

Seguidamente, se realizó una presentación sobre el instrumental que se utilizará en el laboratorio para el proyecto (ver Figura 3). Se mostraron el funcionamiento de la fuente de alimentación Rigol DP832, el multímetro Rigol DM3058E, el generador de señal Rigol DG822 y el osciloscopio Rigol DS1104. Se brindó información detallada sobre el funcionamiento y la manipulación de cada equipo, así como sobre las precauciones de seguridad para tener en cuenta durante su uso. Se realizaron diversos ejemplos conectando los equipos entre ellos (generación de diferentes voltajes y medición con el multímetro o generación de señales variables y visualización con el osciloscopio).

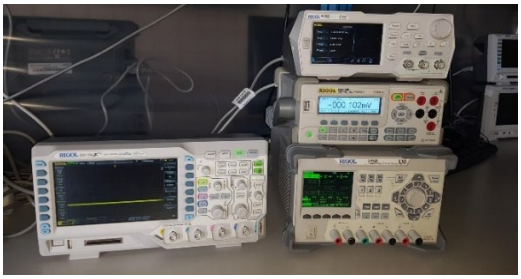


Fig. 3. Instrumental de Laboratorio

Adicionalmente, se implementó el sensor de conductividad para el modelo del páncreas artificial. El sensor de conductividad se utilizará para medir la conductividad o resistencia eléctrica de nuestro modelo para un medio acuoso como el agua. La resistencia es la formada en el medio acuoso entre los dos electrodos del sensor. Este sensor está compuesto por un soporte (se utiliza como medio de soporte) y dos electrodos implementados con dos clavos de metal como se muestra en la Figura 4.

Fig. 4. Sensor de Conductividad implementado

La conductividad, inversa de la resistividad, cambiará su valor según las propiedades del medio acuoso, es decir, se comportará como una resistencia variable, cuyo valor se deberá cuantificar.

Dado que el controlador (Arduino) no permite medir directamente valores de resistencias, sólo mide valores de tensión, para realizar dicha medida de resistencia es necesario implementar un divisor de tensión (ver Figura 5). El divisor consiste en una resistencia (R) conocida conectada en serie con nuestro sensor (resistencia variable Rsensor). A dicha resistencias en serie se les aplica una tensión conocida (VDC). Con este circuito tendremos una medida relativa de tensión (Vsensor) proporcional al valor de la resistencia variable (Rsensor).

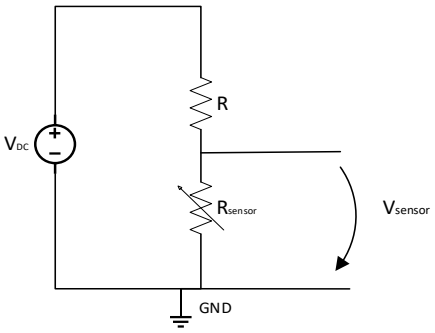


Fig. 5. Diagrama divisor resistivo

Tras varias pruebas de medición, tanto con agua destilada como con agua normal conductora, se detectó que los valores de resistencia obtenidos no se estabilizaban con el tiempo. Esto se debe a que, al tener un valor fijo de tensión proporcionado por una fuente de tensión, en el medio acuoso (conductivo cuando no es agua destilada), se crea un fenómeno físico conocido como electrólisis [20].

Para solventar dicho problema, se invierten la tensión VDC con una frecuencia de 3Hz y, de esta forma, los iones no tienen suficiente tiempo para que sean traídos completamente hacia los electrodos. Esta solución permite realizar una medida correcta y estable de la resistencia.

B. Sesión 2: Programación con Arduino

En esta sesión, se procedió con la introducción a Arduino y la programación en C++. Se brindó una visión general de

Arduino como plataforma de prototipado electrónico de código abierto y se explicaron los conceptos básicos de la programación en C++ para su uso con Arduino usando un método expositivo [21].

Se presentó el entorno IDE de Arduino y, posteriormente, se realizaron ejemplos básicos con el modelo Arduino UNO rev3 para familiarizar a los participantes con la interfaz de desarrollo y las capacidades de la plataforma que usaremos en el proyecto. Estos ejemplos incluyeron la manipulación de entradas y salidas digitales y analógicas, así como el uso de sensores y actuadores básicos y comunes en proyectos de electrónica.

Una vez que los participantes adquirieron cierta familiaridad con Arduino, se procedió al desarrollo del software del algoritmo de gestión de insulina. Se explicaron los requisitos y especificaciones del algoritmo, así como los pasos necesarios para su implementación en Arduino.

Tras la declaración de variables necesarias para la configuración de los periféricos y el almacenamiento de la información durante la ejecución de las rutinas, el algoritmo de control implementado en el software se implementa la configuración de periféricos (setup) donde se configuran los pines necesarios para operar con la bomba de inyección de insulina, la pantalla LCD, el convertidor analógico-digital (ADC) y el puerto de comunicaciones serie. Esta función se ejecuta solo una vez al arrancar el sistema.

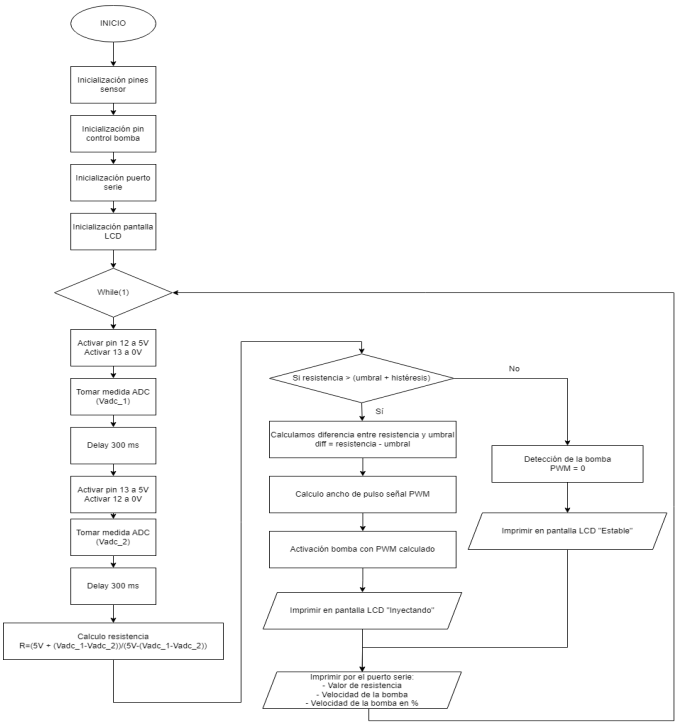


Fig. 6. Diagrama de flujo del Software del Controlador

En la ejecución de la rutina (loop o bucle infinito) se ejecutan las siguientes tareas:

1. Conexión de los pines del sensor de conductividad a 5 V y 0 V para medir la tensión a través del pin ADC.
2. Inversión de la tensión de los pines conectados al sensor de conductividad para evitar el efecto de electrolisis. Se vuelve a realizar la medición de la tensión.
3. Cálculo del valor de resistencia del sensor (media de los dos valores anteriores) de conductividad para determinar la necesidad de suministrar insulina.
4. Comparación del valor de resistencia calculado con un valor umbral, ajustado según las necesidades del paciente y con un margen de histéresis para mejorar la estabilización.

   Si la resistencia está dentro del rango establecido, la bomba se detiene y se muestra "Estable" en la pantalla LCD.

   Si la resistencia está fuera del rango establecido, se activar la bomba con una determinada velocidad de suministro de insulina. Se muestra "Inyectando" en la pantalla LCD.
5. Impresión por el puerto serie del valor de la resistencia con fines de depuración.
6. Una vez completadas estas tareas, el bucle infinito comienza nuevamente.

En la Figura 6 se muestra como resumen el diagrama de bloques del algoritmo implementado.

C. Sesión 3 Integración del sistema

En la cuarta sesión, se llevó a cabo la integración hardware y software del sistema completo. En la Figura 7 se muestra un esquemático del montaje completo del modelo de páncreas artificial.

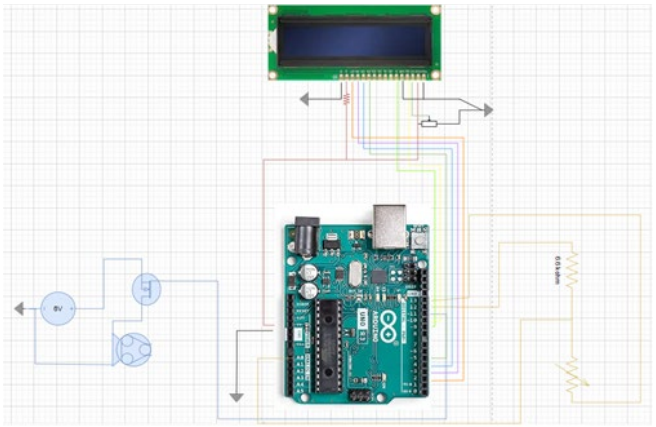


Fig. 7. Esquemático del montaje completo del modelo de páncreas artificial

En esta sesión se empleó el Método de Aprendizaje por Proyectos, dividiendo a los participantes en 3 grupos más pequeños, y asignando a cada grupo un bloque de tareas.

El primer grupo se encargó de diseñar, implementar y probar el hardware necesario para el funcionamiento de la bomba de insulina.

El desarrollo hardware de la bomba de insulina implica la integración de diversos componentes para su correcto funcionamiento. La bomba, controlada por el Arduino (controlador del sistema), se encarga de inyectar la insulina (en nuestro caso, agua de normal conductiva) en el cuerpo (representado por el Recipiente 1 de nuestro modelo).

Se ha seleccionado una bomba peristáltica 3910 de Adafruit Industries LLC (ver Figura 8) ya que es un dispositivo que nos ofrece mucha precisión a la hora de bombear cualquier líquido.

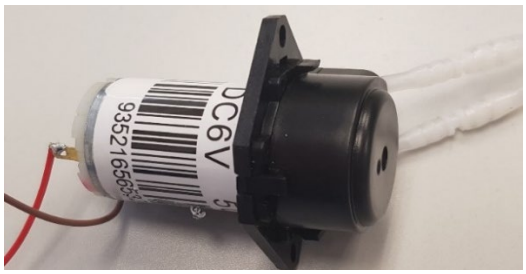


Fig. 8. Bomba peristáltica Adafruit Industries LLC 3910

Para activar la bomba, dado que el Arduino no puede suministrar la corriente necesaria, se utilizará un transistor MOSFET IRLB8721PBF y una fuente de alimentación externa de 6V.

El transistor MOSFET se conectará de manera que su entrada esté vinculada a la fuente de alimentación y su salida a la bomba. El cierre del transistor permitirá el paso de corriente, lo que activará la bomba. Esta activación se realizará a través de un pin de control del controlador (Arduino), el cual no requiere una corriente significativa.

Para gestionar la velocidad de la bomba, se empleará una señal PWM generada por el controlador (Arduino) a través del pin de control del MOSFET. La señal PWM modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica, permitiendo variar el ancho de pulso. Un ancho de pulso mayor aumentará la velocidad de la bomba y, por ende, la cantidad de insulina a inyectar (en nuestro caso agua normal conductiva), mientras que un ancho de pulso menor reducirá la cantidad de insulina.

El segundo grupo trabajó en la integración de una pantalla al sistema. Esto implicó la conexión de la pantalla al microcontrolador y la programación necesaria para mostrar información relevante para el usuario, como mensajes de estado o mediciones de conductividad (que en nuestro modelo representa la glucosa).

La pantalla LCD integrada en el montaje es el modelo HD44780, que consta de dos filas con capacidad para mostrar hasta 16 caracteres en cada una, incluyendo un potenciómetro para ajustar el nivel de contraste de la pantalla. La pantalla mostrará dos estados posibles: "Inyectando" cuando la bomba está activa y "Desactivada" cuando la bomba está detenida.

El último grupo se centró en ensamblar todos los componentes hardware del sistema completo. Partiendo del desarrollo hardware del sensor de conductividad y su etapa de adaptación realizada en la primera etapa del proyecto, integraron la bomba de insulina y la pantalla, cuyos montajes fueron preparados por los otros dos grupos de esta sesión.

Se aseguraron de que todos los componentes estuvieran correctamente interconectados y funcionaran de manera conjunta según lo especificado en el diseño del proyecto. Además, se realizó una calibración del software final ajustando los parámetros para el umbral de detección y la velocidad de la bomba.

El montaje completo se muestra en la Figura 9. Se añadió al agua normal conductiva un tinte azul para verificar visualmente el correcto comportamiento de la inyección mediante la bomba peristáltica.

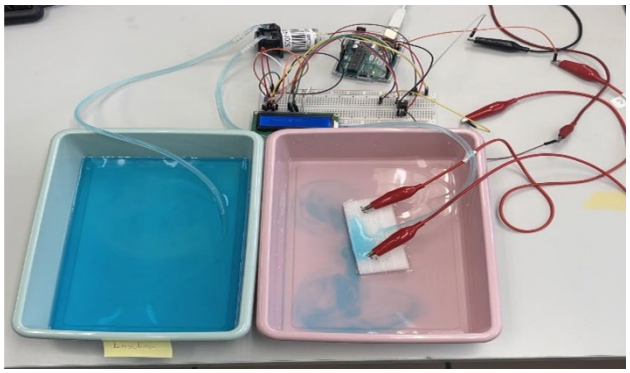


Fig. 9. Montaje completo del Modelo de Páncreas Artificial

Cada grupo trabajó en su tarea asignada, y al final de la sesión se llevó a cabo la validación del modelo completo para verificar el funcionamiento conjunto del sistema completo.

Tras realizar pruebas, se obtuvo la variación de resistencia en el sensor de conductividad. En la Figura 10 se muestran los valores medidos en ohmios de la resistencia del sensor en el medio acuoso (Recipiente 1, que simula la sangre del paciente). Valores altos de resistencia indican una alta cantidad de azúcar en sangre. Si la resistencia supera el umbral definido (correspondiente a la cantidad deseada de glucosa en sangre), la bomba se activa y comienza a suministrar insulina. El valor ideal en el modelo es 100 Ω, y valores menores indican necesidad de azúcar. Se ha establecido un valor de histéresis para evitar oscilaciones y suministrar insulina en exceso.

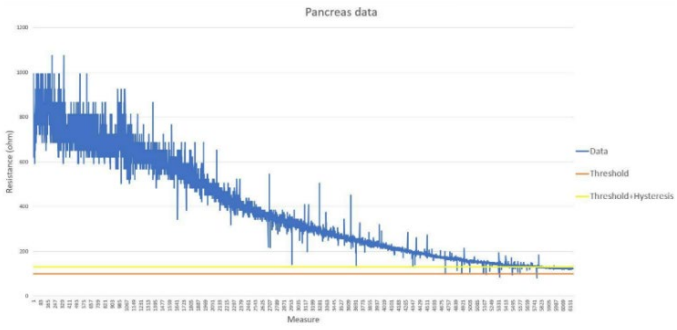


Fig. 10. Valores de resistencia medidas.

La Figura 11 representa la señal PWM. Al inicio, el ancho del pulso es grande, indicando un suministro elevado de insulina. A medida que se acerca al valor deseado, el ancho del pulso disminuye, indicando un suministro menor de insulina.

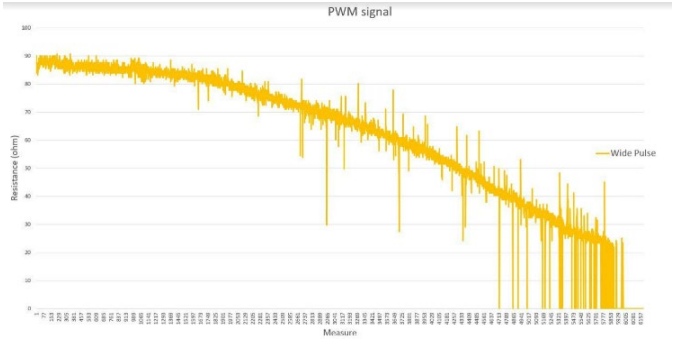


Fig. 11. Valores del ancho de pulso de la señal PWM

D. Sesión 4; Preparación para el congreso

La última sesión, se reservó para la preparación para el congreso final de "Jóvenes con Investigadores". Usando una metodología de aprendizaje colaborativo, se realizaron grupos para la realización de la memoria final, la presentación y el póster.

Los estudiantes continuaron asumiendo dichas responsabilidades específicas dentro de sus grupos en el congreso final para la presentación oral y la exposición del póster.

V. Conclusiones

En esta publicación, se ha demostrado como la colaboración de alumnos de instituto y bachillerato junto con los investigadores de la universidad, ha sido un éxito. Se ha verificado que, gracias a las distintas metodologías de aprendizaje, se ha podido guiar a los alumnos en el diseño e implementación de un modelo de páncreas, con el fin de recrear una monitorización continua de la glucosa y una administración de insulina automática.

Al cabo de las cuatro sesiones realizadas, los alumnos consiguieron los hitos de definición del problema, diseño e implementación hardware y software, integración del sistema completo y pruebas de verificación. Además, los alumnos realizaron una memoria explicativa de todo el trabajo realizado, aparte de crear y exponer materiales para el VIII congreso "Jóvenes con investigadores" [22] y la feria de las ciencias de Dos Hermanas en Sevilla (España) [23].

Agradecimientos

La investigación ha sido financiada por la Universidad de Sevilla a través del VI Plan Propio de Investigación y Transferencia (VI PPIT-US) y con la participación del Grupo de Ingeniería Electrónica y el Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Sevilla. El trabajo se ha desarrollado bajo el marco del proyecto Jóvenes con Investigadores, financiado por la Junta de Andalucía.

Referencias

[1] OECD, "OECD Main Science and Technology Indicators." Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: https://www.oecd.org/sti/msti2024march.pdf

[2] COTEC, "Evolución de la I+D." Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: https://cotec.es/informes/evolucion-de-la-id/

[3] Jóvenes con investigadores, "Jóvenes con investigadores | Investigación en secundaria y bachillerato." Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: https://jovenesconinvestigadores.wordpress.com/

[4] Departamento de Ingeniería Electrónica, "Departamento de Ingeniería Electrónica – Página web del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Sevilla." Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: https://www.dinel.us.es/

[5] ARUS, "ARUS Andalucía Racing Team." Accessed: May 06, 2024. [Online]. Available: https://www.arusteam.com/

[6] USRacing, "USRacing." Accessed: May 06, 2024. [Online]. Available: https://www.linkedin.com/company/usracing/

[7] VANTUS, "VANTUS – Equipo de aeromodelismo de la US formado por estudiantes de Ingeniería Aeroespacial." Accessed: May 06, 2024. [Online]. Available: https://vantusaeroteam.wordpress.com/

[8] FYCUS, "FYCUS - Fly Your CubeSat US." Accessed: May 06, 2024. [Online]. Available: https://grupo.us.es/fycusstce/

[9] R. Martin Clemente and F. Muñoz Chavero, "Plataforma para la evaluación de algoritmos de detección del electrocardiograma fetal," in XXX Congreso Anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica, 2012.

[10] Comisión Europea, Universidad de Sevilla, Consejería de Salud, Real e Ilustre Colegio Farmacéuticos de Sevilla, and I. Administração Regional de Saúde Algarve, "NUMA Nuevo modelo asistencial." Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: https://investigacion.us.es/sisius/sis_proyecto.php?idproy=28304

[11] Science Buddies, "Dealing with Diabetes: The Road to Developing an Artificial Pancreas | Science Project." Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/project-ideas/HumBio_p040/human-biology-health/developing-an-artificial-pancreas

[12] Universidad Bicentenaria de Aragua, Experiencias de Aprendizaje Basado en Emprendimiento por Proyectos. Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: https://uba.edu.ve/wp-content/uploads/2022/07/LIBRO-EXPERIENCIAS-ABEP-TOMO-III-27-07-2022.pdf

[13] A. G.-V. Muñoz-Repiso and V. B. Gómez‐Pablos, "Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP): evaluación desde la perspectiva de alumnos de Educación Primaria." 2017. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/10201/52389

[14] Sonia Rebollo Aranda, "Aprendizaje basado en Proyectos", Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: https://archivos.csif.es/archivos/andalucia/ensenanza/revistas/csicsif/revista/pdf/Numero_24/SONIA%20_REBOLLO%20ARANDA_1.pdf

[15] D. W. Johnson, R. T. Johnson, and E. J. Holubec, El aprendizaje cooperativo en el aula. in Paidós educador. Paidós, 1999. [Online]. Available: https://books.google.es/books?id=wO0BAAAACAAJ

[16] I. Conget, "Diagnóstico, clasificación y patogenia de la diabetes mellitus," Rev Esp Cardiol, vol. 55, no. 5, pp. 528–538, 2002, [Online]. Available: https://www.revespcardiol.org/es-diagnostico-clasificacion-patogenia-diabetes-mellitus-articulo-13031154

[17] R. Barnett, "Type 1 diabetes," Lancet, vol. 391, no. 10117, p. 195, Jan. 2018, Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30277879/

[18] M. Nwokolo and R. Hovorka, "The Artificial Pancreas and Type 1 Diabetes," J Clin Endocrinol Metab, vol. 108, no. 7, pp. 1614–1623, Jun. 2023, Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36734145/

[19] MedTronic, "MiniMed 670G Guía del usuario del sistema." Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: https://www.medtronicdiabetes.com/sites/default/files/library/download-library/user-guides/MiniMed-670G-Gu%C3%ADa-del-usuario-del-Sistema.pdf

[20] H. Golnabi, M. Matloob, M. Bahar, and M. Sharifian, "Investigation of electrical conductivity of different water liquids and electrolyte solutions," Iranian Physical Journal, vol. 3, Apr. 2009.

[21] L. Louis, "Working Principle of Arduino and Using it as a Tool for Study and Research," in International Journal of Control, Automation, Communication and Systems, Apr. 2018. doi: 10.5121/ijcacs.2016.1203.

[22] Universidad de Sevilla, "Alumnos de secundaria presentan sus proyectos en el VIII Congreso Jóvenes con Investigadores." Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: https://investigacion.us.es/noticias/5518

[23] Periódico La Semana Dos Hermanas, "I Jornada Científica de Centros Educativos de Dos Hermanas." Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: https://periodicolasemana.es/2023/114394/aulas/i-jornada-cientifica-de-centros-educativos-de-dos-hermanas/

Implementación y Pruebas del Algoritmo CORDIC Binario en Modo Rotación

Gonzalo Guillamón-Martín
Estudiante Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
GonzaloGM@uma.es

Jorge Romero-Sánchez
Dept. de Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
jromeros@uma.es

Jose A. Hidalgo-López
Dept. de Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
jahidalgo@uma.es

Raquel Fernández-Ramos
Dept. de Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
ramos@uma.es

Resumen— **Análisis del algoritmo de CORDIC (Coordinate Rotation Digital Computer) en sus siguientes aspectos: base teórica (convergencia), algoritmo y arquitecturas básicas. Como objetivo se pretende realizar el diseño, simulación, síntesis, implementación y evaluación de las arquitecturas combinacional y secuencial del algoritmo CORDIC en modo rotación en VHDL, haciendo uso de la herramienta VIVADO. La plataforma hardware utilizada es un APSOC (All Programmable System-On-Chip): el ZYNQ 7010Q de Xilinx. Este artículo se encuentra enmarcado en un contexto de Trabajo de Fin de Grado (TFG) con un propósito educativo, siendo extrapolable a la realización de prácticas de laboratorio de la asignatura de 4º curso Sistemas Electrónicos para Automatización (GIERM) del grado de Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica en la mención de Robótica.**

Palabras clave— **CORDIC, VHDL, APSOC**.

I. INTRODUCTION

El algoritmo CORDIC viene de la abreviatura Coordinate Rotation Digital Computer, se puede considerar a Jack E. Volder como el autor del mismo ya que el definió la primera versión de forma iterativa para su implementación en sistemas digitales, ver por ejemplo [1], de manera que se pudieran realizar cálculos de funciones en un principio trigonométricas (incluidas las inversas en modo vector), y extendiéndose posteriormente a multiplicaciones, divisiones y funciones hiperbólicas y sus inversas tal y como se describe en [4]. Para una completa recopilación histórica de la evolución del algoritmo CORDIC en sus principales aspectos teóricos y de implementación hardware consultar [2].

El concepto clave de la aritmética CORDIC se basa en los principios simples y antiguos de la geometría cartesiana y las transformaciones de Givens en el plano. Pero la formulación iterativa del algoritmo computacional para su implementación fue descrita por primera vez en 1959 por Jack E. Volder para el cálculo de funciones trigonométricas y sus inversas. Aunque CORDIC puede no ser la técnica más rápida para realizar estas operaciones, es atractiva debido a la simplicidad de su implementación de hardware, ya que el mismo algoritmo iterativo podría usarse utilizando las operaciones básicas shift-add de la forma $a \pm b2^{-i}$.

En su totalidad todo este análisis de CORDIC se encuentra enmarcado en un contexto de TFG perteneciente al grado de GIERM, con un propósito educativo además de la consecución del título de ingeniero, y cada parte que se expone en este artículo son etapas objetivo desarrolladas en la planificación prevista para el TFG, por esta razón el análisis de la implementación física en APSOC haciendo uso del analizador lógico integrado (ILA) que incorpora la herramienta Vivado, se enmarca como meta final del proyecto y no estará integrado dentro del artículo a día de hoy.

Este artículo expone de manera resumida lo recogido en la memoria final del TFG salvo la parte de pruebas finales. En primer lugar y dentro del apartado II se describen brevemente los fundamentos teóricos y el teorema de convergencia de CORDIC y cuya demostración original se recoge en [4]. En el apartado III y siguiendo el procedimiento presentado en la memoria final del proyecto se describen los objetivos, la descripción de arquitecturas modeladas Pipeline (combinacional) y secuenciales; haciéndose una descripción breve de la aritmética en punto fijo que se ha utilizado para el desarrollo del modelo CORDIC. En cuanto al apartado IV se simula el código en VHDL y se muestran algunos resultados en la generación de las funciones seno-coseno con tiempos de simulación (no reales) y un análisis final de los recursos hardware empleados. Al final, ya en el apartado V se presentan las conclusiones obtenidas hasta el momento.

Este TFG demuestra que a partir de elementos básicos de electrónica digital como puede ser un sumador, un biestable, o un tipo de representación se pueden obtener una solución a un problema complejo, por lo que para cualquier persona que quiera empezar a aprender electrónica, enseñar a diseñar los componentes básicos de este proyecto que son la ROM y el sumador así como, las distintas estructuras para implementar un circuito digital tal y como se cursa en la asignatura de Electrónica Digital del segundo curso de GIERM, o la descripción formal mediante lenguajes de descripción hardware como VHDL que se cursa en la asignatura de 4º curso Sistemas Electrónicos para Automatización. El tener la oportunidad de que los resultados de este trabajo puedan utilizarse en prácticas de laboratorio para los subsiguientes cursos

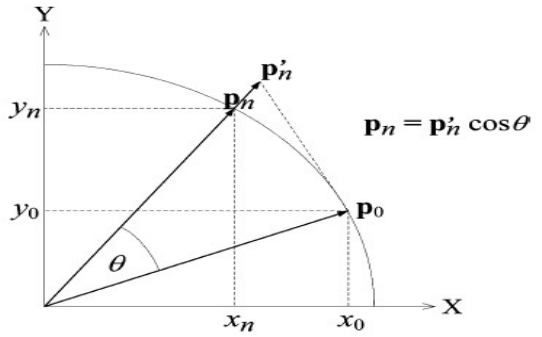


Fig. 1. Base del problema que resolver

resulta gratificante como alumno que cursó dicha asignatura.

II. BASE Y CONVERGENCIA

El punto de partida no es más que la simple rotación de un vector en el plano al que se le denomina como P_0. La rotación de este vector se parametriza por medio de un ángulo determinado al que denominaremos θ. Tal y como se muestra en la Fig. 1.

Este vector P_0 vendrá dado por sus coordenadas en el espacio cartesiano bidimensional, en este caso, $P_0=[x_0,y_0]$, la rotación de este vector a través del ángulo θ, dará lugar a un vector rotado denominado $P_n=[x_n,y_n]$, que también viene dado por sus coordenadas en el espacio cartesiano bidimensional. La forma tradicional de realizar esta rotación es mediante una matriz de rotación de Givens que denominamos R, y tiene la siguiente forma:

$$R=\begin{bmatrix}\cos(\theta) & \text{sen}(\theta)\\ -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta)\end{bmatrix} \qquad (1)$$

De esta forma se podría obtener una ecuación que expresa el vector resultante en función del ángulo de rotación θ, y del vector inicial P_0, esta ecuación no es más que un producto de matrices $P_n=R*P_0$. Este sería el método de rotación clásico, pero con CORDIC se pretende expresar esta matriz de rotación R en función de la tangente para después poder restringir su valor, por eso mismo se quiere factorizar R para obtener una matriz de rotación en la que únicamente se encuentre la tangente del ángulo θ, siendo el otro factor un número real positivo que escala dicha matriz, tal y como aparece en la siguiente ecuación:

$$R=\left[\left(1+\tan^2\theta\right)^{-1/2}\right]\begin{bmatrix}1 & -\tan(\theta)\\ \tan(\theta) & 1\end{bmatrix}=KR_c \qquad (2)$$

En la ilustración 1, se puede observar que también existe un vector denominado P'_n, este vector sería el resultante de realizar la rotación del vector transformado únicamente a partir de la matriz de pseudo-rotación (la matriz R formada exclusivamente con tangentes de θ). Donde podemos representar el primer término como un factor de escala ó de ganancia y el segundo será la mencionada matriz de pseudo-rotación. El factor de escala al que llamaremos K viene dado por la expresión: $K=[(1+\tan^2\theta)^{-1/2}]$, y la matriz de pseudo-rotación se denomina R_c. De aquí se concluye que $P'_n=R_c*P_0$, si se quisiera obtener el vector P_n simplemente lo que se debe hacer es aplicar el factor de escala K, de manera que $P_n=K\cdot P_n'$ para realizar la operación de rotación básica original.

La aritmética de CORDIC persigue realizar una simplificación del hardware empleado en la rotación siguiendo dos etapas:

- Descomponer las rotaciones en una secuencia de rotaciones elementales a través de ángulos predefinidos que podrían implementarse con un costo mínimo de hardware.

$$\theta=\sum_{i=0}^{n-1}\sigma_i\cdot\alpha_i\ ,\ \text{y}\quad \sigma_i=\pm 1 \qquad (3)$$

- Evitar el escalado, que podría implicar un aumento de la complejidad en operaciones tales como la raíz cuadrada y la división.

$$K_i=\prod_{i=0}^{n-1}K_i=\prod_{i=0}^{n-1}1/\sqrt{(1+2^{-2i})} \qquad (4)$$

K_i converge a ~ 1.6467805

Después de todo el análisis realizado para reducir al máximo el hardware empleado con el algoritmo, se puede obtener las iteraciones básicas de CORDIC aplicando la pseudo-rotación del vector, es decir, $P'_{i+1}=R_c(i)P_i$, junto con la descomposición de los ángulos seleccionados α_i, se obtiene la siguiente descomposición:

$$\begin{bmatrix}x_{i+1}\\ y_{i+1}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & -\sigma_i 2^{-i}\\ \sigma_i 2^{-i} & 1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}x_i\\ y_i\end{bmatrix} \qquad (5)$$

Esta igualdad se puede reescribir como:

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= x_i - \sigma_i\cdot 2^{-i}\cdot y_i\\ y_{i+1} &= y_i + \sigma_i\cdot 2^{-i}\cdot x_i\\ z_{i+1} &= z_i - \sigma_i\cdot\alpha_i \end{aligned} \qquad (6)$$

Donde z representa el acumulador del método y almacena la cota de la convergencia en la codificación del ángulo θ. Las iteraciones de CORDIC pueden utilizarse en dos modos de funcionamiento, el modo de rotación (RM) y el modo de vectorización (VM), que difieren básicamente en la forma en que se eligen las direcciones de las micro-rotaciones. Este proyecto se centrará a priori en el modo de rotación el cual tiene las siguientes características:

- En el modo de rotación, un vector P_o se gira en un ángulo θ para obtener un nuevo vector P_n'.

- En el modo de rotación, la dirección de cada micro-rotación σ_i está determinada por el signo de z_i : si el signo de z_i es positivo, entonces $\sigma_i=1$, de lo contrario $\sigma_i=-1$.

Durante todo el análisis anterior se ha visto que el algoritmo CORDIC está basado en series (ver ecuación (3), por ejemplo) ya sea para el factor de escala o para la descomposición del ángulo o simplemente para las ecuaciones generales. Se recuerda que todo ello queda soportado por el algoritmo de convergencia demostrado por J.S Walther en [4] que está basado en la siguiente hipótesis fundamental:

$$\alpha_k \leq \alpha_{n-1} + \sum_{j=k+1}^{n-1} \alpha_j \qquad 0 \leq k \leq n-1 \qquad (7)$$

Ahora bien, la descomposición del ángulo solo podría usarse dentro de un intervalo: $-1.74329 \leq \theta \leq 1.74329$, (este intervalo viene (3)) al cual llamaremos rango de convergencia y dependerá de la dirección de las micro-rotaciones. Por lo tanto, la descomposición angular es aplicable a los ángulos de los cuadrantes primero y cuarto. Aunque más tarde se realizaran correcciones que resultaran en la posibilidad de utilizar también el tercer y segundo cuadrante. El rango de convergencia delimitara el valor inicial que debe tomar z, para que se asegure que este converge para la cota que marca el teorema y que viene dada por la inecuación (8), donde n es el orden del algoritmo:

$$|z_n| \leq \alpha_{n-1} = \tan^{-1}(2^{n-1}) \qquad (8)$$

Que coincide con el número de iteraciones con las que se tiene precisión.

III. Objetivos, Descripción de estructuras y representación

A. *Objetivos*

El objetivo es llevar a cabo la implementación del algoritmo de CORDIC binario en un APSOC como el empleado: el ZYNQ 7010. La implementación se llevará a cabo mediante el lenguaje de programación VHDL y se usará la herramienta VIVADO para llevar a cabo toda el desarrollo e implementación del sistema digital.

El primer desarrollo será diseñar una arquitectura serie (pipeline) donde, de forma totalmente combinacional, se implementará el algoritmo CORDIC. El segundo, será diseñar una arquitectura tipo FSM (Finite-State Machine), donde se define el algoritmo de CORDIC como una máquina de estados.

Una vez diseñadas, simuladas, sintetizadas e implementadas ambas arquitecturas, se podrán a prueba en el APSOC haciendo uso del analizador lógico integrado (ILA), y dado que la herramienta VIVADO permite conocer los recursos utilizados en ambas arquitecturas, se podrá comprobar cuál de las dos es la más eficiente tanto en recursos hardware como en tiempos y latencias de ejecución, posteriormente, se utilizará el ILA y los resultados de la síntesis para comprobar cuál de las dos arquitecturas proporciona mejores resultados.

B. *Descripción de estructuras*

Las ecuaciones generales del algoritmo CORDIC dados en (8), serán aquellas que se implementarán posteriormente en el sistema digital. Estas ecuaciones aparecen descritas en [4]. En dicho artículo, Walther describe que la formulación básica del algoritmo podía utilizarse, además, para el cálculo de funciones hiperbólicas y reformuló el procedimiento de CORDIC en una forma generalizada y unificada. La formulación unificada incluye una nueva variable m, a la que se le asignan diferentes valores para diferentes sistemas de coordenadas, estos sistemas de coordenadas pueden ser sistemas de coordenadas circulares, lineales o hiperbólicos. El CORDIC generalizado o también conocido como unificado está formulado de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= x_i - m\sigma_i \cdot 2^{-i} \cdot y_i \\ y_{i+1} &= y_i + \sigma_i \cdot 2^{-i} \cdot x_i \\ z_{i+1} &= z_i - \sigma_i \cdot \alpha_i \end{aligned} \qquad (9)$$

$$\sigma_i \begin{cases} \text{sign}(z_i) & \text{Para el modo de rotación} \\ -\text{sign}(y_i) & \text{Para el modo vectorización} \end{cases}$$

Siendo el valor $m = 1, 0$ o -1 , y $\alpha_i = \tan^{-1}(2^{-i})$, 2^{-i} o $\tanh^{-1}(2^{-i})$, para sistemas de coordenadas circulares, lineales o hiperbólicos respectivamente. En cuanto a la dirección de las micro-rotaciones σ_i se puede ver que dependen del modo de funcionamiento del algoritmo, en el caso de este proyecto se ha seleccionado el modo RM, por tanto $\sigma_i = \text{sign}(z_i)$ y al estar en coordenadas circulares entonces se seleccionará $m = 1$.

Las ecuaciones formaran el núcleo de CORDIC, este se puede apreciar en Fig. 2.

C. *Arquitectura Serie de CORDIC*

Si se analiza de forma detenidas las ecuaciones generales o unificadas del algoritmo, se puede ver que cada iteración es idéntica al anterior, por ejemplo, para x_{i+1} se tendría:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 - m\sigma_0 \cdot 2^{-0} \cdot y_0 \\ x_2 &= x_1 - m\sigma_1 \cdot 2^{-1} \cdot y_1 \end{aligned} \qquad (10)$$

Cada iteración depende de la anterior pero realmente la formulación es la misma por lo que es bastante instintivo realizar una arquitectura serie, donde los resultados de la iteración anterior pasan a la siguiente y así sucesivamente hasta que se alcanza el número de iteraciones establecido, de hecho esta ha sido la elegida ya que es puramente combinacional y la más rápida, aunque tiene como contrapartida la generación de parpadeos o glitches en los resultados antes de la estabilización del sistema.

Esta versión combinacional del algoritmo en serie queda representada en la Fig. 3. en ella se pueden observar antes de las entradas de los sumadores unos pequeños cuadros donde se especifica >> 1 o >> n-1, esto simplemente hacen notar que las entradas para esos sumadores están desplazadas, recordando que en el mundo digital multiplicar un numero binario por 2^{-i}, es hacer un desplazamiento de i bits hacia la derecha.

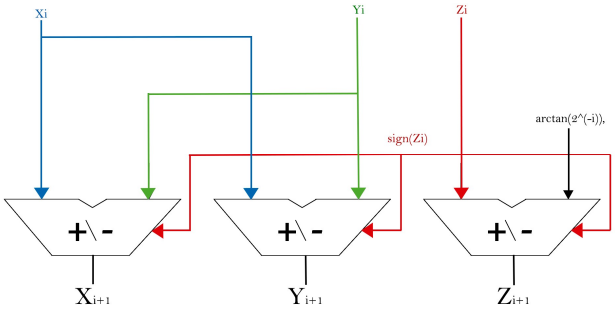


Fig. 2. Nucleo de CORDIC

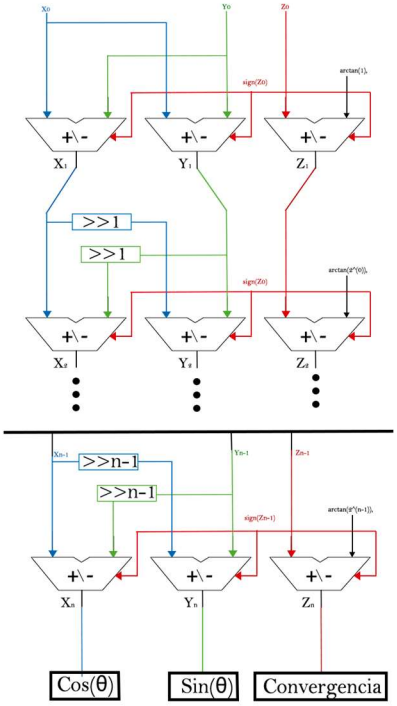


Fig. 3. Arquitectura Serie CORDIC

D. *Arquitectura FSM de CORDIC*

La otra opción que se presenta es implementar el algoritmo de manera puramente secuencial con sólo tres registros realimentados a través del módulo combinacional que representa el núcleo aritmético CORDIC de la Fig. 2, es decir, un registro para x, z e y, de manera que tendremos un registro que dependerá del número bits que se utiliza para representar la coordenada en cuestión, realmente lo que se tiene es una iteración del núcleo de CORDIC dentro de un bucle temporal como se puede ver en la Fig. 4, en esta aparece el esquema clásico de la FSM sintetizada a partir del código VHDL. Hay que mencionar que el desplazador (>>CA en la Fig. 4) representa el número de bits a desplazar en función del contenido del contador de anillo empleado (CA). Este esquema es el utilizado en la teoría de la asignatura dedicada al aprendizaje de VHDL, Sistemas Electrónicos para Automatización. Los tres registros en la salida muestrean al final de la ejecución del algoritmo el resultado final, haciendo estable la presentación de los datos calculados. Si usamos *n* bits para representarlos, la estructura del registro tendría el siguiente aspecto:

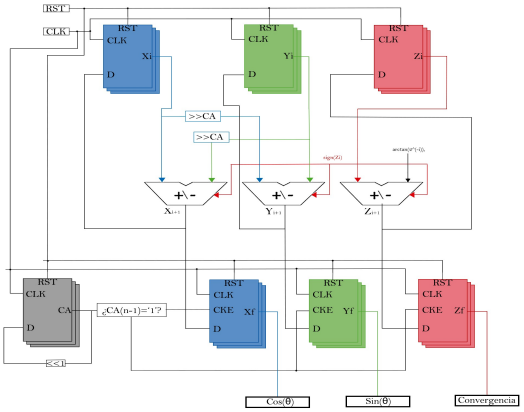


Fig. 4. Arquitectura FSM de CORDIC

Dada que ambas ideas son válidas para la implementación del algoritmo de CORDIC generalizado, ambas se sintetizarán a través VIVADO y se pondrán a prueba con el objetivo de analizar cuál es el más eficiente.

E. *Representación numérica*

La representación elegida para el algoritmo de CORDIC será el Punto-Fijo, este tipo de representación permitirá expresar en binario números racionales positivos o negativos, además es una forma bastante intuitiva de representar un numero racional, ya que en realidad el punto es totalmente imaginario y realmente se puede poner donde se quiera y obtener una representación congruente del número en cuestión a través de un factor de escala, en concreto, se van a expresar los numero del algoritmo de CORDIC con el punto-fijo en complemento a dos con signo, ya que es una representación en la cual el 0 solo tiene un único valor. Se pueden usar más formas de representación Punto-Fijo, para ver un análisis completo de esta representación ver el ejemplo [5].

Una palabra binaria de N bits, cuando se interpreta como un complemento de dos con signo racional de punto fijo, puede tomar valores de un subconjunto P de los racionales dados por:

$$P = \left\{ \frac{p}{2^b} \mid -2N - 1 \le p \le 2N - 1,\ p \in Z \right\} \qquad (11)$$

Hay que tener en cuenta que P contiene 2N elementos. Denotamos tal representación A(a,b), donde a = N - b - 1. El valor de un número binario específico x de N bits en una representación A(a,b) viene dado por la expresión:

$$x = (1/2^b)\left[-2^{N-1}x_{N-1} + \sum_{n=0}^{N-2} 2^n \cdot x_n \right] \qquad (12)$$

Donde x_n representa el bit n de x. El rango de una representación A(a,b) es $-2^{N-1-b} \le x \le +2^{N-1-b} - \frac{1}{2^b}$.

Se define pues el subconjunto CORDIC(2,17), que tendrá $N = 2 + 17 + 1 = 20$ bits y su rango será desde -2^2 hasta $2^2 - \frac{1}{2^{17}}$, que permitirá introducir como entrada del ángulo de cálculo tanto el π como el -π. Cambiar el rango de bits que se utilizan para representar los números

en esta representación y con este subconjunto también cambiara la convergencia de CORDIC.

IV. RECURSOS Y RESULTADOS

El APSOC seleccionado para la implementación de ambas arquitecturas es el Zynq7010Q, utilizada en los laboratorios de electrónica de la UMA en la Escuela de Ingenierías. La Zynq7010Q presenta un precio medio y unas prestaciones bastantes altas, de ahí que se haya seleccionado para este proyecto. El uso del analizador lógico integrado (ILA) no se contempla en este apartado, ya que se reservará para la fase final del Trabajo de Fin de Grado.

Para comparar los resultados de ambas implementaciones primero se debe hacer un pequeño análisis de la simulación de comportamiento que nos proporciona la herramienta de VIVADO [6], y una vez hecho el análisis de los resultados de las simulaciones, se hará una pequeña comparación entre ambas arquitecturas en cuanto a recursos y tiempo empleados tras la síntesis. El diseño de ambos sistemas y de sus correspondientes bancos de pruebas, se han programado en lenguaje VHDL haciendo uso de bibliografía básica, ver [3]. Las Fig. 5 y Fig. 6. muestran la simulación de comportamiento, mientras que Fig, 7. Muestra la simulación post-sintesis de tiempos para la arquitectura serie.

Ambas simulaciones son idénticas salvo tiempos. Para las pruebas se ha generado una ROM que almacena los ángulos a testear y se hace un barrido de θ, con un paso de $\frac{\pi}{6}$, añadiendo de manera adicional una entrada para -π, cubriendo de esta forma los cuatro cuadrantes haciendo uso de las propiedades de transformación a primer cuadrante salvo signo. Con estas simulaciones buscamos principalmente dos aspectos, el primero sería comprobar que la convergencia concuerda con lo que proponen las matemáticas del algoritmo y lo segundo es que los cálculos muestren tanto el coseno como el seno para las dos arquitecturas existentes.

La convergencia del algoritmo es bastante importante ya que de ella despende la bueno precisión del cálculo, como ya se ha expuesto anteriormente,

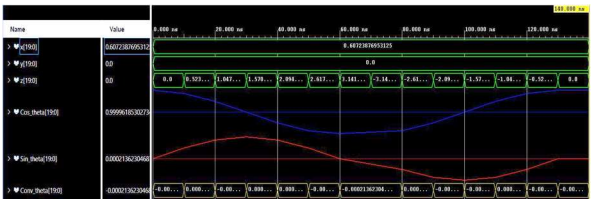


Fig. 5. Simulación arquitectura serie CORDIC

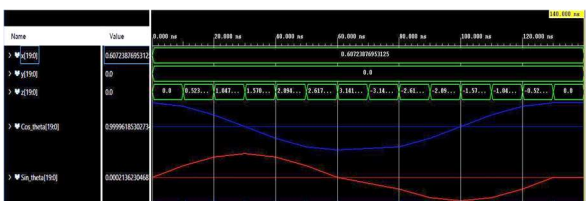


Fig. 6. Simulación arquitectura FSM CORDIC

en dicha convergencia influye la representación que se ha utilizado, En este caso se han empleado 17 bits, para la parte fraccionaria y 2 bits para la parte entera en todos los datapaths y ROMs del sistema, lo que influye a las iteraciones de convergencia de tres formas:

- Para el subconjunto CORDIC(2,17), el sistema deberá tener un ancho de palabra de n+2 bits para tener una precisión fraccionaria de 17 bits.
- Todos los sistemas digitales cuentan con un error de cuantificación, en concreto con el subconjunto utilizado, contará con un error de cuantificación que vendrá dado por log2(n).
- La tabla ROM que almacena los datos también esta representada dentro de este subconjunto, lo que indica que también inducirá otro error más por cuantificación, que se sumara al existente en el sistema y tiene el mismo valor log2(n).

Teniendo los 3 puntos anteriores en cuenta, el ancho de palabra necesario para alcanzar una precisión de n bits de este CORDIC viene dado por:

$$2*\log2(n) + n + 2 \qquad (13)$$

Si se grafica (13), se puede obtener que, para un ancho de palabra de 20 bits, se tiene una precisión de n=11 iteraciones o expresado según (8):

$$|z_{11}| \leq \arctan\left(2^{-10}\right) = 0.0009765621 \qquad (14)$$

Dado que el subconjunto de representación es de 20 bits, se requiere de una herramienta de cálculo más potente que Matlab para poder obtener tanto la ROM donde se almacenan las arcotangentes, como los propios parámetros para realizar la simulación, para ello se ha empleado la herramienta Wolfram Mathematica que permite obtener estos datos con la precisión de bits que se necesitan para el subconjunto.

Las simulaciones muestran con certeza, que tanto el seno como el coseno se calcular de manera correcta para los diferentes ángulos de entrada, y aunque no se puede apreciar de manera exacta en esta captura, la convergencia tampoco sobrepasa la cota establecida por el teorema. Por otro lado, las señales extra de 'tc' y 'sc' simplemente muestran cuando se está introduciendo un ángulo que sobrepasa el rango de convergencia del algoritmo, y por lo tanto en estos casos se debe hacer una corrección del ángulo de entrada.

Aunque no sea indicativo, es interesante mencionar que la arquitectura FSM tarda un poco más realizar el cálculo, esto se debe a que, para realizar las 11 iteraciones del algoritmo, es el caso de la FSM, se requiere de 11 ciclos de reloj, esto no ocurre en la arquitectura serie donde el tiempo que tardaría en realizar los cálculos dependerá de T_{ADD}, T_{MUX}, T_{C2}, que son el tiempo en realizar la suma, el tiempo en multiplexar y el tiempo en realizar la operación en complemento a dos. Para la simulación se ha elegido un reloj ficticio de 4ns (similar al reloj de la Zynq7010), es posible que la arquitectura FSM termine pareciéndose

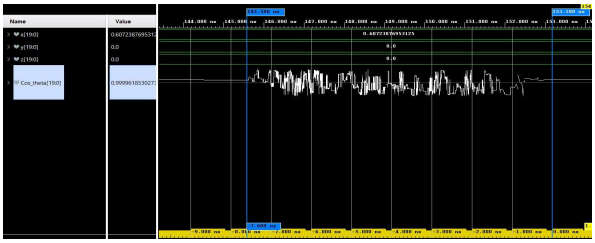


Fig. 7. Simulación arquitectura FSM CORDIC

bastante en términos temporales a la arquitectura serie ya que hay que tener en cuenta el número de iteraciones de la FSM (multiplicadas por el período de reloj) para obtener un resultado válido. Se espera que durante la simulación post-síntesis de los modelos se puedan extraer los tiempos de retardo y propagación para comparar ambas arquitecturas de forma objetiva y paralela.

En cuanto a los recursos empleados por las arquitecturas, al realizar la síntesis de estas la herramienta de VIVADO nos proporciona una tabla donde se exponen los diferentes elementos que se utilizan, así como los que tiene disponibles la Zynq7000Q.

Las diferencias entre ambas arquitecturas son notables, la arquitectura serie utiliza 1.71 más de LUTs que la arquitectura FSM, sin embargo, la arquitectura FSM utiliza FF que no se utilizan en ningún caso en la arquitectura serie, en cuanto a las IO ambas arquitecturas presentan las mimas entradas y salidas, aunque si es cierto que la arquitectura FSM requiere de una entrada para la señal de reloj y otra para el reset. Que el factor de utilización supere el 100% simplemente indica que el sistema tiene más entradas y salidas que las que tiene disponible la Zynq7010Q, pero esto no presentara un problema, ya que el ILA es capaz de soportar mucha mayor cantidad de bits. Aun así, la arquitectura serie utiliza más recursos que la arquitectura FSM, en concreto, la arquitectura serie presenta una total de 935 elementos empleados, frente a los 850 elementos que emplea la arquitectura FSM, por lo que sin duda esta presenta una mayor eficiencia hardware que la otra.

El tiempo de ejecución de la arquitectura combinacional se comprueba en una simulación post-síntesis de timing, Test Bench que utiliza el mismo reloj que en las simulaciones de comportamiento, pero ahora se

TABLA I. RECURSOS UTILIZADOS DE LA ARQUITECTURA SERIE

Arquitectura Serie			
Recurso FPGA	**Utilización N.º de elementos**	**Disponibles**	**Utilización %**
LUT	937	17600	5.32 %
IO	120	100	120%

TABLA II. RECURSOS UTILIZADOS POR LA ARQUITECTURA FSM

Arquitectura FSM			
Recurso FPGA	**Utilización N.º de elementos**	**Disponibles**	**Utilización %**
LUT	547	17600	3.11 %
IO	123	100	123%
FF	303	35200	0.86 %

busca el tiempo de retardo del lógico combinacional, este retardo se puede estimar mediante el uso de cursores y fijando las pequeñas oscilaciones que ocurren las señales del seno y del coseno antes de estabilizarse en su valor adecuado. En la Fig. 7. se muestra este pequeño parpadeo de estabilización. El cual se puede observar que tiene un valor capturado en el caso peor de 153.180 – 145.580 = 7.60ns. Para ver el tiempo de retardo de la FSM simplemente se debe hacer la síntesis de esta, que nos proporciona tres valores de retardo, Worst Negative Slack (WNS), Worst Hold Slack (WHS) y Worst Pulse Wide Slack (WPWS), de los cuales se escogerá el que pone en peor situación al sistema, que en este caso es el WPWS que tiene un valor de 3.500 ns que fija el período mínimo de reloj y que para un orden n (n=12(0:11) en nuestro ejemplo) nos da una duración de 3.5x12=42ns. Con estos datos a la vista, la arquitectura Serie es del orden de 5.52 veces más rápida que la arquitectura FSM.

V. CONCLUSIONES

El algoritmo CORDIC es sin duda un buen método de cálculo de funciones trigonométricas y con más bits para mayor precisión, junto con un mayor número de iteraciones se puede diseñar un generador de señales básico. En cuanto a las arquitecturas propuesta, no hemos de olvidar que el algoritmo CORDIC busca por cualquier medio reducir la carga hardware necesaria para el cálculo de las funciones trigonométricas, en el caso de este proyecto, por esta razón, con el análisis realizado anteriormente, podemos concluir que la arquitectura FSM es la que menos recursos de APSOC consume, aun así, no se debe pasar por alto la arquitectura serie, ya que el tiempo que necesita para los cálculos será únicamente el retardo de la lógica combinacional, que tal y como se ha analizado es muy pequeño. De todas formas, hasta que no se implemente físicamente y se hagan las medidas pertinentes con el ILA no podemos asegurar cuál de las dos arquitecturas es la más rápida. Los resultados de este trabajo se van a utilizar en prácticas de laboratorio para la asignatura de 4º curso del grado de GIERM Sistemas Electrónicos para Automatización. Por último y a modo de colofón quiero mencionar que como alumno del grado de GIERM, ha sido toda una experiencia el poder escribir un texto científico como parte de mi formación como ingeniero.

VI. REFERENCIAS

[1]. J. E. Volder, "The CORDIC Trigonometric Computing Technique", *IRE Trans. Electron. Computers*, vol. EC-8, pp. 330–334, Sept. 1959.

[2]. Pramod K. Meher, Javier Valls, Tso-Bing Juang, K. Sridharan, and Koushik Maharatna, "50 Years of CORDIC: Algorithms, Architectures, and Applications", in *IEEE transactions on circuits and systems I: regular papers*, vol. 56, no. 9, Sept. 2009.

[3]. Peter J. Ashenden, *The designer guide to VHDL,* System on silicon, 3rd ed. May 2008.

[4]. J. S. Walther, "A unified algorithm for elementary functions", in *Spring Joint Computer Conference*, 1971.

[5]. Randy Yates, Fixed-Point Arithmetic: An Introduction, Digital Signal Labs, August 2007.

[6]. VIVADO, *Xilinx*, ver. 2022.1

Inteligencia Artificial sobre Procesadores Edge Computing

Jorge Cuartero Galindo
Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
819569@unizar.es

Belén Calvo López
Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
becalvo@unizar.es

Nicolas Medrano Marqués
Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
nmedrano@unizar.es

***Abstract*—El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es la selección de modelos de inteligencia artificial (IA) aplicados a fusión sensorial y su implementación sobre microprocesadores de bajas prestaciones y coste mediante herramientas de minimización del tamaño del modelo. En particular, se pretende desarrollar un prototipo funcional completo capaz de identificar posición y movimiento de la mano de una persona a partir de señales procedentes de un conjunto de sensores. El trabajo incluye la implementación de un sistema de comunicación inalámbrica y actuación que convierta dichos patrones en instrucciones específicas, que permitan su empleo como dispositivo flexible de señalización gráfica tipo ratón.**

Keywords—Inteligencia artificial, fusión sensorial, computación edge, microcontrolador

I. INTRODUCCION Y OBJETIVOS

A. *Introducción*

La implementación de modelos de IA en dispositivos con bajos recursos computacionales precisa de un estudio detallado del sistema de adquisición y de los datos que se van a procesar (frecuencia de muestreo, resolución de las medidas), así como del modelo adecuado para la tarea a resolver, compatible con el procesador escogido [1], en términos de arquitectura y precisión numérica.

El problema a resolver consiste en la identificación y caracterización de ambos patrones de movimiento y posiciones de la mano empleando un montaje basado en el microcontrolador Arduino RP2040 Connect [5].

En la resolución del problema se distinguen varios desarrollos con cierto punto de independencia cada uno encargado de una de las funcionalidades del sistema. Estos son: el montaje del sistema de sensores y adquisición de medidas, la conectividad del dispositivo mediante WiFi con el ordenador, el desarrollo y entrenamiento de la red neuronal encargada de caracterizar posiciones y gestos de la mano, y un sistema para conocer la orientación del dispositivo.

La unión de estos elementos permitirá desarrollar un dispositivo flexible de señalización gráfica, que conectándose mediante WiFi al ordenador permita convertir gestos y posiciones de la mano en comandos, así como poder guiar un ratón o puntero apuntando con la mano.

B. *Contexto*

Dentro del marco del Grado en Física de la Universidad de Zaragoza, este proyecto constituiría el trabajo de fin de grado, cuya extensión es de 8 ECTS o equivalentemente 200 horas de trabajo [6].

Además, este TFG continua el trabajo realizado también como TFG por el estudiante Rubén Muñoz. Este primero fue sirvió para detectar muchos problemas como dificultades con la conectividad por bluetooth, el uso de unos u otros piezorresistivos, o el propio montaje de los componentes en el guante; pudiendo centrarnos gracias a ellos en este trabajo en optimizar la toma de datos y su tratamiento.

En cuanto a la relación con los conocimientos adquiridos en el grado, este proyecto está directamente ligado con varias de las asignaturas impartidas por el departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones en el Grado en Física. En primer lugar, el diseño y comprensión de circuitos básicos en las asignaturas obligatorias de Técnicas Físicas I y II (2º y 3er curso, respectivamente), así como la automatización de medidas también de la asignatura Técnicas Físicas II. A esto se suman los conocimientos en microcontroladores de la asignatura Sistemas digitales (optativa en 4º curso) o el comportamiento de los sensores de la asignatura Micro y nano sistemas (optativa en 3er curso del grado).

Fuera del propio currículo se busca aprender algunas bases sobre las redes neuronales y las comunicaciones inalámbricas. De este modo la idea final de TFG es ubicar estos distintos conocimientos de electrónica, informática y tratamiento de datos con el fin de resolver una tarea compleja, en la que la capacidad para buscar y desarrollar soluciones para los distintos retos que vayan apareciendo es fundamental.

El resto del trabajo está organizado como sigue: en la Sección II se muestra el hardware del dispositivo desarrollado; en la Sección III se muestra el proceso de conexión del microcontrolador ubicado en el señalizador con el ordenador que hace de host; la Sección IV explica el proceso de adquisición de muestras de posición de los dedos, empleadas para el entrenamiento de la red neuronal encargada de su codificación; en la Sección V se analizan la adquisición y tratamiento de los datos correspondientes a la orientación espacial de la mano; la Sección VI presenta los resultados experimentales obtenidos, mientras que las secciones VII y VIII presentan, respectivamente, posibles mejoras del sistema y las conclusiones de este trabajo.

II. MONTAJE DEL DISPOSITIVO

A. *Circuito de medida*

La caracterización de las distintas posiciones de los dedos se llevará a cabo mediante piezorresistencias. Este componente electrónico se caracteriza por cambiar su resistencia ante un estrés físico (torsión, tensión, flexión…). En nuestro caso nos interesaremos por la flexión al ser el movimiento que realizan nuestros dedos.

Para aprovechar esta característica, se forma un divisor de tensión (Fig. 1) con ayuda de una resistencia fija auxiliar,

conectando el piezorresistivo a 3.3 V y la resistencia fija a 0 V, viniendo ambos voltajes dados por el Arduino.

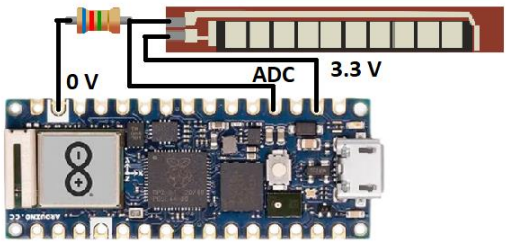


Figura 1. Esquema del circuito montado para cada piezorresistivo

Para la medida, se conecta el terminal entre resistencias a los ADCs del Arduino, donde se obtendrán lecturas cuyo valor en voltios ira según la ecuación (1).

$$V = 3.3 \cdot \frac{R_{fija}}{R_{fija}+R_{piezo}} \quad (1)$$

Lo realmente interesante de ahí es conocer para qué valor de la resistencia fija tendremos una mayor variación de voltaje en la entrada. Para ello se optimiza la tasa de variación media (TVM, ec. (2)) del voltaje entre los valores máximos y mínimos medidos para los piezorresistivos (R_{max} y R_{min} respectivamente).

$$TVM = \frac{V(R_{max})-V(R_{min})}{R_{max}-R_{min}} = 3.3 \cdot \frac{R_{fija}}{(R_{max}+R_{fija})(R_{min}+R_{fija})} \quad (2)$$

Para encontrar para que valor de la resistencia fija se tiene una TVM máxima, se deriva respecto a R_{fija} y se iguala a 0, obteniendo la ecuación (3).

$$R_{fija} = \sqrt{R_{max}R_{min}} \quad (3)$$

Al depender de los valores resistivos máximos y mínimos del piezorresistivo, es necesaria su caracterización para elegir la resistencia fija óptima. Para ello tomamos medidas de las 4 bandas piezorresistivas que pretendemos utilizar (remarcar que el pulgar no tendrá piezorresistivo por la dificultad que suponía adaptarlo al montaje). La Tabla 1 muestra los valores obtenidos

TABLA 1. VALORES RESISTIVOS DE LAS PIEZORRESISTENCIAS

	Resistencia en extensión (kΩ)		**Resistencia en flexión (kΩ)**	**Resistencia fija calculada (kΩ)**	**Resistencia fija montada (kΩ)**
	Máxima	***Relajación***			
Meñique (dedo 1)	21.5	19	8.5	23	22
Anular (dedo 2)	25	23	12	17	18
Corazón (dedo 3)	25	23	12	17	18
Índice (dedo 4)	38	35	14	13	12

Se aprecia que hay una cierta diferencia entre las medidas nada más realizar una flexión y después de darle un tiempo para llegar al reposo, factor que ha sido tenido en cuenta. Además un factor determinante al elegir las resistencias fijas ha sido su disponibilidad, pues en el fondo cambios pequeños en el valor de estas respecto al óptimo calculado no alteran mucho el rango de variación del voltaje.

Con los valores dados finalmente, en las lecturas de los ADCs se miden cambios de 150 a 250 LSBs en los ADCs, de una resolución de 12 bits, por lo que hay suficiente diferencia entre posiciones de los dedos.

B. Montaje fisico del sistema

Se distingue la parte eléctrica ya nombrada, del resto (Fig. 2): las piezas que fijan los piezorresistivos a los dedos, la pieza que asegura la posición de los piezorresistivos respecto a los dedos y el espacio donde ira el Arduino con su alimentación.

Figura 2. Prototipo del guante completamente montado

Todas estas piezas están fabricadas mediante impresión 3D, lo que permite mucha más flexibilidad en el proceso de montaje. En cuanto a la sujeción a los dedos, se realiza mediante unas piezas con un pequeño hueco para que pase la banda. Estas piezas están o bien pegadas o bien en forma de anillo.

De aquí, se va a una pieza de mayor tamaño por donde pasamos los cables para fijar su posición respecto a los dedos. Encima en esta pieza va montada una caja en la que metemos el Arduino y su alimentación. Estas dos piezas se sujetan provisionalmente por una banda elástica un poco antes de la muñeca para poder medir movimientos de la mano y no solo del brazo.

Con esto montado ya se puede empezar a ver el movimiento de los dedos en el ordenador. Con un sencillo código ejecutado en el microcontrolador que permita la adquisición de medidas y envío por el puerto serie, vemos (Figs. 3 y 4) que los rangos de variación son de 150 a 250 pasos del ADC.

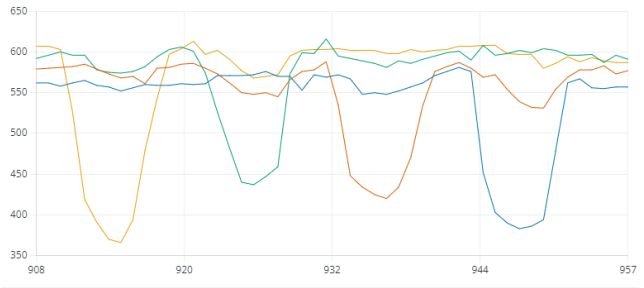


Figura 3. Medidas al bajar cada dedo por separado consecutivamente

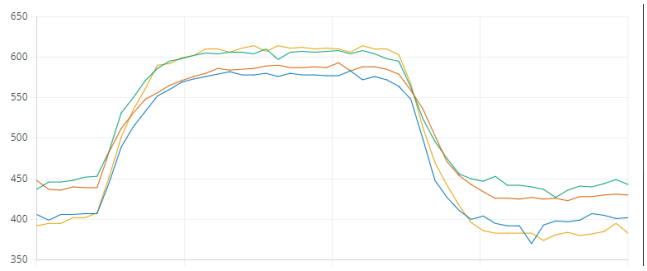


Figura 4. Medidas al abrir y cerrar la mano

III. Conectividad

Al querer poder usar nuestro dispositivo de forma remota con el ordenador, lo óptimo sería poder establecer una conexión inalámbrica con este. Para ello se usará el módulo WiFi del que consta nuestro Arduino, el NINA-W102 [4]. Este módulo nos permite conectarnos a WiFi 802.11b/g/n [8], lo que en otros dispositivos veremos como la banda 2.4 G.

En cuanto al protocolo de comunicaciones a utilizar, se descarta TCP debido a que en primer lugar requería conocer la IP del ordenador y del Arduino de antemano para crear un canal de comunicación, cuando en cada conexión esta podía ser distinta, y además se producían atascos frecuentes en el buffer del Arduino.

En contraparte con UDP, aunque no se asegura la llegada del paquete, no es muy relevante pues la velocidad a la que se obtienen medidas y envían los paquetes con datos es suficiente para disponer de información completa de un instante de tiempo a pesar de pérdidas de datos. Además, con UDP aprovecharemos que no es necesario crear un canal para enviar todos los datos por *broadcast* a todos los miembros de la red. Aunque en principio no sea lo idóneo, evita tener que rastrear la IP del ordenador desde el Arduino.

A. *Codificación de datos*

Respecto a la codificación de los datos, para la orientación espacial de la mano se necesita enviar 2 ángulos y para la posición de los dedos, actualmente, un único número de 0 a 9 que indique cuál de las 10 posiciones hemos identificado. Los datos que podemos enviar por WiFi son tipo byte, o por simplicidad con Arduino, tipo char. Esto quiere decir que, mientras que el envío de la información de los dedos es sencillo, para los ángulos tenemos que decidir el número de decimales y qué rango de ángulos queremos usar. Remarcar que, aunque un byte sean 8 bits y por tanto 256 valores, en la práctica la función que decodifica los char en Python solo permitía 7 bits (hasta 127 valores), por lo que más adelante se hará a mano la decodificación mediante bytes.

En la primera aproximación los ángulos se enviarán sin decimales, pues parece más que suficiente si pensamos en la capacidad que tendrá una persona de discernir ángulos apuntando con la mano. Además, para evitar envíos demasiado grandes, los ángulos solo medirán ±64º respecto a la posición considerada central, que es en la que se encuentra el guante al activarlo. Esto parece más que suficiente si lo que queremos es apuntar a una pantalla, pero podría ser fácilmente ampliable usando un byte más.

Para la posición de los dedos, solo serán necesarios 4-5 bits para enviar su información, por lo que en un char cabrá toda la información necesaria. De hecho, si fuera necesario se podrían usar esos 3 bits restantes para mandar más información de los ángulos y duplicar su rango de trabajo.

B. *Conexión de dispositivos*

lo conexión de los dispositivos, que optó por crear un punto de acceso al cual se pudieran conectar tanto el guante como el ordenador receptor. La principal ventaja de este método es que podemos elegir el nombre y contraseña de la red muy fácilmente, por lo que no hay necesidad de cambiar los datos de la red a la que se conecta el microcontrolador, y siempre intentará conectarse a una red con mismo nombre y contraseña. En nuestro caso, se optó por escoger un terminal móvil, dejando al microcontrolador del guante y al ordenador receptor como clientes de la red.

IV. Posición de los dedos

Para la obtención de la posición de los dedos de la mano, debido a que rara vez se pone la mano exactamente igual para indicar una misma posición, lo que haremos será entrenar una red neuronal con posiciones de la mano tomadas en distintos días y diferentes posiciones del brazo, para poder dar la mayor adaptabilidad a la red.

En un principio, se han definido 10 posiciones de la mano (Fig. 5) que queremos caracterizar.

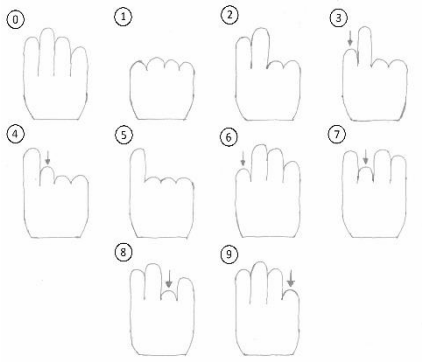


Figura 5. Posiciones de la manos ordenadas y numeradas

A. *Datos de entrenamiento*

Para la adquisición del *dataset*, el microcontrolador solicita aleatoriamente al usuario una de las 10 posiciones de los dedos de modo que, al haber transiciones distintas entre unas posiciones y otras, se obtengan unos datos más dispersos y por tanto den información con más ruido y con ello, favorezcan la capacidad de generalización de nuestro sistema. Para ello, desde el guante se le indica al computador encargado de la recolección de datos qué posición de la mano se va a adquirir, comunicándoselo al usuario. Tras un periodo de espera de dos segundos, el microcontrolador adquiere las lecturas de las entradas analógicas correspondientes a cada uno de los dedos, enviándolas por WiFi al computador, donde un programa realizado en Python las recoge y decodifica, estableciendo las parejas estímulos-salidas que serán guardadas en un archivo para ser empleadas en el entrenamiento de la red.

Actualmente disponemos de un conjunto de 1953 datos tomados en 5 veces distintas para favorecer la dispersión, lo que nos debería dar casi 200 datos por posición. Sin embargo, hay cierta dispersión debida al generador de números aleatorios de Arduino (Fig. 6), que podríamos buscar corregir si vemos sesgos al entrenar la red. Estos datos se dividirán en un 80 % para entrenamiento, un 10 % para validación, y un 10% para test.

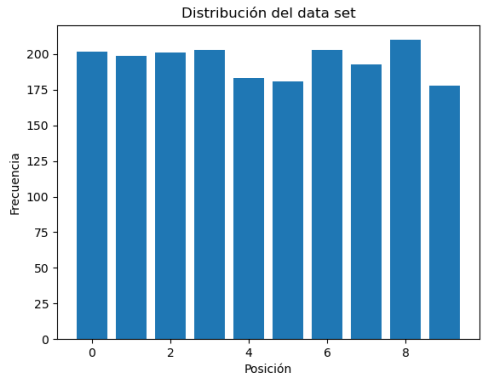


Figura 6. Dispersión de los datos del dataset para las distintas posiciones

Lo siguiente fue comprobar que en el *dataset* no había datos mal etiquetados. Para ello se representan con cajas y bigotes (Fig. 7) los datos de cada dedo en una gráfica distinta para cada dedo, poniendo en el eje x el valor medido por el ADC y en el eje y la posición correspondiente. De este modo en primer lugar podemos ver si se puede distinguir entre las distintas posiciones de la mano observando si al menos para 1 de los dedos, la medida del ADC es distinta a las de otras posiciones.

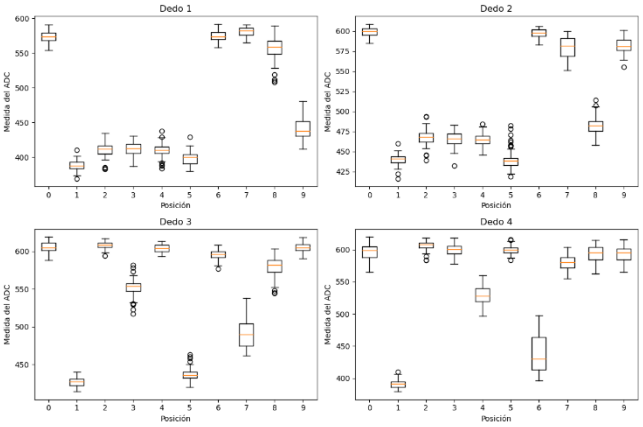


Figura 7. Distribución final de las posiciones de los dedos para las distintas posiciones

En cuanto a encontrar datos mal etiquetados, simplemente nos fijamos en los puntos fuera de las cajas, los cuales son desviaciones del resto de los datos. Si vemos claramente que alguno de estos puntos corresponde a la medida de otra posición, simplemente tenemos que buscarlo en el conjunto y cambiarle la etiqueta. Esta tarea se realiza estudiando los datos adquiridos cada día por separado, de modo que es más fácil de detectar la anomalía y encontrarla en el fichero de texto.

Por último, para permitir un mayor grado de libertad cuando se use el guante, lo que se hizo fue normalizar las posiciones de los dedos. Esto lo que quiere decir es que usando los valores máximo y mínimo que alcanza cada dedo en el data set, llevaremos nuestros datos a valores entre 0 y 1 de acuerdo con la ecuación (4).

$$Dato_{escalado} = \frac{Dato - minimo}{maximo - minimo} \quad (4)$$

El objetivo de esto es que, para usos posteriores, en caso de que el usuario emplee un guante diferente o cambie el modo de cerrar o abrir la mano (resultando en amplitudes distintas), el calibrado inicial de las posiciones máxima y mínima esperada nos permita asociar adecuadamente los valores entre 0 y 1, de forma que la red continúe operando bien.

B. Red e implementación en el Arduino

Para la implementación de la red lo que se usará será la biblioteca TensorFlow de Python [2]. Esta permite diseñar la red neuronal de forma relativamente simple, y luego con TensorFlow Lite reducir su complejidad y resolución numérica para poder implementarla y ejecutarla en el microcontrolador empleando la biblioteca TensorFlow Lite (TFLite), en nuestro caso de Arduino.

Dado que problema que se va a resolver es de clasificación (el sistema debe determinar si un patrón de entrada es uno de los 10 posibles almacenados en la base de datos), para preparar los datos para el entrenamiento sustituiremos las etiquetas de salida, un valor entero de 0 a 9, por un formato tipo *one-hot encoding*, consistente en un array de longitud 10 donde la posición correspondiente al tipo de patrón está ocupada por un 1, manteniendo el resto de valores del array a 0. Es decir, para una posición de los dedos correspondiente al patrón 5 (Fig. 5), la salida queda codificada como "0000100000". Si bien para este tipo de problemas se sugiere el empleo de la función de activación *softmax* [9] en la capa de salida, por simplificar la complejidad del código que se ejecutará en el microcontrolador e incompatibilidades con nuestra librería TFLite, se ha reemplazado por la función *Relu* [9], que aunque proporciona menos información acerca de la probabilidad de que un vector de entrada pertenezca a una clase concreta resulta mucho más sencilla de implementar. Además, la *loss function* de este método de entrenamiento funciona mucho mejor con la función *Relu*.

Tras ensayar varias arquitecturas de la red, buscando siempre hacer una lo más pequeña posible, y llegamos a una precisión casi del 100% con una red de 3 capas (30:15:10), siendo 4 las entradas y 10 las salidas (la de entrada se define automáticamente en TensorFlow). La Figura 8 muestra el número de parámetros (pesos) de la red, distribuidos por capas, así como los *dropout* para evitar sobre entrenamiento a la vez permite alcanzar precisiones más altas al evitar que la red se atasque en ciertas configuraciones.

Layer (type)	Output Shape	Param #
dense_9 (Dense)	(None, 30)	150
dropout_6 (Dropout)	(None, 30)	0
dense_10 (Dense)	(None, 15)	465
dropout_7 (Dropout)	(None, 15)	0
dense_11 (Dense)	(None, 10)	160

Total params: 775 (3.03 KB)

Figura 8. Arquitectura de la red

De todos modos, la red devuelve resultados en menos de 1 ms una vez introducida en el Arduino, tiempo suficientemente pequeño para identificar las diferentes posiciones de la mano codificadas. La Figura 9 muestra la evolución de la exactitud en la estimación de las salidas de la red en el proceso de entrenamiento.

En cuanto a la conversión de la red entrenada a un formato compatible con Arduino, TensorFlow Lite la convierte en un array de hexadecimales que son almacenados en un archivo ".h" que será compilado con la correspondiente librería en el

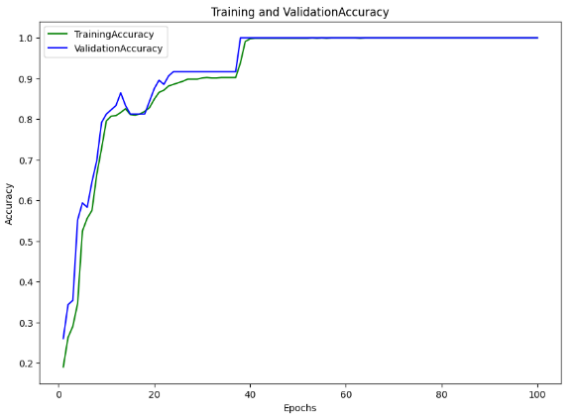


Figura 9. Evolución de la exactitud de la red en cada época de entrenamiento

entorno de desarrollo de Arduino. En la conversión que realiza TFLite se reduce la resolución numérica de los parámetros de la red de punto flotante a punto fijo en 8 bits, y se eliminan de la definición de la red los parámetros relacionados con el entrenamiento. Esto implica que la red pasa a pesar mucho menos. En cuanto a los tiempos de respuesta, la red devuelve resultados en menos de 1 ms una vez introducida en el Arduino, tiempo suficientemente pequeño para identificar las diferentes posiciones codificadas de la mano.

V. Orientación

En la determinación de la posición espacial de la mano, se busca traducir las medidas que nos devuelve la unidad de medida inercial (*Inertial Measurement Unit*, IMU) incluida en el Arduino en información sobre su orientación. Este Arduino en concreto tiene un acelerómetro y un giróscopo de tres ejes (LSM6DSOXTR).

Ambos trabajan a 104 Hz, lo cual será nuestra principal limitación en cuanto al tiempo de ejecución del código en el microcontrolador, ya que si queremos evitar errores de integración, y por ende deriva, deberemos ajustar el tiempo de ejecución a esos 104 Hz para aprovechar todos los datos.

A. Sistema de referencia

Es necesario definir un sistema de coordenadas respecto al cual dar las medidas, pues el acelerómetro da los valores en sistema cartesiano con el eje Z fijado en la gravedad y el giróscopo al dar solo velocidades siempre tiene como referencia la orientación del propio Arduino.

Como el Arduino cambia continuamente sus ejes, parece más lógico aprovechar todo lo posible el acelerómetro ya que nos da como referencia el eje vertical que es más universal. Con este podemos conocer perfectamente la inclinación respecto al plano horizontal así como la inclinación en el eje que se forma con el brazo. Sin embargo el ángulo en el plano horizontal es imposible de conocer con el acelerómetro al ser perpendicular a la gravedad, que es la referencia.

Para conocer este ángulo es necesario usar el giróscopo. Usaremos las medidas de éste, ajustadas cada una de ellas en función de los otros dos ángulos (debido a la diferencias entre sistemas de referencia ya mencionada). Esto significa que habrá que tener cuidado al calcular los ángulos con el acelerómetro, pues si no tendremos aún más error en este ángulo obtenido con el giróscopo.

Como el giróscopo mide velocidades, tendremos que integrar estas medidas a lo largo del tiempo, volviéndose crucial (como ya hemos nombrado) el tiempo de ejecución de cada ciclo, pues cuanto mayor sea el tiempo entre medidas del giróscopo mayor será el error de integración.

La ventaja de usar estos ángulos para la aplicación de control posicional de un ratón en la pantalla es que el del plano horizontal se puede traducir fácilmente al eje horizontal de la pantalla y el ángulo de inclinación respecto a la horizontal como la vertical en la pantalla

B. Calibrado de los sensores

Tanto acelerómetro como giróscopo presentan diversos errores asociados a offset, sensibilidad, etc., que es necesario compensar por calibración.

Respecto al acelerómetro, vemos que sus ejes no están completamente alineados con el Arduino, pues al rotar éste sobre un plano cambian los tres valores. Además se ve que la suma de los cuadrados de los valores de las aceleraciones no siempre es 1 (medimos en unidades de gravedad terrestre, g, por lo que esperaríamos medir solo 1 g al rotar el dispositivo), y que hay cierto error de offset en todos los ejes.

En la primera aproximación se ha corregido el offset y se ha añadido una corrección de escala para que la aceleración total sea 1. Además se establece la condición de que solo funcionará el acelerómetro cuando la aceleración total esté cerca de 1. Esto es por que si la aceleración se aleja mucho, significa que además de la gravedad estamos midiendo movimientos bruscos de la mano, y no queremos que estos devuelvan valores falsos.

Para el giróscopo ocurren problemas similares, de forma que corregimos el offset y añadimos un factor de escala pues inicialmente un giro completo lo mide como unos 300º y no 360º. Además, añadimos un umbral como hemos hecho con el acelerómetro, en este caso para evitar el ruido, ya que es bastante alto y podría generar error, aunque habiendo corregido el offset si este error es aleatorio debería influir igual en todas las direcciones.

Siendo además la deriva un error que seguramente siempre este ahí, la idea es que en los momentos que el usuario deje de usar el guante para señalar, al retomar el apuntado se redefina el 0 a donde se esté señalando, borrando todo el error acumulando anterior, y permitiendo además, a diferencia de un sistema de señalado mediante luz (láser, infrarrojo…), que puedas usar el apuntado sin necesidad de señalar con la mano directamente a la pantalla, pues al igual que el ratón se basa únicamente en posiciones relativas.

VI. Resultados experimentales

En primer lugar, respecto a los tiempos de cada una de las partes del proceso, vemos primero que con el programa completo el Arduino tarda menos de los 10 ms establecidos como objetivo para aprovechar al máximo el giróscopo. Por otro lado, en cuanto al tiempo de envío o de ejecución en el ordenador, vemos que son mucho más cortos (del orden del microsegundo), de forma que se vuelven irrelevantes al promediar medidas, que es el proceso que más sensación de latencia puede generar, pero es bastante importante para mitigar la inestabilidad de la mano.

Por otro lado, en cuanto al uso que hacemos de los datos, se ha diseñado en Python un programa capaz de procesar la

información proveniente del guante como posiciones del ratón, pudiendo emular todas las acciones de éste, así como una interfaz que nos permite tener acceso directo a programas del ordenador, pintar en pantalla, calibrar o ajustar el sistema, y seleccionar distintas asignaciones de algunas posiciones de la mano según el uso que se le quiera dar. Para esto se han utilizado las librerías win32api y PyWt5.

Figura 10. Captura de la función pintar, donde vemos el desplegable común a todas las funciones y una muestra de lo que se puede pintar.

VII. Cambios a futuro

En primer lugar, sería interesante estudiar el consumo de potencia del Arduino, pues en todo momento se ha trabajado conectado por USB y no se le ha dado mucha importancia. Para esto se podría estudiar retomar el uso de BLE, e incluso cambiar a un dispositivo menos potente que siga siendo capaz de dar un buen nivel de integración.

Además, sería interesante añadir una red auxiliar que se encargara de medir gestos o movimientos rápidos de la mano, dándonos muchas más opciones a la hora de crear nuevas instrucciones en el ordenador.

Por último, se podría cambiar el protocolo a TCP en las partes de calibración del proceso, pues en éstas se envían pocos paquetes y es importante no perder ninguno, siendo además irrelevante un pequeño retraso.

VIII. Conclusiones

Este proyecto tiene la ventaja de requerir el conocimiento de muchas áreas distintas durante su desarrollo, por lo que como se presentaba en la introducción, ha permitido además de poner en práctica a un nivel más avanzado conocimientos del Grado en Física, experimentar con otras tecnologías o áreas ayudando a desarrollar independencia en el trabajo y, sobre todo, ganando capacidad a la hora de afrontar las múltiples dificultades que se iban presentando, para muchas de los cuales ha sido necesario replantear el problema pues eran limitaciones técnicas las que no permitían seguir avanzando.

Desde el punto de vista de la tutorización de un proyecto de fin de titulación como el presentado, debe tenerse especial cuidado en plantear un trabajo que reúna las condiciones mínimas exigibles: que aplique conocimientos adquiridos a lo largo del Grado cursado, y en particular del Área en que se vincula el trabajo; que el estudiante no deba exceder el tiempo establecido para su realización, en este caso 8 créditos ECTS, debido al exceso de complejidad de las tareas; y que ese trabajo no tiene por qué implicar una actividad de innovación científica o técnica, sino adquisición de habilidades, competencias y experiencia. Además, debe plantearse desde el principio cuáles son los objetivos concretos del proyecto, estableciendo unos hitos intermedios en forma de módulos independientes que faciliten evaluar la evolución del trabajo, reorientarlo si es necesario, e incluso concluirlo adecuadamente si surgen dificultades imprevistas, pero se han alcanzado unos mínimos.

References

[1] R. Zingg and M. Rosenthal, “Artificial intelligence on microcontrollers,” in Embedded World Conference 2020, Nürnberg, 25.-27. February 2020.

[2] Gian Marco Iodice, “TinyMl Cookbook”. Packt publishing Ltd., 2022, Birmingham

[3] Simone Salerno, https://github.com/eloquentarduino. Último acceso 22/03/2024

[4] https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/wifinina, Último acceso 25/03/2024

[5] https://docs.arduino.cc/hardware/nano-rp2040-connect, Último acceso 03/04/2024

[6] https://estudios.unizar.es/estudio/ver?id=124, Último acceso 25/03/2024

[7] https://medium.com/thedeephub/one-hot-encoding-with-tensorflow-and-keras-569cfa91b162, Último acceso 25/03/2024

[8] https://www.digikey.es/es/products/detail/u-blox/NINA-W102-00B/7931803, Ultimo acceso 05/03/2024

[9] https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/keras/activations, Último acceso 16/05/2024

Sistema para el aprendizaje de la biología, enfermedades y tratamiento quirúrgico ocular usando realidad virtual

S.A. Rosero-Potosí
Departamento de Electrónica
Universidad del Cauca
Popayán - Colombia
santirosero@unicauca.edu.co

C.E. García-Cena
E.T.S. de Ingeniería y Diseño Industrial
Universidad Politécnica de Madrid
Madrid - España
cecilia.garcia@upm.es

O.A. Vivas-Albán
Departamento de Electrónica
Universidad del Cauca
Popayán - Colombia
avivas@unicauca.edu.co

***Abstract*—En el contexto del aprendizaje médico los métodos tradicionales de enseñanza poseen limitaciones, más aún en procedimientos quirúrgicos. De otra parte, el uso de la realidad virtual en educación y entrenamiento está significando una ruptura positiva en dichos procesos. Este documento muestra el desarrollo de una herramienta que permite el aprendizaje de la anatomía ocular, sus principales enfermedades y tratamientos quirúrgicos, enfocándose especialmente en la cirugía de cataratas. El sistema utiliza las gafas de realidad virtual Oculus Quest 2, y fue probado con diez usuarios del área de la salud y la ingeniería, mostrando gran potencial como herramienta de apoyo en la enseñanza de un campo particular de la medicina.**

Keywords—realidad virtual, aprendizaje virtual, anatomía ocular, cirugía de cataratas.

I. INTRODUCCIÓN

La realidad virtual, aumentada y mixta están significando un cambio substancial en la forma de llevar a cabo el proceso de enseñanza / aprendizaje a todos los niveles del desempeño humano. Desde el aprendizaje de tareas industriales para el entrenamiento de operarios, pasando por el aprendizaje impartido en cualquier rama del saber en las instituciones de educación superior, hasta el aprendizaje de diversas temáticas para niños, los campos de aplicación de estas nuevas tecnologías no tienen límite. Usuarios expertos o debutantes, tareas complejas o sencillas, labores muy especializadas o actividades más lúdicas, todos ellos pueden verse favorecidos por el uso de esta tecnología en diversos campos [1].

La realidad virtual permite, utilizando un medio inmersivo como un casco de realidad virtual, guantes o trajes especiales, desplegar objetos y escenarios como si del mundo real se tratara, aportando un rico entorno sensorial que favorece dicha inmersión y, por lo tanto, la respuesta emocional del usuario, su motivación y grado de interés en el "mundo virtual" donde se esté desempeñando. Es por esto que esta tecnología tiene un campo extenso de aplicación en la enseñanza, en particular en el área médica [2] [3].

En las carreras asociadas a la salud, la anatomía se aprende por métodos tradicionales, contacto profesor/alumno usando material bibliográfico, o con intervención de la tecnología, en el caso del uso del ordenador o internet. Pero también usando métodos inmersivos como un casco de realidad virtual, que lleva al estudiante o aprendiz a ver con detalle la constitución del cuerpo humano, o inclusive aprender y practicar una intervención quirúrgica, sin los peligros o dificultades que entrañaría usar animales, cadáveres o pacientes reales.

Existen varias aplicaciones para la enseñanza médica haciendo uso de la tecnología en realidad virtual y aumentada, como se muestra en [4] [5] [6], donde se encuentran detalladas revisiones bibliográficas sobre la aplicación de estas dos tecnologías en diversos campos médicos, desde la enseñanza hasta los procesos quirúrgicos en particular.

En el caso particular de la oftalmología, existen diversos estudios que tratan el uso del ordenador en este campo, como lo muestran en [7] [8]. Y si miramos el uso de la realidad virtual para el aprendizaje de diversos aspectos en oftalmología encontramos [9] [10] [11]. Es indudable el impacto que está teniendo esta tecnología en el campo del aprendizaje médico, en particular en el campo que nos interesa, que es la biología, enfermedades y su tratamiento aplicados al ojo humano.

Respecto a las intervenciones quirúrgicas llevadas a cabo en el ojo, una de las más comunes es la eliminación de las cataratas. Estas consisten en que el cristalino, que normalmente es transparente con el fin de dejar pasar la luz, se vuelve opaco o nublado debido al agrupamiento de las proteínas que existen en su interior, normalmente debido al paso de los años. La forma común de eliminar la catarata consiste en extraer el cristalino y reemplazarlo por un lente intraocular, lo cual se puede hacer de tres maneras: cirugía extra capsular donde el cirujano extrae la lente del ojo dejando la parte trasera de la cápsula, otra cirugía llamada intracapsular donde el cirujano extrae completamente la lente del ojo incluyendo la cápsula, y la técnica de facoemulsificación donde el cirujano extrae el cristalino mediante ultrasonido [12] [13]. En ese contexto, esta investigación se enfoca en la extracción de una catara senil bajo el método de facoemulsificación, debido a que es la más

utilizada hoy en día, por lo que será utilizada en esta propuesta de entrenamiento usando la realidad virtual.

Este artículo está distribuido de la siguiente manera. La sección I es la introducción, en la sección II se muestra el desarrollo del proyecto tanto en su parte hardware como software, incluyendo el diseño de la plataforma, la sección III presenta los resultados cualitativos y cuantitativos de la prueba de la plataforma en varios usuarios, así como su utilidad en el proceso de enseñanza aprendizaje de la temática, las discusiones aparecen en el capítulo IV, por último, la sección V muestra las conclusiones del proyecto.

II. DESARROLLO DEL PROYECTO

El propósito de este estudio es pues diseñar una plataforma que permita a los estudiantes de medicina, aprender sobre la anatamía del ojo humano, sus enfermedades más frecuentes y su tratamiento asociado, además de practicar los pasos necesarios en una cirugía de cataratas, todo ello haciendo uso de un dispositivo de realidad virtual, en este caso el casco Oculus Quest 2. Para la construcción de la plataforma se utilizó el siguiente hardware y software.

A. Hardware utilizado

Las gafas de realidad virtual Oculus Quest 2 (Fig. 1) están compuestas por el visor y dos controles, derecho e izquierdo, para las manos. Permite gráficos de alta calidad, de 1.832 x 1.920 pixeles por ojo, favoreciendo una rápida respuesta y una excelente inmersión, con un diseño cómodo de usar aun si el usuario lleva gafas medicadas. Tiene también dos controladores para cada mano, con correas de fijación a cada muñeca. Las caractícas del ordenador donde se construyó la aplicación son: procesador Intel Core i5-4590/AMD Ryzen 1500X, 4GB de tarjeta de video y RAM de 8 GB. Las gafas vienen con un procesador Qualcomm Snapdragon XR2 de 6 GB de RAM, que permiten que una vez diseñada la aplicación, esta sea cargada en ellas y funcionen sin conexión al ordenador.

Fig. 1. Gafas Oculus Quest 2 [14].

Las gafas poseen un sistema de protección ante golpes o accidentes, el cual se conoce como sistema guardián. Este permite configurar un área personalizada, donde las cámaras del visor entregan una visión del área real con el visor puesto, y donde el usuario podrá hacer un trazo del trayecto que quiere volver como área segura. En caso de que el usuario ya con el visor funcionando salga del área segura que configuró inicialmente, el visor le dará un mensaje de alerta, activándose las cámaras y permitiéndole ver el mundo exterior.

B. Software utilizado

Unity 3D

La aplicación se construyó en el motor de videojuegos Unity 3D, el cual es un entorno de desarrollo integrado (IDE) con capacidad para ofrecer diseño, programación e interacción con planos tridimensionales, volviéndolo un entorno multiplataforma, permitiendo construir aplicaciones en ordenador, consolas, dispositivos móviles, o de realidad virtual como en el presente proyecto.

Meta Quest

Con el fin de desarrollar aplicaciones con el casco Oculus Quest 2 dentro del ambiente Unity 3D, se deben tener en cuenta los siguientes paquetes o bibliotecas que permitieron construir la plataforma de enseñanza de la anatomía del ojo y sus enfermedades:

Meta XR All-in-One SDK: Es un paquete todo en uno que contiene varios SDK necesarios para la conexión de dispositivos Meta. Además, la implementación de este paquete viene pensado para facilitar el proceso de desarrollo, debido a que contiene componentes, objetos (*prefabs*), *scripts* y complementos principales listos para su uso.

Meta XR Core SDK: Es un paquete que incluye diferentes elementos importantes para el desarrollo en realidad virtual con Meta XR, en este caso específico las gafas de realidad virtual Oculus Quest 2. Entre los elementos que se incluyen están diferentes controladores, sistema de límites, pantallas de presentación, etc.

Meta XR Interaction SDK: Es una biblioteca que le permite al desarrollador de realidad virtual obtener componentes de interacciones solidas o estandarizadas como agarrar o empujar. Permite leer las acciones desde los controladores y manos, ofreciendo una personalización detallada para que el desarrollador pueda crear poses de manos personales.

OVRCameraRig: Es un objeto de tipo "*prefab*" que proporciona Unity 3D para representar el espacio de seguimiento de Oculus, con el fin de ajustar la relación del seguimiento de la cabeza y el mundo virtual.

Avatars: En muchas aplicaciones de desarrollo será necesario un avatar, conocido como personaje "player", que garantice un torso modular de cuerpo completo, lo que permitirá al usuario crear su propia identidad dentro del entorno Meta, y que la experiencia venga con una sensación de inmersión total.

Hand Tracking: El seguimiento de manos conocido como "*Hand Tracking*" facilita la interacción de las manos al ser un método de entrada de información para los dispositivos Meta, aumentando la sensación de presencia e inmersión, y ofreciendo interacción de las manos reales gracias a sus dedos articulados.

OpenXR: Es una extensión que le permite al desarrollador tener compatibilidad con diferentes plataformas y dispositivos de realidad virtual, realidad aumentada y resonancia magnética.

Meta Quest Link: Esta extensión es la que permite al desarrollador conectar el hardware Quest al ordenador mediante un cable USB 3.0 o Wifi, es conocida también como AirLink.

Visual Studio

Visual Studio es un entorno de desarrollo integrado (IDE) cuyo objetivo es permitir la creación y depuración de aplicaciones de tipo escritorio, servicios o aplicaciones web y aplicaciones móviles. Para el caso particular de este proyecto, Visual Studio facilita la programación en Unity 3D utilizando el lenguaje C#: a cada elemento implementado en Unity 3D se le asocia un *script* de programación en C#.

Blender

Para la construcción, diseño, y renderizado de modelos 3D y texturas, se recurre al software de código abierto Blender. Todos los objetos realizados en este proyecto, específicamente la anatomía detallada del ojo, fueron realizados en Blender y posteriormente exportados a Unity 3D.

Solidworks

Este software ha sido concebido para el diseño asistido por computadora (CAD), especialmente usado en ingeniería y el diseño industrial. Para este proyecto en particular, los instrumentos quirúrgicos que se utilizan en la operación de cataratas fueron diseñados gracias a este software.

C. Diseño de la plataforma

La Fig. 2 muestra lo que encontraremos cuando se inicie la aplicación: un menú principal que permite a través de dos botones, decidir cuál es el camino a seguir. El primer botón permite acceder a la anatomía del ojo humano, nos lleva a un escenario que permite interactuar con la órbita ósea, músculos extraoculares y el glóbulo ocular; en cada objeto el usuario tendrá la posibilidad de ver en detalle el modelo 3D, podrá manipularlo para tener una visión más completa, conocer las enfermedades asociadas a cada modelo y obtener información extra. El segundo botón le permite al usuario acceder al tratamiento quirúrgico, lo que nos dirige a un quirófano adaptado para libre exploración. Es aquí donde se puede realizar la simulación de la cirugía de cataratas, la cual una vez finalizada, arrojará un resumen de lo logrado, permitiendo volver al menú principal.

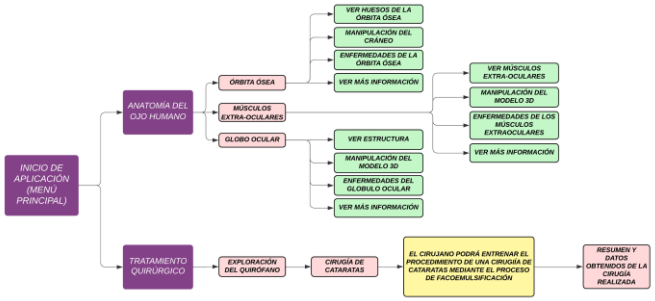


Fig. 2. Funcionamiento general de la aplicación.

Con el fin de tener una información más ordenada y poder señalar claramente los procesos de creación para cada escenario mencionado antes, el desarrollo del sistema se ha dividido en dos secciones: anatomía ocular y tratamiento quirúrgico.

Anatomía ocular

Para construir el apartado de anatomía ocular en la aplicación, se diseñó un diagrama general paso a paso (Fig. 3), donde inicialmente se identifica la anatomía ocular, posteriormente se diseña cada modelo 3D y un entorno virtual para implementar la lógica de programación en Unity 3D.

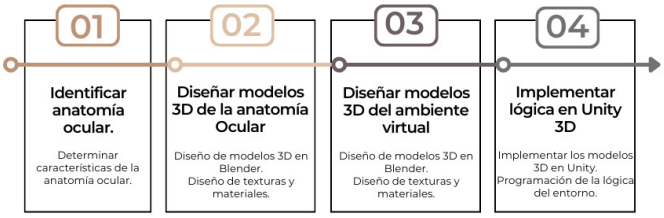


Fig. 3. Diagrama paso a paso de la construcción de la parte ocular.

La Fig. 4 muestra la construcción del glóbulo ocular en Blender, junto con sus músculos extraoculares, listo para ser exportado a Unity 3D. Mientas que la Fig. 5 presenta un relieve del ojo junto con el iris, también en Blender.

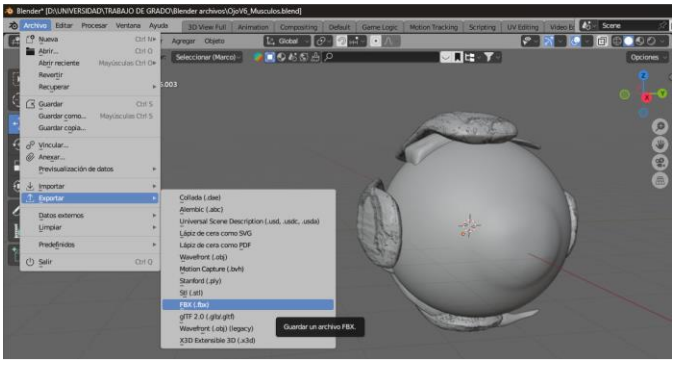


Fig. 4. Glóbulo ocular y sus músculos extraoculares en Blender.

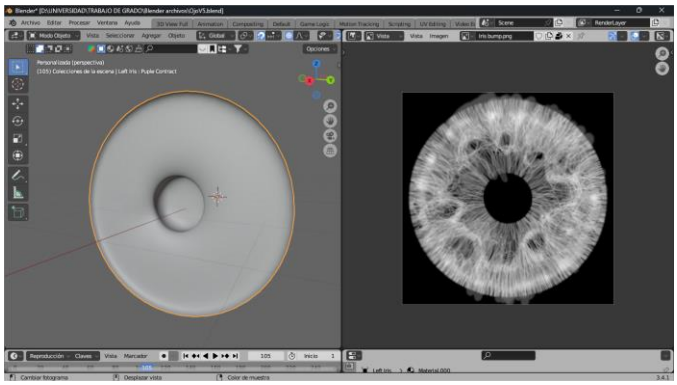


Fig. 5. Mapa de relieve del iris en Blender.

Las enfermedades que aparecen en la plataforma, que son las más comunes que se pueden encontrar en el sentido de la visión, y por lo tanto las más relevantes en un proceso de aprendizaje son:

- Enfermedades de los músculos extraoculares: estrabismo, mianestia gravis, orbitopatía tiroidea, oftalmología traumática, esclerosis múltiple, síndrome de Brown, tumores musculares.
- Enfermedades de la órbita ósea: fracturas orbitarias, tumores orbitarios, fibrodisplasia osificante progresiva, granulomatosis con poliangitis.
- Enfermedades del glóbulo ocular: cataratas, retinopatía diabética, conjuntivitis, ojo seco, orzuelo, astigmatismo, miopía, hipermetropía, presbicia.

Todas las enfermedades listadas anteriormente se despliegan en detalle en la plataforma, junto con su tratamiento más común. En la Fig. 6 se puede observar el escenario virtual donde aparecen a la izquierda cada una de las características anatómicas del ojo y sus enfermedades asociadas.

Fig. 6. Escenario virtual para el aprendizaje de la anatomía y enfermedades del ojo.

Tratamiento quirúrgico

En esta sección se encuentra el diseño en Unity 3D del sistema que apoya el aprendizaje de la anatomía ocular centrado en el tratamiento quirúrgico, especialmente en una cirugía de cataratas. Para lograr el diseño del tratamiento quirúrgico se diseñó un diagrama general paso a paso (Fig. 7), donde inicialmente se identifica cuál es el tratamiento quirúrgico que implica una cirugía de cataratas, luego se diseñan los modelos tridimensionales de la sala de cirugía, posteriormente se diseñan los modelos tridimensionales de la instrumentación quirúrgica y, por último, se implementa el entorno virtual con la lógica de programación en Unity 3D.

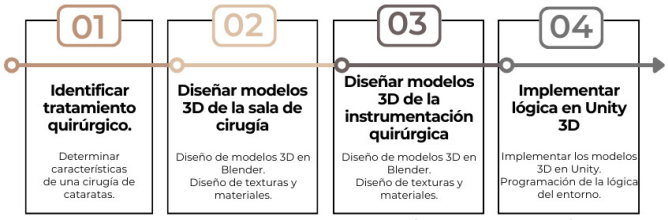


Fig. 7 Diagrama paso a paso de la construcción de la parte quirúrgica.

Las cataratas más comunes son las que se relacionan con la edad, por lo general después de los 55 años, a las que se les conoce como catarata senil. Otros tipos de cataratas son: las cataratas secundarias que aparecen después de una cirugía por otro problema en el ojo, las cataratas traumáticas que ocurren después de un golpe en el ojo, las cataratas congénitas que aparecen al nacer, y las cataratas toxicas que se relacionan al exceso de algunos fármacos [15].

Las siguientes figuras muestran diversos aspectos de la construcción de la plataforma, como:

- Microscopio oftalmológico en Blender (Fig. 8).
- Pinzas de Capsulorrexis en SolidWorks (Fig. 9).
- Sala de cirugía en Unity 3D (Fig. 10).

Fig. 8. Microscopio oftalmológico en Blender.

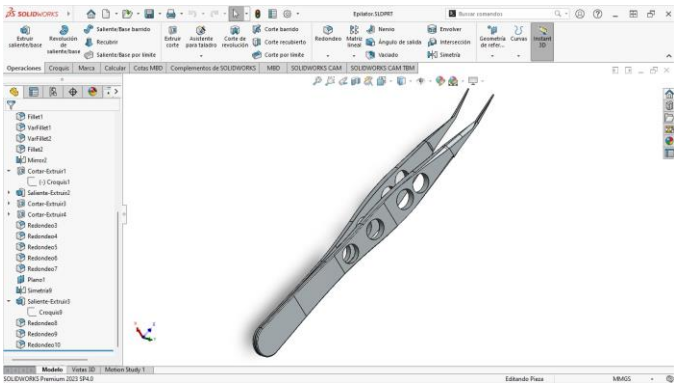


Fig. 9. Pinzas de Capsulorrexis en SolidWorks.

Fig. 10. Sala de cirugía en Unity 3D.

La sala de cirugía se basó en una de las salas del Hospital 12 de Octubre de Madrid, donde se pudo observar en detalle una operación de cataratas en todos sus procesos. Se identificaron cinco pasos en dicha cirugía, los cuales fueron programados de la siguiente manera:

a) Creación de la insición

El usuario deberá tomar la cuchilla de incisión corneal y hacer el corte cerca del limbo corneal, que es la región donde la córnea se une con la esclerótica (la capa blanca del ojo). Para ello se colocó una señal de color blanco en esta parte del ojo con el fin de indicarle al usuario donde se debe hacer el corte, señal que cambia a color verde cuando dicho corte se ha realizado de manera adecuada (Fig. 11).

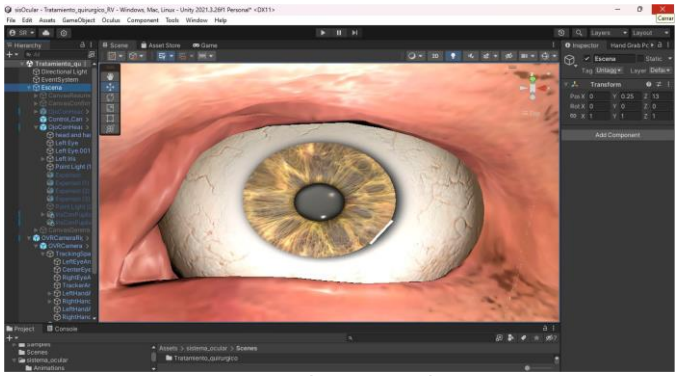


Fig. 11. Programación de la incisión en Unity 3D.

b) Capsulorrexis

Antes de realizar la apertura de la capsula anterior del cristalino se aplica liquido midriático con el fin de dilatar la pupila y facilitar el trabajo del cirujano. Para ello el usuario selecciona en la instrumentación quirúrgica dicho líquido y lo introduce por la incisión realizada. Una vez introducido se activa una animación donde se observa el líquido y la pupila mientras se dilata. Cuando la pupila está dilatada, se activa una señal en forma de arco que le indica al usuario el trayecto que debe hacer con las pinzas de Capsulorrexis para realizar la apertura de la cápsula anterior del cristalino (Fig. 12). El usuario deberá seguir de izquierda a derecha el trayecto lo más preciso posible, mostrándose en color verde cuando la trayectoria ha sido realizada de manera correcta, momento en el cual se da paso a una animación de la apertura de la cápsula anterior del cristalino. Para evaluar la precisión del instrumento quirúrgico manejado por el usuario en relación con la trayectoria deseada, se utiliza el concepto de error absoluto medio (MAE por sus siglas en inglés), el cual es una medida de la discrepancia entre dos conjuntos de valores, usado comúnmente en procedimientos quirúrgicos.

c) Facoemulsificación

En este paso el usuario deberá fragmentar la catarata con la sonda de facoemulsificación y luego aspirar los fragmentos resultantes con la sonda de aspiración. Para fragmentar la catarata aparecen tres líneas indicando el trayecto que el usuario debe realizar con la sonda (Fig. 13). Cada línea del trayecto se irá colocando en verde indicándole al usuario que el trayecto se va completando correctamente, cuando este finaliza se activa una animación que muestra la fragmentación de la catarata. Al igual que en el paso anterior se evalúa la precisión del instrumento quirúrgico manejado por el usuario por medio del error absoluto medio MAE.

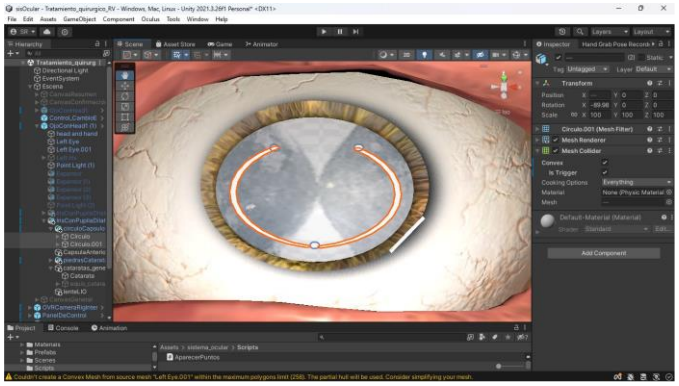


Fig. 12. Trayectoria para capsulorrexis en Unity 3D.

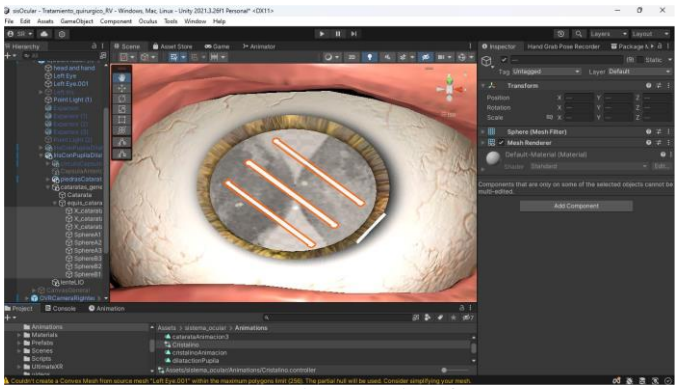


Fig. 13. Trayectorias para facoemulsificación en Unity 3D.

Una vez se realiza la fragmentación de la catarata, procede el cirujano a hacer la aspiración de ella ya fragmentada. Los fragmentos de la catarata fragmentada se deben aspirar con la sonda de aspiración a través de la

incisión. La sonda de aspiración debe tocar cada fragmento de la catarata, lo que activará la animación de aspiración y entonces cada fragmento desaparece de la escena.

d) Implante del lente intraocular

Una vez se ha retirado completamente la catarata, el cirujano procede a realizar el implante del lente intraocular usando la pinza de implante. La Fig. 14 muestra el implante ya colocado una vez el usuario con las pinzas de implante lo introduce a través de la incisión corneal, activando la animación del implante.

III. RESULTADOS

La plataforma fue probada con diez personas, pertenecientes a la Universidad del Cauca, Colombia, muestras de dos poblaciones relacionadas con la aplicación: personal de la salud y personal de ingeniería (Fig. 15). Aunque es una muestra pequeña, permitirá percibir el potencial de la herramienta como método de enseñanza.

Fig. 14. Implante del lente intraocular en Unity 3D.

El personal de salud que fue seleccionado y participó en las pruebas de este trabajo de investigación comprende un médico general, dos médicos internos y dos estudiantes del programa de Medicina de la Universidad del Cauca, Colombia. Estos participantes están directamente relacionados con la atención y diagnóstico de pacientes, además de tener conocimiento en las áreas de salud que abarca esta investigación, siendo fundamentales para evaluar la utilidad de la herramienta y proporcionar información sobre el potencial en la práctica médica.

El personal de ingeniería está compuesto por dos profesionales en ingeniería, dos estudiantes de ingeniería y un programador de software. La experiencia y conocimientos en herramientas tecnológicas aportan en esta investigación para evaluar la funcionalidad de la herramienta desde un punto de vista técnico e ingenieril.

A cada grupo se le dio una introducción breve de 10 minutos donde se les explicó el proyecto, objetivos, y uso de la herramienta, así como las funcionalidades de las gafas de realidad virtual Meta Quest 2.

Cada sujeto que probó la herramienta firmó un consentimiento informado. Para la prueba de la biología ocular y enfermedades tuvieron 10 minutos de exploración aproximadamente, mientras que para la prueba del procedimiento quirúrgico tuvieron 30 minutos aproximadamente. Después de la prueba cada usuario contestó una encuesta que consta de dos secciones: la primera trata del funcionamiento de la plataforma en sí, y la segunda evalúa el desempeño y evolución del usuario dentro de la prueba. De los diez usuarios, 8 fueron hombres y dos mujeres; 5 tenían menos de 23 años, 4 estaban entre los 24 y los 50 años de edad, y 1 era mayor de 50 años.

Fig. 15. Usuarios probando la plataforma.

Respecto a los resultados de las encuestas, se generaron dos análisis, uno cualitativo y el otro cuantitativo.

Análisis cualitativo

Este trabajo busca evaluar principalmente conceptos como interés, absorción e inmersión total. En ese contexto, el 100% de los participantes manifestaron que encontraron altamente interesantes las aplicaciones de ingeniería aplicadas al área de la salud, sin embargo, cuando se habla de absorción, el 60% de los participantes coincide en que fue difícil adaptarse a la interacción dentro del entorno, lo que se ve reflejado en patrones que se repiten señalando la movilidad y agarre de objetos que podrían mejorar para aumentar la naturalidad en estas actividades. Además, el 90% de los participantes considera que uno de los ejercicios con mayor dificultad tiene que ver con la cirugía de cataratas y en particular 2 participantes abandonaron la prueba por presentar un grado alto de dificultad, especialmente en este paso. En cuanto a la inmersión total, el 100% de los participantes manifestó sentirse en una sala de oftalmología real y el 90% manifestó sentirse en un entorno de tratamiento quirúrgico real. De otra parte, el 40% de los participantes presentó síntomas como mareo o visión borrosa, lo que disminuye la experiencia y resta interés de completar con un buen desempeño la prueba. Finalmente, las preguntas abiertas señalan claramente que una de las necesidades manifestadas por los participantes es la precisión en los movimientos durante la cirugía, lo cual afecta el cálculo del MAE.

Como se corrobora con otros estudios, aunque la tecnología de realidad virtual ha significado un cambio tecnológico significativo, todavía no se puede hablar de un sistema que produzca en el usuario una sensación de inmersión completa.

Análisis cuantitativo

La aplicación entrega los datos obtenidos por cada usuario al momento de realizar la prueba. Estos datos reflejan efectividad (logró el paso o no) y precisión (valor entregado por MAE) en los pasos del entorno de tratamiento quirúrgico que simula una cirugía de cataratas bajo el método de facoemulsificación. Los resultados para cada paso fueron los siguientes:

a) Creación de la incisión corneal

El 100% de los participantes logró realizar una incisión corneal con el instrumento adecuado. Sin embargo, el 80% logró hacerlo en el primero intento mientras que el 20% necesitó ayuda auditiva para completar la incisión.

b) Capsulorrexis

La Fig. 16 muestra los resultados en este paso: los primeros cinco corresponden al personal de salud, los restantes al personal de ingeniería. Se observa que el personal de salud logró una precisión menor a los 50 mm, lo cual es perfectamente lógico, mientras el personal de ingeniería superó en su mayoría los 50 mm. En este caso el MAE entrega una medida directa de la precisión cuando el usuario realiza el seguimiento de la trayectoria indicada, lo que la convierte en una herramienta valiosa para mejorar la calidad del movimiento del instrumento durante el proceso quirúrgico.

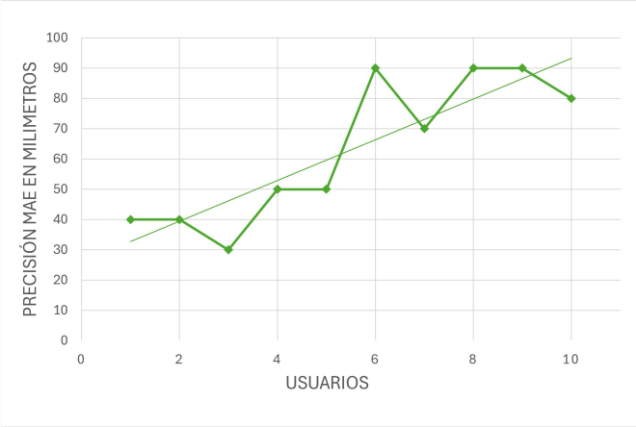


Fig. 15. Precisión en el paso de capsulorrexis.

c) Fragmentación de la catarata

La Fig. 16 muestra que en este paso el personal de salud logró una precisión menor a los 30 mm mientras que el personal de ingeniería superó en su mayoría los 50 mm. El valor del MAE bajó un 20% en comparación al paso anterior, en este punto los participantes manifestaron que la práctica de los pasos anteriores hizo que mostraran mayor interés en lograr un mejor desempeño en la precisión.

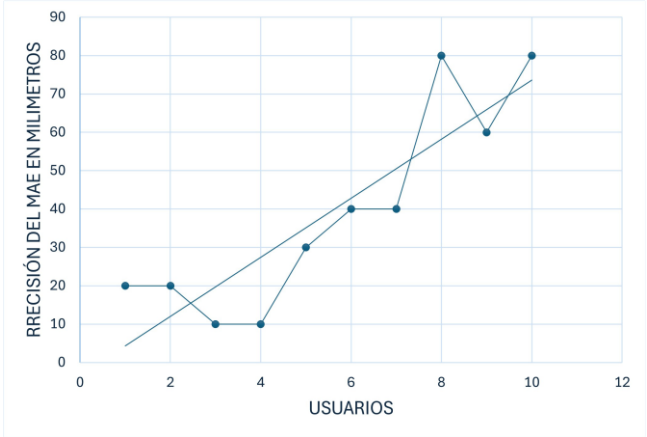


Fig.16. Precisión en el paso de fragmentación de la catarata.

d) Aspiración de la catarata

El 90% de los participantes logró realizar la aspiración de la catarata, el 10% desistió en esta parte de la prueba (1 persona). El participante que abandonó en este punto manifestó tener dificultades en el seguimiento de las trayectorias de los pasos anteriores, ocasionándole también un leve mareo, lo cual le obligó a abandonar la prueba (participante del grupo de salud).

e) Implante del lente intraocular

El 80% de los participantes logró realizar el implante del lente intraocular, el 20% abandonó la prueba. Los dos participantes que abandonaron en este punto la prueba (uno de salud y otro de ingeniería), manifestaron tener dificultar en el seguimiento de las trayectorias de los pasos anteriores, lo que les ocasionó una leve distorsión en la vista, y les obligó a finalizar el experimento.

Proceso de enseñanza aprendizaje

Finalmente, la herramienta posee también un apartado que permite medir el nivel de enseñanza aprendizaje llevado a cabo por los usuarios. Este proceso consta de dos exámenes que debe resolver el usuario: un examen de la parte de biología ocular y sus enfermedades asociadas, y otro examen sobre el procedimiento quirúrgico de la extracción de la catarata. Es decir, después de que el usuario explora los dos apartados de la herramienta, procede a responder las preguntas del examen de las dos partes. En caso de no lograr obtener más del 70% de las preguntas correctas, pasará a repetir el examen, con el fin de aprobarlo en esta nueva oportunidad. La Fig. 17 presenta una vista de lo que ve el usuario en uno de los exámenes.

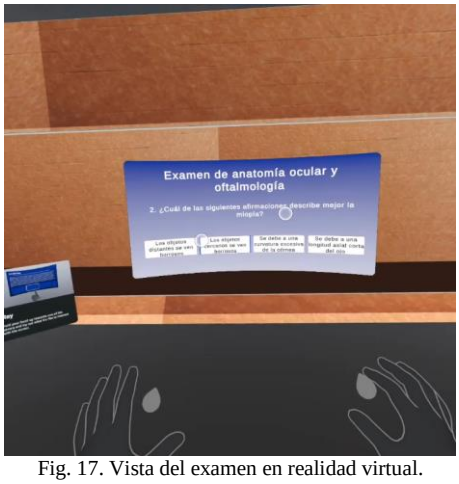


Fig. 17. Vista del examen en realidad virtual.

IV. DISCUSIÓN

Aunque se ha avanzado muchísimo en los últimos años en cuanto a las tecnologías de realidad virtual, también es cierto que no se ha llegado a una inmersión completamente realista del sujeto en el ambiente virtual. Esto hizo que algunos de los usuarios que probaron esta plataforma manifestaran que les quedó faltando sensación de "realidad" al probarla. Aunque en el mercado existen otros dispositivos de realidad virtual, el objetivo de completa inmersión aún está por ser alcanzado.

Particularmente en este año 2024 y los últimos meses del año anterior, varias compañías están incursionando fuertemente en este campo. La misma compañía Meta sacó la versión Oculus Meta 3, cuyo principal aporte es que trabaja directamente con las manos del usuario sin necesidad de los mandos físicos. Otros nuevos lanzamientos tienen que ver con las gafas Varjo XR-3 y XR-4 de la empresa finlandesa, las gafas chinas de Sheepworld, Pico o de Oivo, Valve de Estados Unidos, o los desarrollos de las conocidas marcas LG, Samsumg o Sony. Todo esto sin olvidar las excelentes posibilidades que ofrecen las nuevas gafas de Apple, donde ya se presentan las primeras investigaciones para oftalmología [16] [17] o en medicina en general [18].

Para que el presente desarrollo pueda ser incluido en un curso oficial de una facultad de medicina se recomendaría tener una versión para PC, en la cual entre otras cosas se está trabajando, con el fin de no estar supeditado a la disponibilidad del casco de realidad virtual, aunque lógicamente se perdería la extraordinaria experiencia que proporciona la respectiva inmersión virtual.

De otra parte, el costo de este tipo de dispositivos puede ser un limitante a la hora de masificar su uso en un curso de educación superior, pero también es cierto que la popularidad que están teniendo estos nuevos avances hace que su costo disminuya con el tiempo y pueda llegar a un público más amplio.

Un trabajo futuro pendiente con el desarrollo presentado aquí es su inclusión en un curso oficial de la Facultad de Medicina, donde pueda ser probado con muchos estudiantes, y obtener de ellos y de sus profesores la realimentación necesaria para mejorar la herramienta.

V. CONCLUSIONES

Este artículo presentó una herramienta basada en realidad virtual, diseñada para facilitar el aprendizaje de la anatomía ocular, las principales enfermedades del ojo, y en particular, la realización de un procedimiento quirúrgico muy común como lo es la extracción de cataratas.

La plataforma fue desarrollada en Unity 3D, e hizo uso de otros programas como Blender, SolidWorks, Visual Studio, o Meta Quest, los cuales permitieron diseñar el ojo con detalle, diseñar el ambiente, los instrumentos quirúrgicos, programar el ambiente en general, etc. Como dispositivo de realidad virtual se hizo uso de las gafas Meta Quest 2.

La herramienta de enseñanza se probó con 10 usuarios, 5 del área de la salud y 5 del área de ingeniería. Cada uno de ellos probó la herramienta en promedio durante 40 minutos, centrándose de manera especial en los 5 pasos para la extracción de las cataratas. En estos pasos se pudo medir la precisión de las trayectorias efectuadas por cada usuario, detectándose como es lógico que los participantes del área de la salud lograran mayor precisión en la ejecución de las trayectorias comparados con los participantes de ingeniería.

La herramienta permite también evaluar los conocimientos adquiridos a través de un examen, donde el usuario tiene dos oportunidades para aprobar respondiendo las preguntas que se le proponen.

Los resultados muestran el gran potencial que tiene esta tecnología como herramienta de aprendizaje en el campo médico, aunque también se observa que la tecnología tiene aún mucho por mejorar en cuanto a sensación inmersiva.

Futuros trabajos propondrán una mejora en la programación de las poses de las manos con el fin de hacer más naturales los movimientos que haga el usuario, así como la inclusión de procedimientos oculares de mayor complejidad y por supuesto, su prueba en cursos oficiales de la Facultad de Medicina, lo cual implicará muchos más usuarios de la misma.

REFERENCIAS

[1] R. Doerner, W. Broll, P. Grimm and B. Jung, Virtual and Augmented Reality Foundations and Methods of Extended Realities, Springer Cham, 2022.

[2] X. Xu, E. Mangina and A. Campbell, "HMD-Based Virtual and Augmented Reality in Medical Education: A Systematic Review", Frontiers in Virtual Reality, vol. 2, 2021.

[3] H. Jiang, S. Vimalesvaran, J. King, K. Lim, S. Mogali and L. Tudor, "Virtual Reality in Medical Students' Education: Scoping Review", vol. 8, no. 1, e34860, 2022.

[4] T.González, C. Ibeas, I. Gravert, A. León and M. Rojas, "Características de un escenario de Realidad Virtual para el aprendizaje de anatomía: Una revisión bibliográfica", Revista Española de Educación Médica, vol. 3, no. 3, 2022.

[5] M. Duarte, L. Santos, J. Guimaraes and M. Peccin, "Learning anatomy by virtual reality and augmented reality. A scope review", Morphology, vol. 104, no. 347, pp. 254-266, 2020.

[6] J. Negrillo, J. Jiménez and F. Feito, “The role of virtual and augmented reality in orthopedic trauma surgery: From diagnosis to rehabilitation”, Computer Methods and Programs in Biomedicine, vol. 191, 2020.

[7] T. Al-Khaled, L. Acaba, E. Cole, D. Ting, M. Chiang and P. Chan, “Digital Education in Ophthalmology”, Asia-Pacific Journal of Ophthalmology, vol. 11, no. 3, pp. 267-272, 2022.

[8] T. Succar, H. Beaver and A. Lee, “Impact of COVID-19 pandemic on ophthalmology medical student teaching: educational innovations, challenges, and future directions”, Survey of Ophthalmology, vol. 37, no. 1, pp. 217-225, 2022.

[9] M. Iskander, T. Ogunsola, R. Ramachandran, R. McGowan and L. Al-Aswad, “Virtual Reality and Augmented Reality in Ophthalmology: A Contemporary Prospective”, Asia-Pacific Journal of Ophthalmology, vol. 10, no. 3, pp. 244-252, 2021.

[10] M. King, C. Saha, S. Ling, R. Wan, K. Shih and Y. Chan, “Virtual reality and augmented reality— emerging screening and diagnostic techniques in ophthalmology: A systematic review”, vol. 67, no. 5, pp. 1516-1530, 2022.

[11] M. Williams, “Virtual reality in ophthalmology education: simulating pupil examination”, Eye, vol. 36, pp. 2084-2085, 2022.

[12] X. Chen, J. Xu, X. Chen and K. Yao, “Cataract: Advances in surgery and whether surgery remains the only treatment in future”, Advances in Ophthalmology Practice and Research, vol. 1, no. 1, 2021.

[13] G. Welch, M. Cruz, M. Escalona and V. Fundora, “Facoemulsificación en la cirugía de catarata”, Revista Cubana de Medicina Militar, vol. 46, no. 3, 2017.

[14] Meta. Primeros pasos con Meta Quest 2. [En línea]. Disponible en: https://www.meta.com/es/quest/products/quest-2/ , 2024.

[15] K. Malik and R. Goel, Manual de Cirugía de Cataratas con Incisión Pequeña. Enfoque en Situaciones Difíciles y Complicaciones, Editorial Amolca, 2012.

[16] M. Masalkhi, E. Waisberg, J. Ong, N. Zaman, P. Sarker, A. Lee and A. Tavakkoli, “Apple Vision Pro for Ophthalmology and Medicine”, Annals of Biomedical Engineering, vol. 51, pp. 2643-2645, 2023.

[17] E. Waisberg, J. Ong, M. Masalkhi, N. Zaman, P. Sarker, A. Lee and A. Tavakkoli, “Apple Vision Pro and why extended reality will revolutionize the future of medicine”, Irish Journal od Medical Science, vol. 193, no. 1, pp. 531-532, 2024.

[18] E. França and V. Castillo, “Apple Vision Pro: Comments in Healthcare”, Human-Computer Interaction, In Press, 2024.

Exploración de la Aplicación Práctica de la Inteligencia Artificial Generativa en Entornos Educativos de Internet de las Cosas

Federico Munoz Babiano
Universidad Internacional de la Rioja
Madrid, Spain
federico.munoz@unir.net

Paula Lamo Anuarbe
Universidad Internacional de la Rioja
Madrid, Spain
paula.lamo@unir.net

Ricardo S. Alonso
Universidad Internacional de la Rioja
Madrid, Spain
ricardoserafin.alonso@unir.net

***Abstract*— El avance de la educativa y la diversidad creciente de los estudiantes han impulsado la necesidad de sistemas de aprendizaje adaptables y personalizados en entornos virtuales, capaces de ofrecer retroalimentación efectiva en tiempo real. La tesis doctoral titulada "Exploración de la Aplicación Práctica de la Inteligencia Artificial Generativa en Entornos Educativos de Internet de las Cosas" se centra en cómo la inteligencia artificial (IA) generativa puede mejorar la interacción y la satisfacción del usuario en el contexto del Internet de las cosas (IoT). Enfocándose en desarrollar y evaluar tecnologías de inteligencia artificial generativa e IoT, innovar en métodos de interacción, y optimizar modelos de IA generativa para educación en IoT, probando su integración y analizando su impacto en diversos contextos educativos. Los resultados esperados apuntan a que la integración de IA en sistemas de gestión del aprendizaje puede significativamente enriquecer la experiencia educativa mediante una personalización profunda y retroalimentación precisa, abordando así la diversidad estudiantil y promoviendo un aprendizaje más efectivo.**

Keywords— Internet de las Cosas; inteligencia artificial generativa; grandes modelos de lenguaje; prototipado rápido; herramientas educativas; tecnología educativa; LMS.

I. INTRODUCCIÓN

La tecnología educativa (EdTech) ha sufrido una serie de cambios paradigmáticos, reflejando la evolución constante de las metodologías pedagógicas y la integración de la tecnología en la educación [1]. Esta transformación se ha caracterizado por la transición de modalidades de enseñanza tradicionalmente offline a enfoques más contemporáneos, como la educación *blended* (combinación de métodos presenciales y online) [2] y formatos completamente online [3]. En este contexto, se destaca, por su influencia en la temática, la evolución de la inteligencia artificial generativa [4], especialmente con el desarrollo de grandes modelos lingüísticos (LLM) como *Generative Pre-trained Transformers* (GPT) [5] y *Bidirectional Encoder Representations from Transformers* (BERT) [6]. Estos modelos han demostrado la capacidad de comprender y generar textos con un alto grado de coherencia y relevancia. Asimismo, se han realizado avances en la evaluación de la calidad de los textos generados y su evaluación, con la introducción de métricas como *BLEU, ROUGE [7] y Flesch-Kincaid,* que permiten medir la legibilidad y coherencia de manera más precisa [8].

En este escenario, se prevé que las plataformas de gestión de aprendizaje – *Learning Management System (*LMS), como *Moodle*, enfocadas en el proceso de la enseñanza y aprendizaje, continúen evolucionando hacia configuraciones más dinámicas y personalizadas [9]. La integración de la inteligencia artificial en las plataformas LMS promueve sistemas más adaptativos y centrados en el estudiante [1]. Esta progresión hacia sistemas de información centrados en el estudiante se sustenta en varios desarrollos tecnológicos y teóricos:

- Personalización del aprendizaje: Se pueden analizar los patrones de aprendizaje y rendimiento de los estudiantes para ofrecer recomendaciones personalizadas [10]. Esto incluye la adaptación de recursos educativos [11], sugerencias de cursos y rutas de aprendizaje individualizadas [10].
- Analítica predictiva: Se pueden predecir tendencias y comportamientos estudiantiles, identificando potenciales riesgos académicos y ofreciendo intervenciones tempranas [12]. Esto es fundamental para mejorar las tasas de retención y el éxito estudiantil.
- Interfaz interactiva y adaptativa: Se pueden incorporar interfaces de usuario más intuitivas, facilitadas por tecnologías de inteligencia artificial (IA) como el procesamiento del lenguaje natural (NLP) [13]. Esto mejora la interacción del estudiante con el sistema, permitiendo una navegación más natural y respuestas contextualizadas.
- Integración de sistemas de aprendizaje: Se pueden integrar diferentes plataformas de aprendizaje y recursos online [11], creando un ecosistema de aprendizaje más cohesivo y accesible.
- Mejora en la seguridad de datos: Con la creciente preocupación por la privacidad y seguridad de los datos, es posible adoptar tecnologías avanzadas de IA para garantizar la protección de la información [14]. Esto incluye algoritmos sofisticados para la detección de intrusiones [13], cifrado de datos [14] y sistemas de autenticación segura [15], asegurando que la información personal y académica de los

estudiantes se maneje con el más alto nivel de seguridad.

- Retroalimentación y evaluación continua: Se pueden automatizar y mejorar los procesos de evaluación y retroalimentación, proporcionando a los docentes herramientas para monitorear el progreso de los estudiantes en tiempo real [16].
- Accesibilidad e inclusión: Mediante el uso de tecnologías como el reconocimiento de voz y las herramientas de accesibilidad mejoradas, se pueden ofrecer experiencias educativas más inclusivas para estudiantes con diferentes necesidades y capacidades [9,13].

A la vista de lo anterior, se deduce que la integración de la IA en las plataformas LMS representa un avance significativo en la manera en que las instituciones educativas interactúan con y apoyan a sus estudiantes. Este enfoque centrado en el estudiante promete mejorar la experiencia educativa y preparar a los estudiantes para un mundo cada vez más digitalizado y basado en datos [16]. La investigación continua en este campo es esencial para maximizar el potencial de estas tecnologías y abordar los desafíos asociados con su implementación y uso [1]. De todos estos desafíos, la capacidad de generar contenido de forma automatizada a través de la IA, especialmente en la creación de textos coherentes y legibles, ha capturado el interés de la comunidad académica y empresarial [12]. Este interés se debe al potencial de estas tecnologías para enriquecer la experiencia del usuario, particularmente en el sector educativo [11].

En el contexto anterior, el presente trabajo se sitúa en la confluencia de dos áreas fundamentales: la inteligencia artificial generativa y la mejora de la experiencia del usuario en plataformas digitales en entornos de internet de las cosas (IoT). El objetivo principal de este trabajo es investigar cómo la inteligencia artificial generativa puede potenciar la interacción y la satisfacción del usuario en contextos educativos digitales del ámbito del IoT, así como desarrollar sistemas que sean eficientes y efectivos en este ámbito. En ese sentido, la inteligencia artificial generativa puede ser aplicada para generar contenido web, asistentes virtuales, resúmenes automáticos que no solo sean coherentes y legibles, códigos de programación automática o prototipado rápido de dispositivos, y, a la vez, mejore la interacción y la satisfacción del usuario o permita aumentar las funcionalidades que tiene a su disposición.

Para ponerlo en práctica, en este trabajo se desarrolla dos tareas en el marco del programa de Máster Universitario en Internet de las Cosas de la Universidad Internacional de La Rioja (UNIR) y la vertical de Industria Conectada de la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología (ESIT), aprovechando su enfoque innovador en la convergencia de tecnologías digitales y la experiencia de los investigadores y colaboradores que participan en este trabajo y son, a la vez, profesores y/o expertos en la vertical. Estas tareas se describen a continuación.

Este artículo se estructura de la siguiente manera: La Sección II examina la implementación de modelos de IA generativa en foros online de plataformas educativas, destinados a mejorar la interacción estudiante-plataforma mediante el aumento de la participación estudiantil y la satisfacción general. La Sección III se centra en el desarrollo de nuevas funciones basadas en IA generativa para facilitar el prototipado rápido de sistemas IoT utilizando Arduinoblocks, destacando cómo estas herramientas pueden simplificar el desarrollo tecnológico y fomentar un aprendizaje experimental en contextos educativos. A continuación, en la sección de resultados esperados, se anticipan mejoras en la eficiencia de la interacción, el enriquecimiento del aprendizaje y la reducción de la carga docente para la implementación de modelos en foros online, y la facilitación del aprendizaje, la automatización en la generación de recursos, y la promoción del aprendizaje experimental en el desarrollo de IoT. También, se incluye un análisis de la experiencia del alumno. Finalmente, se presentan las conclusiones parciales y las direcciones futuras, proyectando los beneficios de integrar la IA generativa en entornos educativos y explorando posibles investigaciones futuras para la implementación de modelos de IA en otros contextos educativos y el desarrollo de nuevas herramientas para la enseñanza de tecnologías emergentes como el IoT.

II. Implementación de modelos de AI generativa del lenguaje en foros online

Estos modelos, preentrenados con conjuntos de datos selectivos [17], se utilizarán para proporcionar respuestas tempranas en el foro online utilizado en las aulas del Máster Universitario en IoT de UNIR. La integración de LLM en plataformas como *Moodle* permite una interacción más eficiente y enriquecedora, donde los estudiantes pueden recibir respuestas instantáneas y personalizadas a sus consultas, mejorando así la participación y el aprendizaje [18].

El foro del aula en una asignatura online es, por definición, una herramienta de comunicación con el alumno que, si se utiliza bien, puede suponer un lugar de encuentro en el que los alumnos amplíen sus conocimientos, resuelvan dudas e interactúen entre ellos en un entorno académico y supervisado por el profesor de forma que se eviten asumir premisas o suposiciones incorrectas [19]. Y se trata, quizás, de una de las herramientas menos potenciadas o aprovechadas en UNIR por algunos profesores y alumnos. Los motivos son varios. Los alumnos pueden sentir pudor a plantear dudas o cuestiones si ven que el foro no es muy activo y preferir el uso de otras redes como *WhatsApp o Telegram*, [20] donde se generan grupos con todos los compañeros del aula sin supervisión académica. Por su parte, los profesores pueden sentir que no disponen de suficiente tiempo para buscar recursos de calidad que compartir en el foro sin desatender sus otras tareas o evitar hacerlo por falta de pericia o formación para gestionar un elevado número de interacciones en el foro que llegue a abrumarlo.

UNIR se enfoca en mejorar cada asignatura mediante: i) el desarrollo de contenidos académicos y exhaustivos para los estudiantes, ii) la constante actualización de dichos contenidos, iii) la atracción de talento para su cuerpo docente, y iv) la realización de estudios orientados a la mejora continua [21]. Sin embargo, estos aspectos no son garantía de éxito, ya que influyen otros como la forma en que se imparte la asignatura, los conocimientos previos y dedicación del docente, la continuidad del profesorado en esa asignatura y la afinidad del docente con la misma y el *feeling* con los estudiantes. Idealmente, se fomenta que el mismo profesor o equipo de profesores asuma la docencia de asignaturas equivalentes o similares de forma que la rotación sea mínima, se estabilice a la plantilla y se perfeccionen metodologías y

contenidos, repercutiendo positivamente en la experiencia de los alumnos. Sin embargo, esto no es siempre posible debido a bajas por incapacidad temporal, permanente o voluntarias de los profesores, rotación de puestos o asunción por parte del personal de otras tareas en la entidad. En estos casos, los coordinadores académicos de cada titulación deben seleccionar nuevo personal porque la plantilla no es capaz de asumir esa tarea o el coordinador desconoce de la existencia de estas afinidades entre personal propio de UNIR. Esto deriva en una rotación elevada del profesorado y falta de continuidad que, por diversas razones, como la falta de tiempo, la carga excesiva o el desconocimiento, impide hacer una transición suave y amigable entre docentes de estas asignaturas encontrándose los nuevos docentes solos ante la tarea de asumir esa docencia y atender a los alumnos. En este contexto, cabe preguntarse: ¿de qué depende la diferencia de calificaciones obtenidas por los profesores en la misma asignatura? La respuesta es compleja. Ante asignaturas con mismos contenidos desarrollados e igualdad de condiciones en la plataforma de UNIR, parece que la dedicación del profesor, cómo atiende a los alumnos, cómo actualiza los contenidos en las sesiones presenciales o prepara sus clases son elementos clave a la hora de que los alumnos los evalúen. Luego, el trato que el profesor dispensa a los alumnos en el aula y en el foro y su dedicación y esfuerzo por mantener el interés y motivación de los alumnos debe ser el eje principal de las acciones que se lleven a cabo cuando se habla de mejorar resultados obtenidos en las encuestas de satisfacción y el índice de promoción neto (IPN). Sin embargo, las últimas encuestas de valoración del clima reflejan que un elevado porcentaje del profesorado de la escuela superior de ingenieria y tecnología (ESIT) considera que el tiempo asignado en su planificación a preparar las asignaturas y otras tareas, les impiden desarrollar su trabajo con éxito o con la dedicación que merece, repercutiendo esto en la dedicación a los foros de las asignaturas en muchas ocasiones. Tratando de dar respuesta a esta cuestión, previamente se propuso crear una base de datos común para los profesores de asignaturas en la que puedan alojar recursos didácticos que, posteriormente, fueran utilizados para dinamizar los foros de la asignatura. Esta base de datos estaba alojada en el Share Point corporativo para tener un coste de construcción y mantenimiento nulos, pudiendo mantenerse y ampliarse en el futuro de forma sencilla. A partir de esta base de datos (ver Fig. 1), se desarrolló una nueva metodología de trabajo que facilitaba y optimizaba la dinamización de los foros de las asignaturas con un fin triple: 1) optimizar y facilitar la tarea docente poniendo a su disposición una herramienta y una metodología novedosa, 2) reducir la insatisfacción del profesorado poniendo a su disposición un recurso que le permita gestionar en menor tiempo sus interacciones en el foro y disponer de información actualizada y 3) mejorar la experiencia UNIR de los estudiantes y, por tanto, su satisfacción, a través de interacción programadas en el foro de la asignatura, como sus competencias profesionales futuras [22].

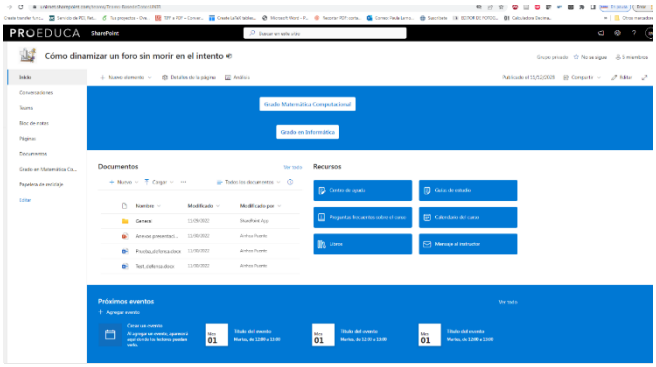


Fig.1. Pantalla de inicio del Share Point creado.

Es desarrollado un chatbot alimentado por un modelo de IA generativa, disponibilizado en el foro de la asignatura de IoT con objeto de dar respuesta a los alumnos en cuestiones que tradicionalmente se repiten una y otra vez sobre aspectos relacionados con los contenidos teóricos de la asignatura y aspectos relacionados con la metodología UNIR. Este modelo, que será previamente entrenado y cuyo conjunto de datos está limitado a los recursos especializados seleccionados por el docente para la asignatura, proporcionará respuestas a los estudiantes de manera dinámica y automatizada, enfocándose en la optimización y dinamización de los foros de discusión. Para lograr esto, el modelo requerirá permisos de lectura y escritura en la plataforma Moodle correspondiente a la asignatura. Mediante procesos de *pulling*, el script supervisará la publicación de mensajes por parte de los usuarios catalogados como estudiantes, respondiendo a estos mensajes y solicitando una evaluación numérica del 1 al 5 para determinar su grado de satisfacción, además de una sección para respuestas abiertas. Posteriormente, estas evaluaciones y respuestas abiertas serán analizadas para identificar áreas de mejora y principales indicadores del uso y optimización del modelo.

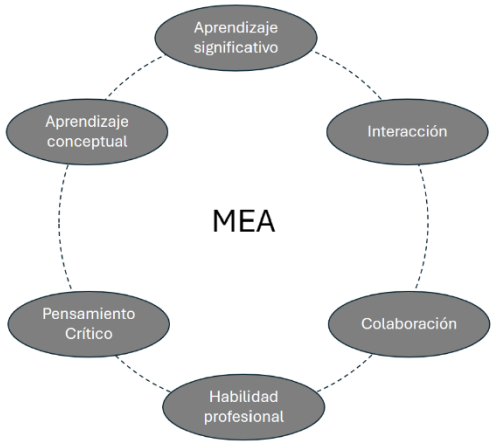


Fig.2. Esquema de modelo de activación de actividades para la mejora de las competencias futuras de los alumnos (modeling-eliciting activities, MEA [22]).

III. Desarrollo de nuevas funciones basadas en AI generativa para desarrollar sistemas IoT con prototipado rápido en Arduinoblocks

Esta aplicación implica el uso de AI para la enseñanza en el campo del IoT. Inicialmente, se trabajará con *Arduinoblocks* [23], una plataforma educativa para la enseñanza de IoT, plataforma que ya han mostrado su interés y se beneficiaría de la integración de componentes de AI generativa, facilitando un aprendizaje más interactivo y

adaptativo. Esto podría incluir la generación automatizada de ejemplos de código, tutoriales personalizados y soluciones a problemas comunes dentro del ámbito del IoT.

La aplicación de la IA en la enseñanza del IoT representa un avance significativo en la educación tecnológica. El IoT ha transformado la interacción humana con el entorno al conectar objetos cotidianos y facilitar un ecosistema de dispositivos interconectados [23]. En este contexto, la IA se posiciona como una herramienta esencial para el desarrollo de funcionalidades innovadoras en aplicaciones de IoT. Sin embargo, la implementación de la IA en la creación de prototipos de IoT plantea retos, especialmente para aquellos que se inician en este campo [24]. Las tareas como la configuración de la interfaz de programación de aplicaciones (API) [25], la programación de firmware y la integración con infraestructuras [26] existentes pueden resultar complejas y desalentadoras, lo que constituye una barrera para novatos y estudiantes. La falta de herramientas específicas para el desarrollo de prototipos en contextos educativos, sumada a la complejidad técnica y la necesidad de conocimientos avanzados en hardware y software, dificulta la adopción de estas tecnologías por parte de usuarios no experimentados.

Aunque existen módulos que facilitan la conexión de herramientas de IA con microcontroladores, la dispersión de la información relevante y la documentación técnica de difícil acceso complican su uso. Las bibliotecas de control, a menudo en C++, presentan un desafío adicional por su complejidad. Aunque plataformas como Arduino intentan simplificar la creación de prototipos, su limitada disponibilidad y coste elevado pueden desfavorecer su uso. Los módulos basados en ESP32 [27], que incorporan pantallas *OLED* y se programan en C++ usando Arduino y librerías específicas del fabricante, ofrecen una alternativa más accesible, pero aún carecen de una solución enfocada en la conexión modular, crucial para la estandarización en entornos educativos.

Ante este panorama, las herramientas visuales o de programación por bloques para la creación rápida de prototipos de dispositivos IoT basados en IA cobrarán un papel vital [28]. Plataformas como Arduino, de código abierto, habilitan a usuarios sin experiencia previa en programación para desarrollar prototipos IoT mediante interfaces gráficas. Asimismo, Raspberry Pi ha revolucionado la enseñanza del IoT y la programación, facilitando la realización de proyectos más complejos [29]. Estas iniciativas promueven la creatividad y la innovación en diversas áreas, como la domótica o la gestión urbana, y buscan simplificar el desarrollo de dispositivos IoT para hacerlo más accesible a estudiantes, principiantes y profesionales.

En este contexto, el desarrollo de una herramienta visuales o de programación por bloques para la creación rápida de prototipos de dispositivos IoT basados en IA [30] generativa ofrece una oportunidad inmejorable para integrar la IA en la educación y la investigación. Esta herramienta combinaría un entorno gráfico intuitivo con hardware compatible y una infraestructura de IA en tiempo real, fomentando un aprendizaje experimental. El trabajo propone utilizar *Arduinoblocks*, que se basa en *Google Blockly*, para generar el firmware necesario y selecciona la placa ESP32 *STEAMakers* para entornos educativos debido a su conectividad modular y compatibilidad con diversas plataformas de programación (ver arquitectura en Fig. 3). Esta tarea pretende ser una continuación de los resultados presentados en [31].

Fig. 1.

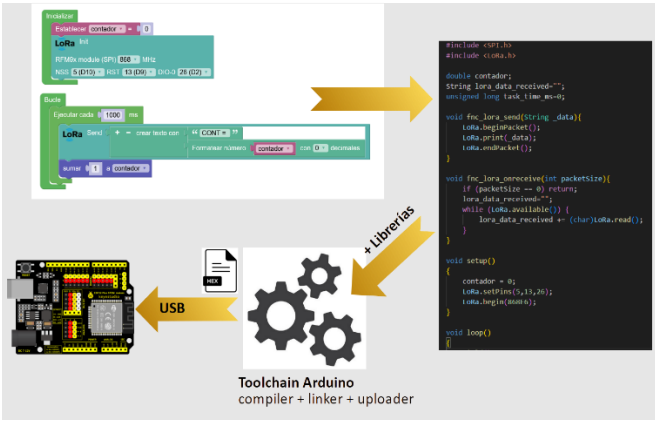


Fig. 3. Arquitectura de Blockly y Toolchain Arduino.

IV. Resultados esperados

Los resultados esperados del trabajo deben ser diferenciados por tareas. Así, para la primera tarea (implementación de modelos de IA generativa del lenguaje en foros online) se espera:

- *Mejora en la participación estudiantil:* Al proporcionar respuestas tempranas e instantáneas a las consultas, se anticipa un incremento en la actividad del foro, ya que los estudiantes se sentirán más incentivados a participar al recibir feedback rápido y relevante.
- *Incremento en la eficiencia de la interacción:* La integración de IA en plataformas como Moodle facilitará una interacción más eficiente entre estudiantes y el material del curso, mejorando la experiencia educativa general.
- *Enriquecimiento del aprendizaje:* Al recibir respuestas personalizadas, se espera que los estudiantes tengan una experiencia de aprendizaje más rica, que aborde sus necesidades específicas y dudas en tiempo real.
- *Reducción de la carga docente:* Los modelos de IA pueden aliviar parte de la carga de los profesores al responder automáticamente a preguntas frecuentes o comunes, permitiéndoles centrarse en tareas más complejas y en la mejora de los contenidos del curso.
- *Mejora de la satisfacción y la experiencia educativa:* Al optimizar la dinámica de los foros y facilitar una comunicación más efectiva, se espera una mejora en la satisfacción general de los estudiantes con el curso y con la plataforma educativa.
- *Recopilación de feedback para mejoras:* A través de la evaluación numérica y las respuestas abiertas solicitadas por el modelo de IA, se podrán identificar áreas de mejora y ajustar tanto el modelo como los contenidos del curso en función de las necesidades de los estudiantes.

Mientras que, los resultados esperados en la segunda etapa (desarrollo de nuevas funciones basadas en la IA

generativa para desarrollar sistemas IoT con prototipado rápido en *Arduinoblocks*) son:

- *Facilitación del aprendizaje en IoT:* La integración de componentes de IA generativa en plataformas educativas como Arduinoblocks se espera que haga el aprendizaje del IoT más interactivo y adaptativo, proporcionando una experiencia más enriquecedora para los estudiantes.
- *Automatización en la generación de recursos:* Se anticipa la generación automatizada de ejemplos de código, tutoriales personalizados y soluciones a problemas comunes, lo que puede simplificar significativamente el proceso de aprendizaje y desarrollo en IoT.
- *Superación de barreras técnicas para principiantes:* Al abordar las complejidades relacionadas con la configuración de API, programación de firmware, e integración con infraestructuras existentes, la herramienta esperada reducirá las barreras de entrada para novatos y estudiantes que se inician en el campo del IoT.
- *Accesibilidad y adopción mejorada:* A través de la implementación de herramientas visuales o de programación por bloques, se espera hacer el desarrollo de dispositivos IoT más accesible a un público más amplio, incluyendo estudiantes, principiantes y profesionales sin experiencia previa en programación.
- *Innovación en la enseñanza tecnológica:* La propuesta sugiere un avance significativo en la educación tecnológica, permitiendo a los usuarios desarrollar proyectos más complejos y creativos en áreas como la domótica o la gestión urbana.
- *Promoción del aprendizaje experimental:* Con la combinación de un entorno gráfico intuitivo, hardware compatible, y una infraestructura de IA en tiempo real, se promoverá un enfoque de aprendizaje más experimental y práctico en el ámbito del IoT.
- *Contribución a la estandarización en entornos educativos:* La herramienta propuesta podría contribuir significativamente a la estandarización de la creación de prototipos de IoT en entornos educativos, haciendo uso de conectividad modular y compatibilidad con diversas plataformas de programación.

V. Experiencia como estudiante

La participación en esta tesis doctoral representa la combinación de la vanguardia en la educación y su transformación digital, gracias a la combinación de la inteligencia artificial generativa y el internet de las cosas.

La inversión en las tecnologías de IA generativa permite explorar y extender la generación de contenido educativo, evaluación y enriquecimiento del modelo de enseñanza, evaluando y realizando entrenamientos de contexto o prompt de diferentes modelos. Enriqueciendo el conocimiento técnico adquirido y la capacidad para discernir las implicaciones prácticas y éticas de la tecnología de IA generativa en la educación, específicamente en la enseñanza online de la temática del IoT.

En el entorno de la enseñanza del IoT, el desafío de hacer que la tecnología sea accesible y aplicable en un contexto educativo es un estímulo constante para la innovación. El desarrollo de funciones basadas en IA generativa para el prototipado rápido en plataformas como *Arduinoblocks* fortalece la creación y evaluación de soluciones tecnológicas robustas y pedagógicamente significativas.

El entorno colaborativo del trabajo con investigadores y expertos es esencial para el desarrollo investigador. Las discusiones, el intercambio de ideas y la resolución de problemas en equipo son fundamentales para el éxito del trabajo, ofreciendo diversidad de perspectivas en el campo interdisciplinario de la *EdTech*.

Las contribuciones técnicas implican un compromiso significativo con la enseñanza y la comunicación efectiva. Participando en la facilitación de foros de discusión en línea, utilizando IA generativa para mejorar la participación de los estudiantes y la eficiencia de la interacción.

La recopilación y análisis de *feedback* son tareas cruciales del trabajo, permitiendo desarrollar una comprensión profunda de cómo los estudiantes y profesores interactúan con las nuevas tecnologías y cómo estas herramientas pueden ser mejoradas para servir mejor a las necesidades educativas.

En resumen, la experiencia en este doctorado proporciona una perspectiva integral de cómo la IA generativa y el IoT pueden ser orquestados para enriquecer la educación tecnológica.

VI. Conclusiones

Se presentan los resultados esperados de la tesis titulada "Exploración de la Aplicación Práctica de la Inteligencia Artificial Generativa en Entornos Educativos de Internet de las Cosas y la Industria Conectada", que tiene dos tareas claramente diferenciadas: la implementación de modelos de IA generativa del lenguaje en foros online y el desarrollo de nuevas funciones basadas en la IA generativa para desarrollar sistemas IoT con prototipado rápido en *Arduinoblocks*.

La solución propuesta en primer lugar implica la creación de un modelo basado en IA generativa que, integrado en los foros de *Moodle*, responda dinámica y automáticamente a las consultas comunes de los estudiantes, mejorando así la dinámica de los foros y la experiencia de aprendizaje. Este modelo requerirá acceso de lectura y escritura en la plataforma y utilizará un sistema de *pulling* para interactuar con los mensajes de los estudiantes, solicitando evaluaciones para medir la satisfacción y recoger *feedback* para futuras mejoras.

De la segunda propuesta implica realizar un aprendizaje más interactivo, personalizado y accesible, especialmente para los principiantes. Al abordar las complejidades inherentes al desarrollo de prototipos en IoT, como la programación y la configuración de infraestructuras, y ofrecer soluciones automatizadas como la generación de código y tutoriales personalizados, esta innovación promete superar las barreras técnicas y cognitivas que a menudo desalientan a los estudiantes y aficionados. Al fomentar un enfoque más experimental y visual para el desarrollo de

prototipos IoT, mediante herramientas de programación por bloques y entornos gráficos intuitivos, se facilita una mayor creatividad e innovación en campos aplicados como la domótica y la gestión urbana. Esta evolución representa un avance significativo en la democratización del aprendizaje tecnológico, abriendo puertas a un espectro más amplio de usuarios para participar activamente en la creación y exploración del vasto potencial del IoT.

AGRADECIMIENTOS

Esta publicación es parte del proyecto Exploración de la Aplicación Práctica de la Inteligencia Artificial Generativa en Entornos Educativos de Internet de las Cosas y la Industria Conectada (T24-002-I), financiada por la convocatoria del Programa Propio de Inversiones Estratégicas para el Desarrollo de Capacidades de Investigación y Transferencia (Programa Incentiva) del Instituto de Investigación, Transferencia e Innovación (ITEI) del Vicerrectorado de Transferencia de la Universidad Internacional de La Rioja. También, ha recibido apoyo de la Escuela de Doctorado y el Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Internacional de La Rioja.

REFERENCIAS

[1] Q. Wang and Q. Huang, "Engaging Online Learners in Blended Synchronous Learning: A Systematic Literature Review," in IEEE Transactions on Learning Technologies, vol. 17, pp. 594-607, 2024, doi: 10.1109/TLT.2023.3282278.

[2] A. Kumar et al., "Blended Learning Tools and Practices: A Comprehensive Analysis," in IEEE Access, vol. 9, pp. 85151-85197, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3085844.

[3] P. J. Martínez, F. J. Aguilar and M. Ortiz, "Transitioning from Face-to-Face to Blended and Full Online Learning Engineering Master's Program," in IEEE Transactions on Education, vol. 63, no. 1, pp. 2-9, Feb. 2020, doi: 10.1109/TE.2019.2925320.

[4] Y. -C. Wang, J. Xue, C. Wei and C. . -C. J. Kuo, "An Overview on Generative AI at Scale with Edge–Cloud Computing," in IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 4, pp. 2952-2971, 2023, doi: 10.1109/OJCOMS.2023.3320646.

[5] A. Das and R. M. Verma, "Can Machines Tell Stories? A Comparative Study of Deep Neural Language Models and Metrics," in IEEE Access, vol. 8, pp. 181258-181292, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3023421.

[6] Sudharsan Ravichandiran, Getting Started with Google BERT: Build and train state-of-the-art natural language processing models using BERT, Packt Publishing, 2021.

[7] P. Netisopakul and U. Taoto, "Comparison of Evaluation Metrics for Short Story Generation," in IEEE Access, vol. 11, pp. 140253-140269, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3337095.

[8] Z. Liu, X. Kong, H. Chen, S. Liu and Z. Yang, "MOOC-BERT: Automatically Identifying Learner Cognitive Presence From MOOC Discussion Data," in IEEE Transactions on Learning Technologies, vol. 16, no. 4, pp. 528-542, Aug. 2023, doi: 10.1109/TLT.2023.3240715.

[9] A. Shoufan, "Lecture-Free Classroom: Fully Active Learning on Moodle," in IEEE Transactions on Education, vol. 63, no. 4, pp. 314-321, Nov. 2020, doi: 10.1109/TE.2020.2989921

[10] Q. Wang, C. P. Rose, N. Ma, S. Jiang, H. Bao and Y. Li, "Design and Application of Automatic Feedback Scaffolding in Forums to Promote Learning," in IEEE Transactions on Learning Technologies, vol. 15, no. 2, pp. 150-166, 1 April 2022, doi: 10.1109/TLT.2022.3156914.

[11] E. N. Fhloinn and O. Fitzmaurice, «How and why? Technology and practices used by university mathematics lecturers for emergency remote teaching during the COVID-19 pandemic», Teaching Mathematics and its Applications, vol. 40, n.o 4, 2021, doi: 10.1093/teamat/hrab018.

[12] K. Okoye, S. D. N. Daruich, J. F. E. De La O, R. Castaño, J. Escamilla and S. Hosseini, "A Text Mining and Statistical Approach for Assessment of Pedagogical Impact of Students' Evaluation of Teaching and Learning Outcome in Education," in IEEE Access, vol. 11, pp. 9577-9596, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3239779.

[13] H. Lee, «The Rise and Challenges of Postpandemic Online Education», IEEE Engineering Management Review, vol. 49, n.o 4, 2021, doi: 10.1109/EMR.2021.3105195.

[14] R. Xiao and X. Liu, "Analysis of the Architecture of the Mental Health Education System for College Students Based on the Internet of Things and Privacy Security," in IEEE Access, vol. 9, pp. 81089-81096, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3084208.

[15] W. Iqbal, H. Abbas, M. Daneshmand, B. Rauf and Y. A. Bangash, "An In-Depth Analysis of IoT Security Requirements, Challenges, and Their Countermeasures via Software-Defined Security," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 7, no. 10, pp. 10250-10276, Oct. 2020, doi: 10.1109/JIOT.2020.2997651.

[16] K. Ahmad et al., "Data-Driven Artificial Intelligence in Education: A Comprehensive Review," in IEEE Transactions on Learning Technologies, vol. 17, pp. 12-31, 2024, doi: 10.1109/TLT.2023.3314610.

[17] H. Strobelt et al., "Interactive and Visual Prompt Engineering for Ad-hoc Task Adaptation with Large Language Models," in IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 29, no. 1, pp. 1146-1156, Jan. 2023, doi: 10.1109/TVCG.2022.3209479.

[18] S. L. Sánchez López, R. P. Díaz Redondo and A. Fernández Vilas, "Can the Type of Content You Share on eLearning Forums Reveal What Kind of Student You Are?," in IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologias del Aprendizaje, vol. 16, no. 3, pp. 318-327, Aug. 2021, doi: 10.1109/RITA.2021.3122946.

[19] Alonso, R.S., Prieto, J., García, Ó. et al. "Collaborative learning via social computing" Frontiers Inf Technol Electronic Eng 20, 265–282, 2019, doi: 10.1631/FITEE.1700840.

[20] García, Ó., Tapia, D.I., Alonso, R.S. et al. "Ambient intelligence and collaborative e-learning: a new definition model" J Ambient Intell Human Comput 3, 239–247 ,2012, doi: 10.1007/s12652-011-0050-6

[21] S. Delgado, F. Morán, J. C. S. José and D. Burgos, "Analysis of Students' Behavior Through User Clustering in Online Learning Settings, Based on Self Organizing Maps Neural Networks," in IEEE Access, vol. 9, pp. 132592-132608, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3115024.

[22] G. X. Chen, X. Q. Qu, L. P. Huang, L. Huang, C. Zhou and M. Y. Qiao, "Modeling-Eliciting Activities in an Online Engineering Course for Improving Conceptual Learning, Professional Skill, Interaction," in IEEE Access, vol. 10, pp. 87767-87777, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3199690.

[23] Chung C-C, Lou S-J., "Physical Computing Strategy to Support Students' Coding Literacy: An Educational Experiment with Arduino Boards" Applied Sciences, 11(4):1830, 2021, doi: 10.3390/app11041830.

[24] S. K. Jagatheesaperumal, Q. -V. Pham, R. Ruby, Z. Yang, C. Xu and Z. Zhang, "Explainable AI Over the Internet of Things (IoT): Overview, State-of-the-Art and Future Directions," in IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 3, pp. 2106-2136, 2022, doi: 10.1109/OJCOMS.2022.3215676.

[25] M. Kucab, P. Boryło and P. Chołda, "Hardware-Assisted Static and Runtime Attestation for Cloud Deployments," in IEEE Transactions on Cloud Computing, vol. 11, no. 4, pp. 3750-3765, Oct.-Dec. 2023, doi: 10.1109/TCC.2023.3327290.

[26] S. M. Danish, K. Zhang and H. -A. Jacobsen, "BlockAIM: A Neural Network-Based Intelligent Middleware For Large-Scale IoT Data Placement Decisions," in IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 22, no. 1, pp. 84-99, 1 Jan. 2023, doi: 10.1109/TMC.2021.3071576.

[27] Hercog D, Lerher T, Truntič M, Težak O., "Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices" Sensors 23, no. 15: 6739., 2023, doi: 10.3390/s23156739.

[28] E. Kristiani, C. -T. Yang, C. -Y. Huang, P. -C. Ko and H. Fathoni, "On Construction of Sensors, Edge, and Cloud (iSEC) Framework for Smart System Integration and Applications," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 8, no. 1, pp. 309-319, 1 Jan.1, 2021, doi: 10.1109/JIOT.2020.3004244.

[29] B. Li and W. Dong, "Edge-Centric Programming for IoT Applications with Automatic Code Partitioning," in IEEE Transactions on Computers, vol. 71, no. 10, pp. 2408-2422, 1 Oct. 2022, doi: 10.1109/TC.2021.3129367.

[30] Dhairya Parikh, Raspberry Pi and MQTT Essentials: A complete guide to helping you build innovative full-scale prototype projects using Raspberry Pi and MQTT protocol, Packt Publishing, 2022.

[31] López, J.J.; Lamo, P., "Rapid IoT Prototyping: A Visual Programming Tool and Hardware Solutions for LoRa-Based Devices" Sensors 23, no. 17: 7511, 2023, doi: 10.3390/s23177511.

Diseño del prototipo para un generador de hidrógeno como fuente energética que permita la descarbonización de la Fuerza Aérea Colombiana

Renso Mardu Molno Pulido
Grupo Academico (GRUAC)
ESUFA
Bogotá, Colombia
renso.molano@esufa.edu.co

***Resumen*—El presente estudio tuvo como objetivo la construcción de un prototipo generador de hidrógeno para su utilización como fuente energética en los Equipo Terrestre de Apoyo Aeronáutico de la Fuerza Aérea Colombiana, que permitirá disminuir la generación de CO_2, y así ayudar a la reducción de la contaminación del ambiente y contribuir al proceso de descarbonización de la institución.**

La investigación realizada fue de tipo experimental, debido a que después de generar el diseño del prototipo, se realizaron pruebas para comprobar su eficiencia. El método utilizado para la obtención de hidrógeno fue la electrolisis, utilizando hidróxido de potasio como electrolítico, la concentración de este se controló en relación con la cantidad de agua destilada utilizada donde se sumergía el electrodo. Otra variable controlada fue el voltaje utilizado en la energización del generador de hidrógeno.

En las diferentes pruebas realizadas, se registró que conforme aumentaba la concentración de hidróxido de potasio incrementaba la producción de hidrógeno, pero también se elevaba el consumo de corriente. El mismo comportamiento se presentaba, al aumentar el voltaje suministrado, a mayor voltaje era necesario mayor corriente. Se pudo concluir que con un 19 % de electrolito utilizado los niveles de voltaje fueron entre 3,7 V a 6 V, con un consumo de 12 A a 15 A y una producción de entre 300 a 600 partes por millón de hidrógeno, siendo los niveles más estables.

Palabras claves: Prototipo, generador de hidrógeno, electrolisis, electrolito, voltaje.

I. INTRODUCCIÓN

En la última década los efectos del calentamiento global han ido incrementándose debido a las diversas actividades humanas, propiciando un aumento de las emisiones de gases efecto invernadero, causando un ascenso en la temperatura superficial a nivel global, alrededor de 1,1 °C. Desafortunadamente las emisiones globales de gases de efecto invernadero han seguido aumentando, debido a que persiste el uso de energía no sostenible [1].

Actualmente los combustibles fósiles siguen siendo la fuente primordial de energía a nivel mundial, según el Energy Institute (IE), durante el 2022, los combustibles fósiles siguen representando el 82 % del consumo de energía primaria a nivel mundial [2], por lo que disminuir la dependencia del carbón, el petróleo y el gas es una parte fundamental de diversos programas ambientales establecidos a nivel internacional, como la Agenda 2030 y sus Objetivos de Desarrollo Sostenible y el Acuerdo de París [3].

La disminución de las emisiones de CO_2, requiere que se llevan a cabo acciones en los diferentes sectores económicos, sociales y académicos de una nación. En el caso de Colombia, en el marco de la Agenda 2030 y los ODS, la Fuerza Aérea Colombiana se encuentra comprometida con la necesidad de mejorar diversos procesos operativos y equipos, con la finalidad de ser más sustentables. Lo anterior, forma parte de las medidas que se deben poner en marcha en el sector transporte, tal como lo indica la Ley 2169 de 2021, que impulsa el desarrollo bajo en carbono del país en diferentes sectores económicos, a partir del establecimiento de metas y medidas mínimas que logren una neutralidad y resiliencia climática, y que, en el caso del sector de transporte, se realicen procesos con apoyo de la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (Aerocivil) [4].

Colombia ocupa el lugar 137 de 184 países productores de CO_2, dicho ranking ordena a los países de menos a más contaminantes [5]. Por su ubicación en el ranking, resulta evidente que Colombia requiere tomar acciones encaminadas a la disminución de emisiones de CO_2, por lo que el sector aeronáutico debe hacer un aporte considerable, pues ha crecido de manera constante un 3,3 % desde el 2010, y a pesar de los esfuerzos es uno de los mayores emisores de CO_2 en el sector del transporte [6].

Con base en lo descrito previamente, se han generado líneas de investigación enfocadas en el tema de combustibles a nivel institucional y externo, por lo que se considera pertinente diseñar un prototipo generador de hidrógeno, con el que se analicen las diferentes variables que relacione la cantidad generada de hidrógeno en diferentes condiciones y poder lograr la funcionalidad optima de un motor de combustión interna, a fin de generar un impacto ambiental significativo. Este proyecto es, pionero para la institución, propendiendo inicialmente por el mejoramiento del desempeño de los vehículos que actualmente utilizan motores de combustión interna y que pertenecen al Equipo Terrestre de Apoyo Aeronáutico (ETAA) existentes en las diferentes Unidades Militares Aéreas; y que, de llevarse a cabo permitiría ser aplicado en otros equipos con este tipo de motor.

II. ESTADO DEL ARTE

En la actualidad el hidrógeno se encuentra en una excelente posición en cuanto a energías renovables, es por ello por lo que se considera la energía más prometedora, considerando el cuidado del ambiente en el futuro. En la última década se han desarrollado estudios sobre como influiría un incremento del uso del hidrógeno en la obtención de energía [7].

En los últimos años se han llevado a cabo diferentes investigaciones sobre la obtención del hidrógeno a costos más bajos y con una mayor producción, dentro de este tipo de investigaciones. Al respecto, Delfín Capote (2021) realizó un estudio sobre el balance de una batería de hidrógeno para propulsar un vehículo y así disminuir la emisión del CO_2 del mismo.

Así mismo Sanz (2022), estudiante de León (España), demostró la importancia de la utilización del hidrógeno como factor fundamental en la descarbonización para lograr cumplir las metas acordadas en las diferentes convenciones internacionales para la reducción de gases de efecto invernadero, siendo el hidrógeno verde una alternativa viable hacia el futuro.

Respecto a otras aplicaciones o usos del hidrógeno Cabrera (2022), creó el diseño y armado de un generador de hidrógeno a escala individual, con la finalidad de implementarlo en el motor a gasolina de un vehículo y así reducir las emisiones tanto de CO_2 y de NOx.

En México, se han llevado a cabo otros estudios sobre la generación y aplicaciones del hidrógeno. Una de las investigaciones relacionadas consistió en desarrollar un sistema modular de reacción para evaluar la producción de oxígeno e hidrógeno a partir del proceso de la electrolisis del agua, abordando los diferentes procesos en la obtención del hidrógeno, entre ellos la electrólisis del agua, la cual fue implementada por ser el método más amigable con el ambiente. Se desarrollo entonces un equipo que realizara el proceso de electrólisis del agua, utilizando la reacción de celda seca, con el fin de obtener hidrógeno y oxígeno mediante las celdas solares para realizar el suministro eléctrico y así poder comparar la inversión energética requerida [8].

De la Fuente (2019), elaboró tres propuestas de construcción de un generador para la obtención de hidrógeno, utilizando los mismos materiales, con una diferencia en las placas de acero que fueron utilizadas para lograr la electrolisis que permitiría separar las moléculas de oxígeno e hidrógeno en su forma química.

Por su parte Rojas (2020) desarrolló, diseño y construyo un electrolizador alimentado por corriente continua, implementando instalar una instrumentación adecuada para medir la producción de hidrógeno generado por el electrolizador.

En Honduras también se han realizado investigaciones sobre el hidrógeno, Matamoros (2020) describe la separación del hidrógeno del agua y menciona; que para esto ocurra es necesario aplicar un voltaje que sea capaz de realizar la ruptura del enlace químico, observando que cuanto mayor sea el voltaje aplicado, mejor será la producción de este elemento.

A nivel Latinoamérica, en Ecuador se realizó la construcción e instalación del sistema generador de hidrógeno en un vehículo corsa. Este sistema estaba constituido por celdas, las cuales eran las encargadas de generar el hidrógeno, un tanque utilizado como depósito, con diferente material eléctrico, tuberías y reactivos para aumentar la reacción del agua en el proceso de la electrolisis, después de diversas pruebas apoyadas por la secretaria del Ambiente de la ciudad de Quito, se obtuvieron buenos resultados en las emisiones de gases del vehículo y en el consumo de combustible [9].

En Perú, se implementó un generador de hidrógeno de celda seca al motor a gasolina de un automóvil para disminuir las emisiones de CO_2. Con esta investigación se pretendía mejorar el consumo y la reducción de las emisiones de CO_2 y otros gases, con el uso de hidrógeno en el automóvil a gasolina, para ello se implementó el sistema, teniendo en cuenta que no se pretendía reemplazar totalmente la gasolina, sino enriquecer la mezcla con el suministro del hidrógeno, para lo cual se utilizaron diferentes cantidades de electrolítico para obtener el caudal más eficiente de hidrógeno y así finalmente instalarlo en el motor a gasolina [10].

Del mismo modo en Colombia, Guerrón (2022) elaboró una propuesta de generador de hidrógeno verde para condiciones marinas, el cual considera hacer uso de un electrolizador capaz de funcionar directamente con agua de mar, con la finalidad de tener el mayor aprovechamiento de la energía disponible en regiones costeras, las cuales representarían un alto potencial de energías renovables.

Otra investigación consistió en la elaboración, y diseño y construcción de un prototipo generador de hidrógeno por Microfabricación, con miras al almacenamiento energético solar para aplicaciones térmicas de generación de calor [11].

A un mas también se encontró la investigación de Rojas y Quilaguy (2016), elaboraron un electrolizador alcalino de agua para la producción de hidrógeno, estableciendo la puesta a punto del generador mediante la variación del electrolito KOH, llegando a un 30 % para su punto óptimo de producción de hidrógeno [12].

Son innumerables investigaciones realizadas en los últimos años sobre generadores de hidrógeno a nivel mundial y sus diversas aplicaciones, que van desde un soplete, un fogón de estufa, reemplazo del gas natural y hasta en motores de dos tiempos, utilizados en las bicicletas, Rodríguez y colaboradores (2022) desarrollaron el diseño, construcción y evaluación de un generador de hidrógeno para una bicicleta a motor de dos tiempos, utilizadas como una alternativa de movilidad en la ciudad de Bogotá. El objetivo de esta investigación fue el aprovechamiento de H_2 para generar desarrollos que den una solución en la mitigación del impacto ambiental que hay en la ciudad [13].

III. METODOLOGÍA

A. Diseño y tipo de investigación

El enfoque de la presente investigación es mixto, ya que se emplearon métodos cualitativos y cuantitativos, integrando ambas perspectivas y para alcanzar el objetivo planteado en la investigación.

Es de tipo cualitativo, ya que se llevó a cabo la recopilación, revisión y análisis de fuentes bibliográficas, como artículos concernientes al tema de investigación, tesis relacionadas a la construcción e implementación de generadores de hidrógeno a motores de combustión interna y bases de datos especializadas en los parámetros de las tecnologías más maduras utilizadas en la producción de hidrógeno.

Por otro lado, es cuantitativa, ya que se recogieron datos de una encuesta realizada al personal encargado de los diferentes ETAAS que posee las diferentes Comandos y grupos Aéreos que cuenta la FAC a nivel nacional, la obtención de esta información da una estadística de los equipos ETAAS activos, por otro lado las mediciones de la variable del flujo de hidrógeno para establecer la cantidad de hidrógeno producido por el generador con diferentes niveles de voltaje que sirven para establecer un comportamiento o corroborar la hipótesis planteada en la investigación.

Así mismo, en el presente trabajo se utiliza una investigación experimental, debido que después de generar el diseño de prototipo, se realizaron pruebas para comprobar su eficiencia. Una de estas pruebas implica al electrolítico de hidróxido de potasio – KOH, utilizado en el proceso de

electrolisis, el cual se controló en su concentración en la disolución en el agua destilada, utilizada para sumergir el electrodo. También se controla la variable de voltaje el cual se energiza el generador de hidrógeno. El propósito es analizar en que porcentaje de KOH y voltaje, será el más idóneo para una mejor producción de hidrógeno.

B. Instrumentos de evaluación

En la presente investigación se establecieron tres fases en el diseño del prototipo del generador de hidrógeno en función de los objetivos específicos.

En la primera fase se establecieron los criterios y especificaciones técnicas para la elaboración del generador de hidrógeno, para tal fin se realizó una recolección de información, teniendo como referente el tema de las técnicas de generación de hidrógeno y los diferentes diseños de estos, esta información se obtuvo de los diversos libros, tesis e investigaciones de varios países, encontrados en los repositorios verificados de distintas universidades reconocidas.

En la segunda fase se pudo establecer el método de electrolisis, teniendo en cuenta que es la tecnología más madura y económica. Es el método en el cual, en el electrodo se deben utilizar un material resistente a la corrosión del agua, donde va a permanecer sumergido.

Ya en la tercera fase se realizaron pruebas con el primer prototipo diseñado, este fue realizado en un recipiente de vidrio de 17 cm de alto por 7 cm de ancho. Y el electrodo conformado por 16 arandelas de acero 304L, el cual quedo de 11 cm de largo. Posteriormente se realizó la construcción de un segundo prototipo el cual es de mayor dimensión que el primero. Este será armado en un recipiente en forma de cilindro de 1,6 L, el electrodo de este segundo prototipo consta de 20 láminas de acero 304L en forma hexagonal, con una dimensión del electrodo de 23 cm de largo.

IV. DESARROLLO DE LOS PROTOTIPO

A. Criterios y especificaciones técnicas

Para definir los criterios que debía tener el generador de hidrógeno se indago en 7 libros sobre las teorías del hidrógeno, donde tratan diferentes métodos de producción de hidrógeno, es así como se comprendió cual era el método requerido para la creación del prototipo, el criterio más importante que se tuvo en cuenta fue la tecnología más madura y económica para la producción del hidrógeno. Luego se determinó los materiales que se debían utilizar, los cuales fueran fácil de adquirir, económicos y resistentes a la corrosión del agua.

En cuanto a las especificaciones técnicas se realizó una recolección de información, teniendo como referente el tema de los diferentes diseños de generadores de hidrógeno, esta información se obtuvo de 50 tesis e investigaciones de diferentes países encontrados en los repositorios verificados de distintas universidades reconocidas. Las especificaciones técnicas del generador deben tener ánodo y cátodo, estos se requieren estar totalmente aislados el uno del otro, para evitar accidentes, es por ellos que es importante el cuidado en el ensamble del electrodo. También se establece la solución donde se sumerge el electrodo, la cual está compuesta de agua destilada y el electrolito KOH en una proporción de 30 %. También se debe tener un burbujeador que sirve como sistema de seguridad el cual protege al electrodo de un eventual retroceso de la llama y posible destrucción del prototipo.

B. Identificación y selección de los materiales

Con los criterios y las especificaciones técnicas del prototipo definidos claramente, se estableció el método a utilizar en la generación de hidrógeno y los materiales necesarios para el ensamble del prototipo. Primero se eligió el método de electrolisis, el cual es un proceso que por medio de la electricidad en el agua produce la disociación del hidrógeno y el oxígeno, tal como lo definió Guerrón (2021) en la definición del electrolizador, este método también fue utilizado en la investigación de Fuente (2019). Con lo anterior, se determinó que se debe utilizar un material resistente a la corrosión del agua y el electrolito por la reacción química que se genera, indagando las diferentes investigaciones que utilizaron la electrolisis como método para generar hidrógeno. Así mismo, en este estudio se utilizaron láminas de acero inoxidable 304L, para los dos prototipos que se realizaron, lo cual coincide con lo reportado por Cabrera (2022). En la industria indican que los más eficientes son construidos de platino e iridio, pero estos materiales son demasiado escasos y costosos, lo que nos lleva a uno de los criterios establecidos materiales económicos y de fácil adquisición.

En base a lo anterior, y a lo registrado en diferentes estudios se determinó que el acero inoxidable es el material más idóneo para la construcción del electrodo, por ser un material económico y de fácil obtención. En la construcción del electrodo se utilizaron piezas en forma de arandelas de acero 304L, con un diámetro de 40,95 mm, un grosor de 1,35 mm (Fig. 1) y un peso de 10,6 g, con dos perforaciones para poderlas anclar en una varilla roscada de acero inoxidable de 3/16 pulgadas, tuercas en acero inoxidable para esta varilla, empaques siliconados y termo encogible para aislar el ánodo con el cátodo.

Fig. 1 Medidas de las arandelas de acero inoxidable.

Así mismo, se utilizaron dos recipientes de vidrio de 17 cm de alto por 7 cm de ancho, los cuales contenían el electrodo y el otro el burbujeador. En la tapa de cada uno se les adapto el electrodo, con su respectiva salida y en el burbujeador la entrada del gas que sale del generador y la otra la salida del hidrógeno como se puede observar en la Fig. 2.

Fig. 2 Generador y burbujeador

C. Ensamble del primer generador de hidrógeno.

Teniendo todo seleccionado y organizado se comenzó a armar el electrodo teniendo en cuenta las especificaciones técnicas del ánodo y cátodo. Para ello, se alistaron las arandelas de acero, las varillas de rosca, tuercas, arandelas de acero y los empaques siliconados con el termoencogible, necesarios en el aislamiento del ánodo y cátodo, esta estructura coincide con la utilizada por Cabrera (2022) y Tito (2022), quienes también elaboraron un generador.

Del mismo modo, se colocó la primera arandela en una varilla roscada asegurándola con las arandelas metálicas y tuercas, luego la otra varilla se aísla con una arandela de silicona y el termoencogible en la varilla roscada y se aseguró en el otro orificio de la arandela, quedando una en contacto directo con la varilla y la otra aislada, y así se sigue intercalando cada arandela. Al finalizar, el electrodo se verificó que el ánodo y el cátodo estuvieran totalmente aislados el uno del otro para evitar algún accidente con el prototipo, verificando que cada lamina de acero estuviera aislada intercalada, como se observa en la Fig. 3.

Fig. 3 Estructura y comprobación del aislamiento del ánodo y cátodo

Posteriormente, se procedió a la instalación en la tapa de uno de los recipientes de vidrio seleccionados, se aseguró y se selló bien el electrodo a la tapa para evitar alguna fuga del hidrógeno. Posterior se realizó la salida del gas y se utilizó un conector de conexión rápida para la instalación de la manguera que saldrá el gas al burbujeador previamente ensamblado, el prototipo terminado se observa en la Fig. 4.

Fig. 4 Primer prototipo Generador de Hidrógeno

D. Ensamble del segundo generador de hidrógeno.

En el ensamble del segundo prototipo se realizó el mismo procedimiento que en el primero, con la diferencia que en este prototipo se utilizaron láminas de acero 304L con un tamaño de 48,93 cm, un grosor de 1,21 cm y un peso de 18,6 g, ver Fig. 5.

Fig. 5 Medidas de las piezas de acero del segundo prototipo

El ensamble del electrodo se siguió las mismas recomendaciones del primer prototipo, con el cuidado del ánodo aislado del cátodo, la diferencia de este electrodo fue el tamaño de las láminas, el número de las piezas en este se utilizaron 20 láminas de acero y el largo del electrodo fue de 30 cm a diferencia de los 11 cm del primero. El proceso se puede observar en la Fig. 6.

Fig. 6 Ensamble del segundo electrodo

Una vez que se ensambló el generador, se interconectó con el burbujeador (Fig. 7), similar al del primer prototipo, la diferencia con el anterior, fueron las mangueras de salidas, son de 1/4 de pulgada, mayor calibre que en el primero que se utilizaron 3/16 pulgadas.

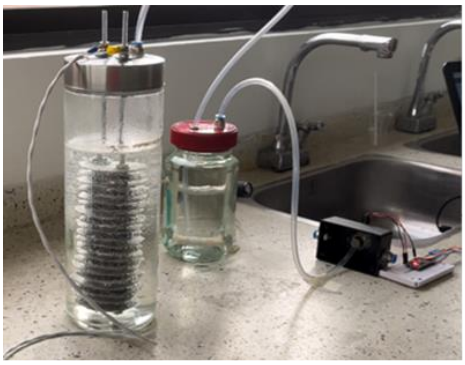


Fig. 7 Segundo prototipo ensamblado

V. RESULTADOS DE LOS DOS PROTOTIPOS GENERADORES DE HIDRÓGENO

Debido al inconveniente de conseguir un medidor de hidrógeno, por los costos de estos. Se indago un procedimiento para poder realizar las mediciones de este gas, se encontró un sensor de hidrógeno, el MQ8, el cual mide con una alta sensibilidad concentraciones de hidrógeno en el aire y detectando concentraciones de 100 a 10000 ppm (partes por millón), este mismo sensor fue utilizado en la investigación de Matamoros, 2020.

Con el sensor MQ8 se hizo un sistema de medición digital (ver Fig. 8), con la ayuda de una placa Arduino nano, un display LCD 2x16 y la comunicación serial con el PC, para lograr adquirir los datos en ppm de producción de hidrógeno y así poder obtener datos y graficas del proceso.

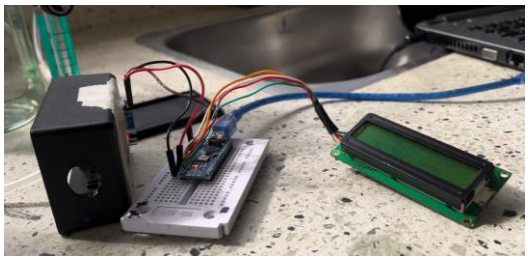


Fig. 8 Medidor digital de Hidrógeno

Debido que se está produciendo un gas se determinó tener en cuenta las condiciones meteorológicas, es por ello por lo que se realizaron las medidas de la altura, presión atmosférica, intensidad de UV, cantidad de CO_2 del aire, las coordenadas de ubicación GPS, Humedad y temperatura del laboratorio donde se realizaron las pruebas a los dos prototipos, por tal motivo se realizó una estación meteorológica para tal fin, la cual se puede observar en la Fig. 9.

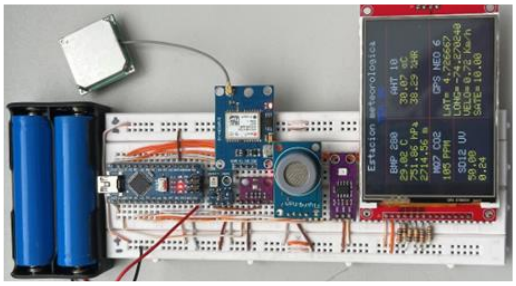


Fig. 9 Estación meteorológica

A. *Pruebas del primer generador de Hidrógeno*

Se determinaron las condiciones iniciales, el generador se alistó con 600 cc de agua destilada y 5,5 g de KOH, se sella y se conecta el medidor digital. La variable del voltaje se modifica en diferentes niveles. Inicialmente las pruebas fueron con 3,7 V, se observó que el medidor digital presento inconvenientes debido que el sensor MQ8 se selló dentro de una caja plástica, dejando una entrada y una salida, pero la concentración del hidrógeno fue muy alta, desbordándose el sensor, lo que bloqueó el sistema de medida. Se procedió a destapar la caja y dejar el sensor destapado y la manguera de la salida del burbujeador, donde sale el hidrógeno, se colocó cerca del sensor y así ya se obtuvo medidas estables. Estos resultados (ver Tabla 1) coinciden, con lo reportado por Matamoros; (2020), quien, al realizar una variación del voltaje, siendo este mayor al aplicarse al electrodo se aumentó la producción de hidrógeno.

TABLA I Resultados de las pruebas con el medidor digital MQ8

Electrolito KOH (g)	Voltaje (v)	Corriente (A)	Presión Atmosférica (hPa)	Temperatura (°C)	Producción (ppm)
5,5	3,7	3,80	753,17	27,52	71 - 87
5,5	6	8,95	753,17	27,52	127 - 265
5,5	9	10,60	753,17	27,52	320 - 420
5,5	12	10,59	753,17	27,52	340 - 420

Con la ayuda de la herramienta que posee el IDE Arduino y a través, de la comunicación serial, se generó la gráfica de los diferentes datos obtenidos (ver Fig. 10).

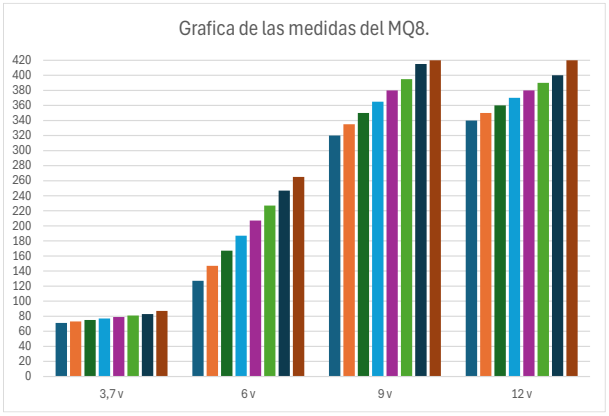


Fig. 10 Grafica de los resultados de las pruebas con el medidor digital MQ8.

Luego de obtener los resultados de las pruebas anteriores, se realizó el aumento del KOH a 11 g de concentración en la solución y se realizaron las pruebas con diferentes voltajes 3,7 V, 6 V, 9 V y 12 V, obteniendo los resultados de la Tabla 2.

TABLA II Resultados de las pruebas con 11 g de KOH

Electrolito KOH (g)	Voltaje (v)	Corriente (A)	Presión Atmosférica (hPa)	Temperatura (°C)	Producción (ppm)
11	3,7	4,67	750,71	28,60	75 - 91
11	6	10,12	750,71	28,60	210 - 365
11	9	10,59	750,71	28,60	300 - 340
11	12	10,60	750,71	28,60	300 - 340

En la Fig. 11 se muestra las curvas características de la producción a las diferentes tensiones sometido el generador.

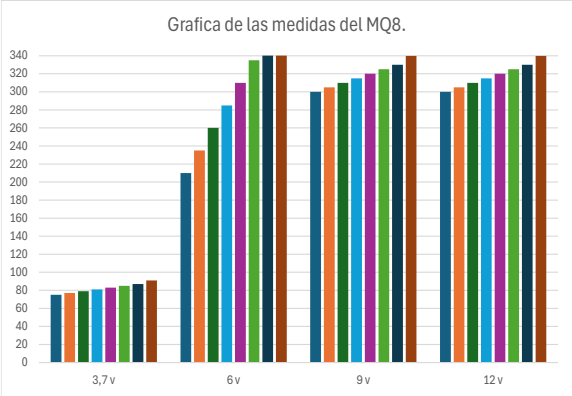


Fig. 11 Grafica de los resultados de las pruebas con 11 g de KOH

Comparando los resultados de la Tabla 1 usando una concentración de 5,5 g de KOH y los resultados de la Tabla 2 con 11 g, se pudo observar que al aumentar el KOH la producción de hidrógeno aumento en un 4,8 %, con 3,7 V. Con una tensión de 6 V el aumento fue 31,8 %, mientras que con 9 V y 12 V se observó que la producción del hidrógeno disminuyó en un 13,5 % con relación a las pruebas con 5,5 g de KOH.

B. Pruebas del segundo generador de Hidrógeno

En este prototipo se determinaron condiciones iniciales, el generador se llenó con 1100 cc de agua destilada y 6 g de KOH, sellándose y conectándose al medidor digital. La variable del voltaje se modifica en diferentes niveles, como se realizó en el primer prototipo, obteniéndose los siguientes resultados y graficas:

TABLA III Resultados de las pruebas con 6 g de KOH

Electrolito KOH (g)	Voltaje (v)	Corriente (A)	Presión Atmosférica (hPa)	Temperatura (°C)	Producción (ppm)
6	3,7	3,52	750,71	28,60	50 - 64
6	6	8,48	750,71	28,60	185 - 220
6	9	10,60	750,71	28,60	120 - 360
6	12	10,62	750,71	28,60	200 - 360

Y en la Fig. 12 se muestra las curvas resultantes de la producción de hidrógeno, a las diferentes tensiones sometido el generador de hidrógeno.

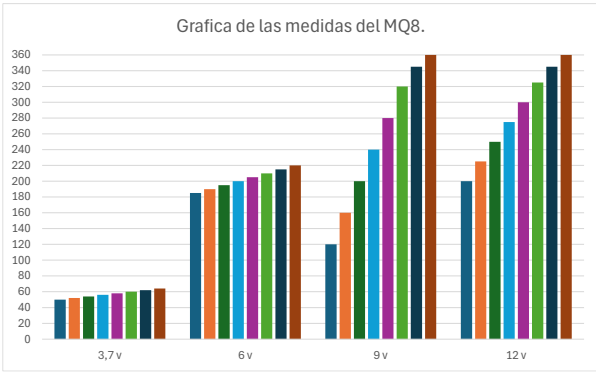


Fig. 12 Grafica de los resultados de las pruebas con 6 g de KOH

Con base en los resultados de la Tabla 1, utilizando 5,5 g de KOH y los resultados de la Tabla 3, utilizando 6 g, se puede observar que al tener concentraciones de KOH similares, pero aumentando el tamaño del electrodo (11 cm a 30 cm), la producción de hidrógeno a 3,7 V disminuyó en un 27,8 %, mientras que con una tensión de 6 V disminuyó 3,21 %, con 9 V la disminución fue del 35,13 % y con 12 V la producción del hidrógeno disminuyo en un 26,32 %.

De acuerdo con los resultados obtenidos de las pruebas realizadas anteriormente, se dispuso el incremento del electrolito un 9 % (100 g) con relación a la cantidad de agua utilizada en el generador (1100 cc). Las con condiciones ambientales se mantuvieron iguales a los ensayos anteriores, realizándolas incluso con dos fuentes de voltaje DC. Al llevar a cabo estas últimas pruebas, se pudo determinar que la corriente, es una variable que influye notoriamente en la producción de hidrógeno, incluso más que el mismo voltaje aplicado al generador.

Posteriormente, se realizó el aumento del KOH a 210 g, un 19 % de concentración con respecto a 1100 g de agua destilada del generador, este aumento se realizó al igual que Cabanillas (2022), quien en sus pruebas obtuvo mejores resultados con un 14 % de electrolito. No obstante, el inconveniente en el aumento del electrolito fue que el generador incrementó su temperatura, por ende también se tuvo que elevar el corriente mínimo 12 A a 3,7 V. A medida que se aumentó el voltaje, se incrementó el consumo de corriente del generador a 20 A. Sin embargo, en cuestión de producción de hidrógeno, esta se aumentó considerablemente, con 3,7 V a 300 ppm y con 6 V llego a 600 ppm. Con mayor voltaje se evidencio que la producción se mantenía entre 500 a 600 ppm, lo que implica que mantener un voltaje de entre 3,7 V y 6 V es lo ideal en la producción máxima del generador.

VI. CONCLUSIONES

Se logro establecer los criterios y especificaciones técnicas para la elaboración del generador de hidrógeno, con la ayuda de las diferentes investigaciones realizadas sobre los dos tipos de generadores utilizados para producir hidrógeno e implementarlos en motores de combustión interna, como lo son el generador de electrodo seco y el electrodo húmedo, este último el utilizado en esta investigación.

Se identificó y selecciono los materiales idóneos para la construcción de los prototipos generador de hidrógeno, concluyendo la utilización como material principal el acero inoxidable 304L, en la contrición del electrodo. Lo anterior debido que es un material resistente a la corrosión que se generó en el proceso, otra ventaja fue su fácil adquisición, así mismo es el material más económico, a comparación del níquel y platino que son demasiado costosos y de difícil adquisición.

En las diferentes pruebas realizadas a los prototipos, se pudo concluir que el diámetro de las placas utilizadas en la construcción del electrodo es una variable importante ya que a mayor tamaño de estas la producción del hidrógeno varia, y la cantidad ideal de electrolito KOH es fundamental en el proceso de electrolisis utilizado para la producción del hidrógeno. También se pudo observar que a mayor porcentaje de electrolito, mayor es el consumo de corriente del generador, por lo tanto se aumenta la temperatura del generador y la producción de hidrógeno aumenta.

REFERENCIAS

[1] IPCC, «Climate Change 2023,» Interlaken, Suiza, 2023.

[2] Sputniknews, «Estamos a 200 años del abandono total de las fuentes de energía fósiles,» Agosto 11 2023. [En línea]. Available:

https://sputniknews.lat/20230811/estamos-a-200-anos-del-abandono-total-de-las-fuentes-de-energia-fosiles-1142519469.html#:~:text=Un%20an%C3%A1lisis%20estad%C3%ADstico%20anual%20publicado,gas%20natural%20y%20el%20carb%C3%B3n.

[3] S. Fleming, «Transición Energética,» 21 Abril 2021. [En línea]. Available: https://www.weforum.org/agenda/2021/04/energy-transition-race-which-countries-leading/.

[4] El Congreso de Colombia, «Ley 2169 de 2021,» 23 julio 2023. [En línea]. Available: http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_2169_2021.html.

[5] Datosmacros, «Emisiones de CO2 Colombia 2021,» 2021. [En línea]. Available: https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2/colombia#:~:text=Colombia%20sube%20sus%20emisiones%20de%20CO2&text=Las%20emisiones%20de%20CO2%20en,de%20menos%20a%20m%C3%A1s%20contaminantes.

[6] D. M. C. Farigua, «El transporte aéreo internacional en Colombia de 1992 a 2019: Incidencia en las emisiones de CO2 y su alcance en el Objetivo de Desarrollo Sostenible No.13 Acción por el clima.,» 2021. [En línea]. Available: https://repositorio.unicolmayor.edu.co/bitstream/handle/unicolmayor/3470/AS004%20El%20transporte%20a%c3%a9reo%20internacional%20en%20Colombia%20trabajo%20final.pdf?sequence=5&isAllowed=y.

[7] H. Rodríguez, «Propiedades del hidrógeno (H),» 16 Septiembre 2022. [En línea]. Available: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-hidrogeno-h_18653.

[8] A. Borja, «Desarrollo de un sistema modular de reacción para el estudio de la producción de oxígeno e hidrógeno a partir de la electrólisis del agua,» febrero 2018. [En línea]. Available: https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/57cb446f-9dee-41d7-8974-086506122c53.

[9] J. B. Tito, «Implementación de un generador de hidrógeno de un sistema dual fuel hidrógeno / gasolina de un vehículo Corsa Wind.,» junio 2022. [En línea]. Available: http://dspace.istvidanueva.edu.ec/xmlui/handle/123456789/245.

[10] J. M. Cabanillas, «Implementación de un generador de hidrógeno de celda seca al motor de un automóvil a gasolina para mejorar la performance energética ambiental,» 2022. [En línea]. Available: https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/6575.

[11] C. A. N. Lozano y M. A. P. Torres, «Diseño y construcción de prototipo generador de hidrógeno por microfabricación,» pp. 170-173, 16 marzo 2017.

[12] A. M. Roja y M. E. Quilaguy, «Desarrollo de un prototipo para la producción de Hidrógeno a partir de electrolisis,» 2016. [En línea]. Available: https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/16854/Generaci%C3%B3n_creativa_2016-185-190.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

[13] Y. L. R. Ramírez, S. A. S. Suárez y D. S. S. Moreno, «Diseño, construcción y evaluación de un generador de hidrógeno adaptado a un motor de dos (2) tiempos en una bicicleta en la ciudad de Bogotá,» *Revista Ingeniería, Matemáticas y Ciencias de la Información*, vol. 9, nº 18, pp. 65-88, 2022.

Localización espacial mediante intensimetría acústica para aplicaciones de audio binaural

Raúl Martín Ferrer
Dpto. de Ingeniería Eléctrica
EUPT, Universidad de Zaragoza
Teruel, España
ramar@unizar.es

Guillermo Palacios Navarro
Dpto. de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
EUPT, Universidad de Zaragoza
Teruel, España
palanava@unizar.es

Pedro Ramos Lorente
Dpto. de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
EUPT, Universidad de Zaragoza
Teruel, España
pramos@unizar.es

***Abstract*—En este trabajo se propone emplear técnicas de intensimetría acústica para identificar la dirección de llegada del sonido a una persona que utiliza audífono. Conocida la dirección de la señal incidente, se utilizará un modelo basado en funciones de transferencia para generar audio binaural de modo que la experiencia de escucha sea más realista. En un entorno cerrado, la reflexión del sonido en las paredes afecta significativamente a la percepción tridimensional del audio, lo que puede reducir la calidad del sonido binaural. En este trabajo también se pretende modelar, analizar y proponer soluciones a esta problemática.**

Keywords—Intensimetría acústica, sonido binaural, HRTF, reflexiones en recintos cerrados

I. INTRODUCCIÓN

La generación de audio binaural es una técnica de procesado de señales de audio que utiliza dos micrófonos para generar en el oyente una experiencia auditiva envolvente y realista [1]. El sonido se reproduce de tal manera que simula la percepción de la ubicación espacial de la fuente para que la sensación de inmersión sea mayor. Esta técnica es especialmente útil en aplicaciones de realidad virtual y en sistemas de audio de alta calidad, donde se busca ofrecer una experiencia de audio más real.

El sonido binaural también puede utilizarse para ayudar a personas con discapacidad auditiva. En este caso, añadir información de la ubicación del origen del sonido a la señal de audio que escucha el sujeto le permite distinguir la dirección de la cual proviene la señal [2]. Uno de los beneficios principales del uso del audio binaural en personas con discapacidad auditiva es que, al permitirles percibir la localización espacial de las fuentes de sonido, se mejora su orientación y su seguridad.

En esta tesis doctoral, se propone emplear técnicas de intensimetría acústica [3]-[7] para localizar la dirección de llegada del audio respecto a la persona que utiliza audífonos. De un modo natural, la localización de la fuente mejora con movimientos intuitivos del cuerpo, y especialmente, de la cabeza [8]. La información de la dirección incidente se empleará para entregar a esta persona sonido binaural. Para ello, se utilizará un modelo basado en funciones de transferencia para procesar el sonido de modo que la experiencia de escucha sea más realista.

HRTF es el acrónimo en inglés de "Head-Related Transfer Function" – en español Función de Transferencia Relativa a la Cabeza– [9], [10]. Las HRTFs describen cómo las características físicas de la cabeza, los oídos y el torso influyen en la forma en que las ondas sonoras se propagan hacia el tímpano, lo que afecta a la percepción de la dirección y la ubicación de las fuentes sonoras en el espacio tridimensional; una HRTF es una función que describe cómo el sonido se transforma al interferir con el cuerpo de una persona antes de llegar al tímpano. La HRTF es un aspecto importante de la percepción espacial del sonido y se utiliza en la síntesis binaural para crear un efecto tridimensional de sonido en los auriculares: p. ej. en sistemas de realidad virtual, videojuegos y aplicaciones de audio inmersivo.

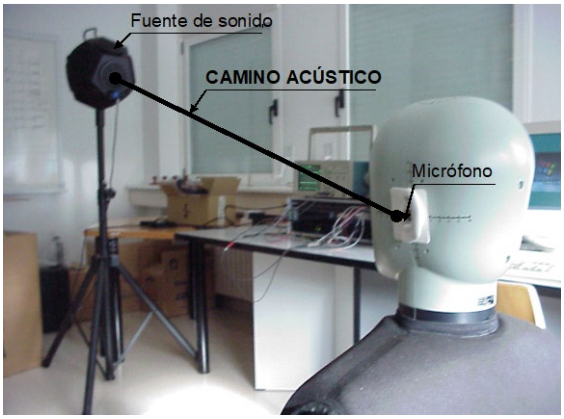


Fig. 1. Fuente onmidireccional y simulador de torso y cabeza.

Para elegir la HRTF que mejor modela el contexto acústico del audio recibido, proponemos el uso de técnicas de intensimetría. Existen distintas técnicas para obtener la intensidad acústica y diferentes configuraciones de sondas que queremos evaluar. Todas ellas se basan en el uso de micrófonos, cuyo rango de coste económico y prestaciones es inmenso. Aunque contamos con micrófonos de altas prestaciones, buscamos evaluar alternativas más económicas con comportamiento correcto [11]. Para lograr que un oyente experimente una auténtica percepción espacial es necesario personalizar las HRTF a partir de las funciones genéricas. Esta línea de investigación puede basarse en el uso de medidas antropométricas para ajustar algunos parámetros [12], [13], en una síntesis total de las funciones de transferencia [14] o, en mallas 3D [15].

El problema de añadir información espacial a la señal de audio parece sencillo en ausencia de reflexiones. Sin embargo, en un entorno cerrado, como una sala, la reflexión del sonido en las paredes puede afectar significativamente a la percepción tridimensional del audio, lo que puede reducir la calidad del sonido binaural. Es por eso que este trabajo también se pretende analizar la problemática de las reflexiones en entornos cerrados, proponiendo soluciones que permitan mejorar la calidad del audio binaural.

El método de las imágenes y el modelo de rayos son dos técnicas comúnmente utilizadas para caracterizar la respuesta

acústica de una sala [16], [17]. La respuesta impulsional de un recinto (RIR) caracteriza el camino acústico entre la fuente y el oyente en un entorno cerrado. La Fig. 1 muestra el camino acústico en una sala entre una fuente y un simulador de torso y cabeza. La RIR depende de la ubicación de ambos elementos, fuente y oyente. El oyente escucha en primer lugar el sonido directo. A continuación, recibe las reflexiones tempranas (especulares y difusas). Por último, recibe las reflexiones tardías o colas de reverberación, que son irrelevantes para localizar la fuente, ya que tienen un comportamiento aleatorio independiente de la ubicación del oyente, pero que son importantes para percibir las dimensiones y la calidad acústica del recinto y la distancia entre oyente y fuente.

El método de las imágenes se basa en la idea de que el sonido se refleja en las paredes, el techo y el suelo de una sala y crea imágenes virtuales de las fuentes sonoras. Estas imágenes son equivalentes a las fuentes reales y pueden utilizarse para calcular la distribución del sonido en la sala. La técnica de las imágenes puede utilizarse para predecir la respuesta acústica de una sala cuando se conoce la ubicación de las fuentes sonoras y de los oyentes.

Por otro lado, el modelo de rayos se basa en la idea de que el sonido viaja en línea recta desde la fuente sonora hasta el receptor, pero puede reflejarse y atenuarse en las superficies de la sala. El modelo de rayos simula el comportamiento del sonido en la sala utilizando rayos de sonido que se propagan desde la fuente sonora y se reflejan en las superficies de la sala hasta alcanzar el receptor. Este modelo puede proporcionar información detallada sobre la distribución del sonido en la sala, incluyendo la intensidad del sonido y los tiempos de reverberación. La Fig, 2 muestra esquemáticamente en dos dimensiones el empleo de estos métodos para el caso de dos trayectorias entre los puntos P y D de 2 y 3 reflexiones.

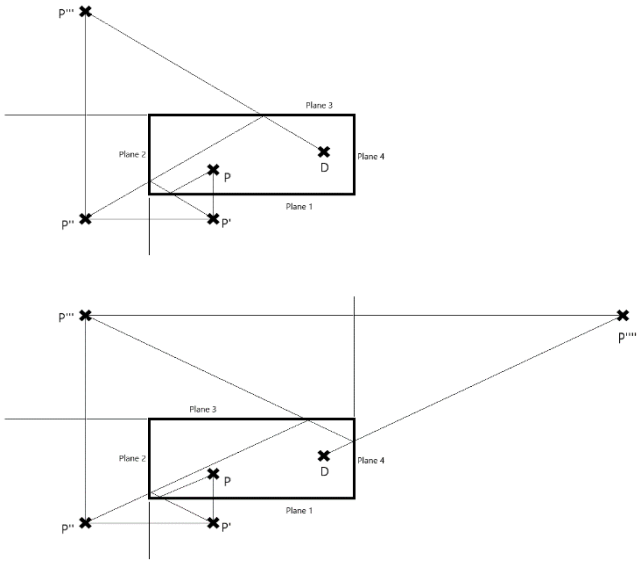


Fig. 2. Metodo de las imágenes. Trayectorias calculadas con 2 y 3 reflexiones.

En este trabajo proponemos una extensión del método de las imágenes. Por un lado, se busca una formulación matricial del método y una organización de los datos que permita estructurar de un modo recursivo la programación. Por otro lado, buscamos generalizar el método incluyendo superficies curvas (cuadráticas) muy comunes en algunos recintos. Para ello plantearemos las ecuaciones que deben cumplir los rayos según las leyes básicas de la reflexión y las resolveremos por métodos numéricos. Buscaremos optimizar la solución de estos problemas con la ordenación más conveniente de las diferentes combinaciones de superficies que intervienen y con la programación computacionalmente más eficiente de la estrategia de cálculo.

Para modelar el efecto del movimiento de las fuentes y los oyentes recurriremos al concepto de tiempo de retardo tal como aparece reflejado en la formulación de Liénard-Wiechert del modo de propagación del sonido [18], [19]. El tiempo de retardo determina el instante en el que la fuente emitió una perturbación de presión que en el momento actual está alcanzando la posición del oyente. Trabajar con señales en tiempo discreto exige realizar interpolaciones para precisar los instantes en los que se producen los eventos de emisión y escucha con ambos elementos en movimiento.

II. JUSTIFICACIÓN

El procesado de audio binaural es una técnica cada vez más utilizada en aplicaciones de realidad virtual, juegos, cine, televisión y música. Sin embargo, ya hemos indicado que en entornos cerrados la presencia de paredes y otros objetos puede afectar significativamente a la calidad del audio binaural debido a las reflexiones del sonido. Para mejorar la calidad de la experiencia de audio binaural en entornos cerrados, es necesario estudiar y comprender mejor la propagación del sonido y las reflexiones que se producen en las paredes.

En esta tesis doctoral, se propone analizar la propagación del sonido en entornos cerrados mediante el uso de técnicas de intensimetría acústica y funciones de transferencia de la cabeza (HRTF) para procesar el audio. Además, se investigará la problemática de las reflexiones en salas con un número grande de paredes y formas no necesariamente planas, lo que permitirá hacer contribuciones al modelo de las imágenes y al modelo de rayos. También se analizarán los casos de múltiples reflexiones, proponiendo soluciones que permitan mejorar la calidad del sonido binaural.

En resumen, esta tesis busca hacer contribuciones significativas al diseño y la mejora de los sistemas de audio binaural en entornos cerrados, lo que permitirá mejorar la calidad de la experiencia auditiva para una amplia variedad de aplicaciones, desde la música y el cine hasta la realidad virtual y los videojuegos, y especialmente para mejorar las condiciones de escucha de personas con discapacidad auditiva que utilicen audífonos.

III. OBJETIVOS

El objetivo final de la tesis puede formularse en los siguientes términos: mejorar las condiciones de escucha de personas con déficit auditivo mediante la incorporación de información espacial a la señal que llega a un oyente a través de un audífono.

Para la consecución de este objetivo final conviene marcar objetivos intermedios que sirvan de guía. Los hitos que se enumeran a continuación marcan puntos específicos en el cronograma del trabajo de investigación:

A. Modelar y simular un espacio acústico

Creado por fuentes en movimiento y las correspondientes señales captadas por oyentes, también en movimiento, a través de la gestión de eventos simultáneos, definición de estructuras de datos adecuadas y parametrización del sistema.

B. Determinar la dirección incidente de un campo acústico en el espacio libre mediante técnicas de intensimetría acústica.

- Llevar a cabo una simulación basada en una sonda triaxial (seis micrófonos formando, dos a dos, tres sondas de intensidad alineadas en tres direcciones ortogonales) para determinar la dirección con distintas técnicas de intensimetría:

1) Método de aproximación de diferencias finitas (método directo).

2) Método con análisis FFT (método indirecto).

- Comparar los resultados con los obtenidos simulando una sonda de intensidad de cuatro micrófonos con configuración tetraédrica. La Fig. 3 muestra la configuración de una sonda tetraédrica y una triaxial.

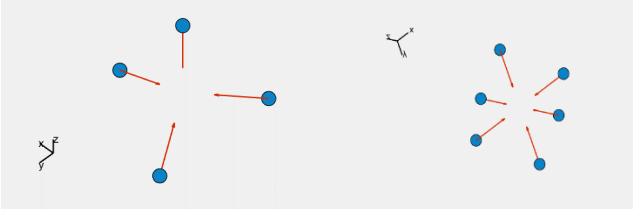


Fig. 3. Distintas configuraciones: (a) sonda tetraédrica y (b) sonda triaxial.

C. Determinar la dirección incidente de un campo acústico en un recinto cerrado.

- Modelado de un recinto cerrado. Revisión del método de las imágenes y modelo de rayos.
- Generalización de estos métodos. Aportaciones: ilimitar número de planos, incluir superficies no planas, formulación matricial de la estrategia y programación recursiva.

1) Formulación matricial del método de las imágenes para superficies planas.

2) Formulación del problema de búsqueda de los puntos de reflexión en superficies no planas.

- Compensar el efecto del entorno acústico. Adaptar las técnicas de intensimetría a un recinto reverberante. NOTA: es un punto clave, de dificultad. El modelado estadístico de las reflexiones más tardías puede dificultar el uso de intensimetría.

D. Separar fuentes en función de la dirección de incidencia.

- Revisión de técnicas clásicas.
- Propuestas en el contexto del proyecto.

E. Llevar a cabo el filtrado de la señal de audio con funciones de transferencia HRTF.

- Revisión de funciones de transferencia HRTF.
- Validación de funciones de transferencia HRTF medidas en el laboratorio.
- Revisión y propuestas de técnicas de interpolación de HRTF.

F. Diseñar una sonda de intensidad acústica.

Analizar y comparar dos configuraciones distintas. Comparar prestaciones mediante simulación. La parte hardware va a estar sujeta a los resultados previos simulados.

- Análisis de prestaciones de micrófonos de bajo coste.
- Si procede, diseño de la sonda. Análisis de configuraciones.
- Eventualmente, implementación del prototipo.

G. Diseñar y analizar un prototipo del sistema completo.

Integración de resultados en el diseño de un prototipo de audífono con sensación espacial.

IV. Metodología

La metodología de trabajo está orientada a la consecución de los objetivos parciales enumerados en la sección III. Posteriormente evaluaremos la calidad de los resultados para certificar la validez de la aportación o, en su caso, replantear la estrategia. Los pasos a seguir para abordar con expectativas de éxito cada uno de ellos son:

1) Planteamiento del problema descrito por el objetivo parcial: Refinar y estructurar formalmente la tarea de investigación.

2) Revisión del marco teórico de la investigación: Considerando el conocimiento previamente construido, se deben buscar y organizar las referencias bibliográficas contrastadas válidas para el encuadre del objetivo. Debe también valorarse el alcance de la aportación a desarrollar en el contexto del estado del arte.

3) Revisión de la experiencia previa del grupo de investigación en el ámbito de trabajo del objetivo parcial.

4) Decidir si el experimento se va abordar mediante simulación, instrumentación real o combinando ambos métodos.

5) En el caso de una actividad con instrumentación real: selección del emplazamiento del experimento: No disponer de una cámara anecoica condiciona el trabajo.

6) Diseño de la investigación: Bosquejo del conjunto de los componentes. Elección de los instrumentos, variables y parámetros.

7) Etapa de recopilación de la información: Toma de datos variando parámetros para valorar alternativas y validar resultados.

8) Procesado de la información para su posterior análisis: Análisis estadístico de los resultados. Visualización de las prestaciones de la estrategia desarrollada desde diferentes perspectivas.

9) Confección final de los resultados de la investigación: Incluir comparativas con alternativas ya conocidas.

10) Creación del informe final desde una perspectiva global: Validación del proceso. ¿Puede darse por cumplido el objetivo parcial planteado?, ¿hasta qué grado?, ¿supone un avance para el avance del objetivo global?, ¿hay que iterar total o parcialmente el proceso?

V. Resultados Previos

Como ya se ha indicado, el doctorando y los directores de la tesis tienen experiencia de trabajo conjunto en campos relacionados con el tema de tesis. Se describen a continuación alguno de estos ámbitos:

A. Propagación de sonido en campo libre. Solución de la ecuación de ondas con fuentes en movimiento.

En trabajos previos se ha llevado a cabo la recreación simulada de un espacio tridimensional en el que existe un campo acústico generado por distintas fuentes de sonido en movimiento, con trayectorias definidas. Las fuentes emiten según un modelo de propagación de ondas esféricas en campo libre. En este escenario, resulta fundamental el estudio tanto del "tiempo de retardo" entre fuente y oyente como de la atenuación de la señal con la distancia. Si fuente y oyente están en movimiento, debemos conocer la distancia entre la fuente (en el tiempo de retardo, cuando se emitió) y el oyente (en el tiempo de interés), el vector velocidad de la fuente en el tiempo de retardo y gestionar correctamente el remuestreo / interpolación de las señales para trabajar en una base de tiempos común a fuente y oyente.

El tiempo de retardo determina el instante en el que la fuente, situada en $\boldsymbol{x}'$, emitió una perturbación de presión y ésta llega al receptor situado en el instante t en la posición $\boldsymbol{x}$:

$$t_r(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{x}', t) = t - |\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}'|/c \tag{1}$$

Conocer el campo acústico creado por una fuente en movimiento, requiere resolver la ecuación de onda no homogénea siguiente:

$$\nabla^2\psi - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = -4\pi\, s(\boldsymbol{x}, t) \tag{2}$$

donde c es la velocidad del sonido y s representa a la fuente. La ecuación de ondas puede resolverse por el método de la función de Green [18], [19], siendo la siguiente expresión solución de dicha ecuación:

$$\psi(\boldsymbol{x}, t) = \int \frac{s(\boldsymbol{x}', t_r)}{|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}'|} d^3x' \tag{3}$$

Una fuente que emita una perturbación constante de frecuencia f para $t > 0$, desplazándose según $\boldsymbol{x}_s(t)$, podrá ser descrita con la siguiente función [18]:

$$s(\boldsymbol{x}, t) = A\delta\big(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_s(t)\big)e^{-i\omega t}\Theta(t) \tag{4}$$

donde $\omega = 2\pi f$, A es una constante que representa la amplitud de la perturbación generada y $\Theta(t) = 0$ para $t \leq 0$ y 1 para $t > 0$ es la función escalón unitario que sirve para indicar que la fuente sólo emite para $t > 0$. De esta manera, calculando la integral de volumen, obtenemos la solución de la ecuación de onda para un campo creado por una fuente en movimiento, en la forma de los potenciales de Liénard-Wiechert:

$$\psi(\boldsymbol{x}, t) = \frac{Ae^{i\omega t_r}}{|\boldsymbol{x}(t) - \boldsymbol{x}_s(t_r)|[1 - \boldsymbol{\beta}_s(t_r)\cdot\hat{\boldsymbol{n}}(t_r)]}\Theta(t_r), \tag{5}$$

donde $\boldsymbol{\beta}_s(t_r) = \boldsymbol{v}_s(t_r)/c$, $\boldsymbol{v}_s(t_r) = \dot{\boldsymbol{x}}_s(t_r)$ es la velocidad de la fuente en el instante de tiempo de retardo, y $\hat{\boldsymbol{n}}(t_r) = \big(\boldsymbol{x}(t) - \boldsymbol{x}_s(t_r)\big)/|\boldsymbol{x}(t) - \boldsymbol{x}_s(t_r)|$ es el vector unitario en la dirección y sentido entre la posición de la fuente en t_r y la posición de interés en el instante t.

De este modo se resumen los principios teóricos con los que se ha modelado el mecanismo de propagación de sonido entre fuentes y oyentes en movimiento bajo condiciones de espacio libre. Los detalles de la programación de estos principios quedan fuera del objeto de este trabajo, pero pueden consultarse en [18]- [20].

B. Intensidad sonora. Técnicas de intensimetría.

Para determinar la potencia acústica emitida por una fuente se utiliza como dato de partida la medida de la intensidad sonora en la vecindad de la fuente. La intensidad sonora es una magnitud vectorial que describe la cantidad y la dirección del flujo neto de energía en un punto de una superficie determinada. Este vector es perpendicular a dicha superficie. Su carácter vectorial le atribuye ventajas respecto a otras medidas escalares como la presión acústica en aplicaciones como la localización de fuentes o la determinación de la potencia acústica emitida.

El tipo de sonda más frecuentemente usada para medir la intensidad es la sonda p-p. que consta de dos micrófonos enfrentados y separados por una pequeña distancia. El doctorando tiene experiencia previa en pruebas y ensayos llevados a cabo mediante simulación [21]. Para desarrollar los experimentos, se emplearon las señales adquiridas con una sonda de intensidad sonora construida en el laboratorio de la EUPT.

La medida de la intensidad acústica implica la determinación simultánea de la presión acústica y la velocidad de la partícula en un mismo punto del campo acústico. Por lo tanto, la intensidad acústica instantánea en un punto en la dirección $\vec{n}$ puede expresarse como:

$$i_n(t) = p(t)\, u_n(t) \tag{6}$$

donde $p(t)$ es la presión acústica y $u_n(t)$ la velocidad de la partícula en dicha dirección. Estas magnitudes pueden obtenerse directa o indirectamente. La presión se puede obtener fácilmente mediante la utilización de micrófonos, siendo más complicado la obtención de la velocidad de la partícula con una precisión aceptable. Obtendremos tanto la presión como la velocidad de la partícula en un mismo punto de forma indirecta a través de dos micrófonos separados una distancia fija tal y como se representa en este esquema de una sonda de presión p-p (Fig. 4) y en el prototipo desarrollado:

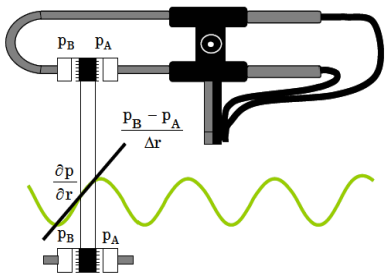


Fig. 4. Esquema de sonda de presión p-p.

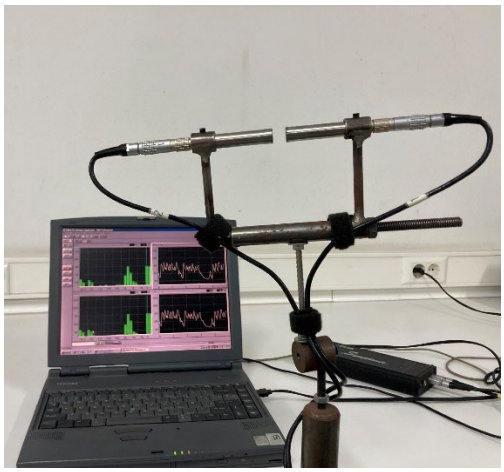


Fig. 5. Prototipo de sonda de presión p-p.

Expresando la presión en el centro de los micrófonos como

$$p(t) = \frac{p_A(t)+p_B(t)}{2} \quad (7)$$

siendo $p_A(t)$ y $p_B(t)$ la presión acústica medida por los dos micrófonos enfrentados A y B.

Por otro lado, podemos obtener una aproximación de la velocidad de la partícula a partir del gradiente de presión

$$u_n(t) = -\frac{1}{\rho \Delta_r} \int_{-\infty}^{t} [p_B(t') - p_A(t')]\, dt' \quad (8)$$

siendo ρ la densidad del aire y Δ_r la separación fija entre los micrófonos.

En trabajos anteriores [21] se desarrollaron con éxito dos métodos diferente de cálculo de la intensidad sonora:

(a) en el dominio temporal, mediante integración en el tiempo de promediado *T*:

$$I_n = \frac{1}{2\rho\Delta_r T} \int_{t-T}^{t} \left\{ [p_A(t') + p_B(t')] \left(\int_{-\infty}^{t'} [p_B(t'') - p_A(t'')] dt'' \right) \right\} dt' \quad (9)$$

(b) en el dominio frecuencial (f), mediante el método del espectro cruzado:

$$I_n == -\frac{1}{2\pi\rho\Delta_r} \int_{0}^{\infty} \frac{Im[G_{p_A p_B}(f)]}{f} df \quad (10)$$

siendo $G_{p_A p_B}(f)$ el espectro cruzado de las señales $p_A(t)$ y $p_B(t)$.

El simulador programado, que compara los resultados de estimación de la intensidad por ambos métodos y los representa por octavas o tercios de octava es el punto de partida de futuros trabajos que nos permitirán, por ejemplo, predecir errores o alteraciones que se produzcan en el proceso de medida y de este modo detectar en fase de simulación perturbaciones del método de caracterización de la fuente.

Se han iniciado las pruebas con nuevas configuraciones de sondas, buscando la identificación de la dirección de la fuente emisora con el menor número de recursos posible.

C. Funciones de transferencia relacionadas con la cabeza (HRTF).

Las HRTF (Head-Related Transfer Functions), término que en español puede traducirse como funciones de transferencia relacionadas con la cabeza modelizan el contexto acústico –especialmente el efecto del pabellón auditivo, la cabeza, los hombros y el torso– añadiendo a la señal de audio recibida en la ubicación del oído información espacial relativa a la posición de la fuente con respecto al sujeto. Se basan en estimar el efecto de reflexión que los pliegues de la oreja, y el resto de elementos corporales generan en las señales acústicas que alcanzan la vecindad del oyente y que el ser humano ha aprendido a interpretar para localizar la dirección de llegada del sonido.

Las HRTF están indexadas para distintos valores de azimut y elevación, que junto al radio permiten el barrido del espacio en coordenadas esféricas. El valor del radio se encuentra normalizado para los diferentes conjuntos de HRTF. En caso de querer modificarlo, debemos atenuar la señal si aumenta el radio o amplificarla si se reduce.

En trabajos llevados a cabo en el contexto de proyectos anteriores hemos implementado diferentes estrategias para estimar y aplicar funciones de transferencia HRTF [20] usando el maniquí de la Fig. 6. En resumen, hemos trabajado con técnicas de identificación de planta basadas en algoritmos adaptativos, con algoritmos de deconvolución basados en el cepstrum complejo. También hemos trabajado con las HRTF estimadas por otros grupos de trabajo (KEMAR, Knowles Electronics Mannequin for Acoustics Research [9], [10]) y con las que nos ofrecen la librería Audio Toolbox de Matlab.

Distintos trabajos exitosos de nuestro grupo en el campo de la cancelación de ruido, de eco o desarrollo de simuladores refrendan la validez de nuestras estimaciones de funciones de transferencia. Sin embargo, a veces conviene utilizar HRTF obtenidas en mejores condiciones (en cámaras anecoicas donde no se producen reflexiones) cuando el foco del trabajo se pone en el efecto de la dirección de llegada de las señales acústicas. Además de las ya mencionadas funciones de transferencia KEMAR existen otras bases de datos alternativas que ofrecen HRTF. La base de datos CIPIC (Center for Image Processing and Integrated Computing University of California) [22] es una base de datos de dominio público, con mediciones HRTF de alta resolución espacial de 45 sujetos diferentes. Esta base de datos ordena las distintas funciones de transferencia según la persona y distingue entre 50 valores distintos de elevación y 25 en acimut, abarcando desde los -45 a los 275 grados, y de los -80 a los 80 grados respectivamente. Una de las características de esta base de datos es que se encuentra disponible en lenguaje Matlab. La base de datos MIT también es de dominio público y ofrece mediciones HRTF de alta resolución. Incluye 710 posiciones diferentes del espacio recorriendo elevaciones desde los -40 hasta los 90 grados. Es importante destacar que para cada valor de elevación hay un rango distinto de valores de acimut.

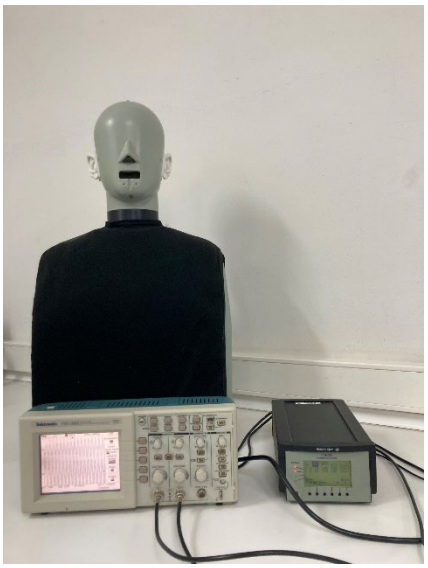


Fig. 6. Simulador de torso y cabeza en el laboratorio.

VI. Resultados Esperados

Los resultados esperados pueden exponerse en base a la consecución de los objetivos marcados en la sección III. En lo referente a la tarea global de la tesis, podemos resumir los resultados esperados indicando lo siguiente: a partir de la dirección de llegada del audio que obtenemos mediante técnicas de intensimetría, seleccionamos las funciones de transferencia HRTF de la dirección más próxima. Si no disponemos de las funciones de transferencia de la dirección obtenida (dada por una elevación y un azimut) tendremos que interpolar entre aquellas HRTF de direcciones próximas a la obtenida de las que si disponemos de HRTF en nuestro repertorio. El audio binaural así obtenido incluye información espacial que mejora la percepción del oyente.

Nuestra experiencia y los trabajos previos del grupo en este ámbito de trabajo sugieren que para la obtención de este resultado global debemos superar varios hitos, muchos de los cuales esperamos que sean aportaciones al estado del arte y sean por lo tanto susceptibles de difusión o publicación en congresos y revistas científicas. Alguna de las contribuciones que esperamos hacer en el marco de esta tesis son:

- Estudio y simulación del mecanismo de propagación de ondas sonoras entre fuentes y oyentes en movimiento en un entorno con reflexiones.
- Formulación matricial y generalización del método de las imágenes para incluir fronteras curvas. Programación recursiva de la estrategia. Predicción de soluciones no válidas en el método de las imágenes.
- Comparación de prestaciones de diferentes configuraciones de sondas de intensidad. Sonda triaxial frente a sonda tetraédrica.
- Personalización de funciones de transferencia HRTF.
- Interpolación de HRTFs.
- Ecualización de salas. Compensación del efecto de la reverberación.
- Evaluación subjetiva del ruido. Propiedades más molestas.
- Psicoacústica. Evaluación de la capacidad del oyente de discriminar la dirección del audio incidente en diferentes planos y frecuencias.

VII. Discusión

A. *Valoración personal*

Aunque formalmente estamos en el primer año de la tesis doctoral, al haber realizado el Trabajo Fin de Grado [21] (en Ingeniería Electrónica y Automática) y el trabajo Fin de Máster [20] (en Tecnologías para la Salud y el Bienestar) con los directores de la tesis, existen tareas en marcha que enlazan con lo que será la tesis doctoral. Eso permite que hayamos identificado ya varias líneas de trabajo en las que elaborar un artículo científico al considerar que se va a poder hacer aportaciones relevantes. Indudablemente, no se trata de una decisión cerrada sino condicionada a la valoración que hagamos de nuestros resultados parciales. Los criterios de evaluación de los resultados que obtengamos deben basarse en las mínimas diferencias que el oyente es capaz de discriminar [23], conocidas como mínimas diferencias notables (*just noticeable difference*).

B. *Relación con las áreas temáticas del TAEE 2024*

Esta tesis doctoral está relacionada con varias de las áreas temáticas del congreso:

- Instrumentación electrónica: el trabajo de la tesis doctoral relacionado con el diseño y empleo de sondas de intensidad se enmarca en este ámbito de conocimiento. Una sonda de intensidad es un sensor que proporciona la intensidad acústica a partir de medidas de presión y de velocidad de la partícula. La problemática asociada a la medida de la intensidad acústica constituye una línea de investigación que pertenece a este ámbito temático del congreso [5], [24], [25].
- Procesado de señal: muchas de las soluciones planteadas a largo de la tesis se basan en la aplicación de técnicas de procesado de señal, como, por ejemplo: diseño de filtros digitales, diseño de agrupaciones de sensores, intensimetría basada en la parte imaginaria del espectro cruzado [26], etc.
- Aplicaciones electrónicas (ingeniería biomédica): el fin último de la tesis es el desarrollo de un audífono basado en el teléfono y una pequeña sonda de intensidad de bajo coste que mejore la calidad del audio entregado a una persona con déficit auditivo mediante la incorporación de sonido binaural [1].

VIII. Conclusiones

En la fase actual del trabajo de investigación que se describe, se visualiza un amplio conjunto de tareas que abarca diferentes campos: acústica, instrumentación electrónica, procesado de señal, análisis de datos, etc. La consecución del objetivo final debe validarse, por un lado, con la obtención de un prototipo de sistema de localización de fuente y generación de audio binaural que mejore la percepción del oyente y, por otro lado, con la elaboración de varias

publicaciones científicas que refrenden el valor de las aportaciones.

El desarrollo de esta tesis doctoral va a llevarse a cabo conjuntamente a la impartición de docencia en el grado de Ingeniería Electrónica y Automática. Por lo tanto, el desarrollo de la capacidad investigadora basada en una metodología rigurosa debe hacerse en paralelo con la adquisición de habilidades docentes. Este doble reto se enmarca en el contexto de una tesis ambiciosa, finalista y multidisciplinar que aspira a realizar aportaciones valiosas en el campo del procesado de la señal, la instrumentación electrónica, la acústica… y desde otro punto de vista a mejorar con ello las condiciones de vida de un sector de la población como son las personas con discapacidad auditiva.

REFERENCIAS

[1] H. Moller, «Fundamentals of Binaural Technology», Applied Acoustics, 36, 171-218, 1992.

[2] P. M. Zurek, «Binaural advantages and directional effects in speech intelligibility», en *Studebaker GA, Hochberg I. eds. Acoustical Factors Affecting Hearing Aid Performance*, 2nd Edition., Boston, MA: Allyn & Bacon, 1993, pp. 255-276.

[3] H. F. Olson, «System Responsive to the Energy Flow of Sound Waves», U.S. Patent No. 1.892,644, 1932

[4] F. J. Fahy, *Sound Intensity*, 2nd Edition. London: E & FN Spon, 1995.

[5] F. Jacobsen, V. Cutanda, y P. M. Juhl, «A numerical and experimental investigation of the performance of sound intensity probes at high frequencies», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 103, n.º 2, pp. 953-961, feb. 1998, doi: 10.1121/1.421212.

[6] S. Gade, «Sound Intensity (Part 1 Theory)», Brüel&Kjær Technical Review 3, 1982.

[7] S. Gade, «Sound Intensity (Part 2 Instrumentation and Applications)», Brüel&Kjær Technical Review 4, 1982.

[8] T. Hirahara, D. Kojima, D. Morikawa, y P. Mokhtari, «The effect of head rotation on monaural sound-image localization in the horizontal plane», *Appl. Acoust.*, vol. 178, p. 108008, jul. 2021, doi: 10.1016/j.apacoust.2021.108008.

[9] W. G. Gardner y K. D. Martin, «HRTF measurements of a KEMAR dummy head microphone». MIT Media Lab Perceptual Computing Technical Report #280, 1994.

[10] W. G. Gardner y K. D. Martin, «HRTF measurements of a KEMAR», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 97, n.º 6, pp. 3907-3908, jun. 1995, doi: 10.1121/1.412407.

[11] S. C. Thompson, «Tutorial on microphone technologies for directional hearing aids», *Hear. J.*, vol. 56, n.º 11, pp. 14-16, nov. 2003, doi: 10.1097/01.HJ.0000292900.09293.32.

[12] S. Xu, Z. Li, y G. Salvendy, «Identification of Anthropometric Measurements for Individualization of Head-Related Transfer Functions», *Acta Acust. United Acust.*, vol. 95, n.º 1, pp. 168-177, ene. 2009, doi: 10.3813/AAA.918138.

[13] Y. Qiu, Z. Li, y J. Wang, «Individual HRTF Prediction Based on Anthropometric Data and Multi-Stage Model», en *2023 IEEE International Conference on Multimedia and Expo Workshops (ICMEW)*, Brisbane, Australia: IEEE, jul. 2023, pp. 314-319. doi: 10.1109/ICMEW59549.2023.00060.

[14] F. Rund y F. Saturka, «Alternatives to HRTF measurement», en *2012 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, Prague, Czech Republic: IEEE, jul. 2012, pp. 648-652. doi: 10.1109/TSP.2012.6256377.

[15] J. Zhao, D. Yao, J. Gu, y J. Li, «Efficient prediction of individual head-related transfer functions based on 3D meshes», *Appl. Acoust.*, vol. 219, p. 109938, mar. 2024, doi: 10.1016/j.apacoust.2024.109938.

[16] H. Kuttruff, «Geometrical Room Acoustics», en *Room Acoustics*, 4th Edition., London: Spon Press, 2000, pp. 89-114.

[17] J. Borish, «Extension of the image model to arbitrary polyhedra», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 75, n.º 6, pp. 1827-1836, jun. 1984, doi: 10.1121/1.390983.

[18] Y. T. Liu, «Doppler Effect and Supersonic Motion». 2018. [En línea]. Disponible en: https://github.com/ytliu0/Doppler-Effect-and-Supersonic-Motions/blob/master/docs/Doppler.pdf

[19] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*. John Wiley & Sons, Inc, 1962.

[20] R. Martín Ferrer, «Mejora de condiciones de escucha de personas con déficit auditivo mediante incorporación de sonido binaural», Universidad de Zaragoza, Trabajo Fin de Master, 2022. Accedido: 4 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://deposita.unizar.es/record/72286?ln=es#

[21] R. Martín Ferrer, «Propuesta y desarrollo de mejoras en la eficiencia y en las medidas de seguridad de una máquina canteadora en un aserradero», Universidad de Zaragoza, EUPT, Trabajo Fin de Grado, 2017. [En línea]. Disponible en: https://deposita.unizar.es/record/39077?ln=es#

[22] V. R. Algazi, R. O. Duda, D. M. Thompson, y C. Avendano, «The CIPIC HRTF database», en *Proceedings of the 2001 IEEE Workshop on the Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (Cat. No.01TH8575)*, New Platz, NY, USA: IEEE, 2001, pp. 99-102. doi: 10.1109/ASPAA.2001.969552.

[23] S. Dick y J. Herre, «Predicting the Precision of Elevation Localization Based on Head Related Transfer Functions», en *ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Brighton, UK: IEEE, may 2019, pp. 326-330. doi: 10.1109/ICASSP.2019.8682313.

[24] J.-H. Woo, I.-J. Jung, S.-K. Cho, y J.-G. Ih, «Precision enhancement in source localization using a double-module, three-dimensional acoustic intensity probe», *Appl. Acoust.*, vol. 151, pp. 63-72, ago. 2019, doi: 10.1016/j.apacoust.2019.03.009.

[25] I.-J. Jung y J.-G. Ih, «Compensation of inherent bias errors in using the three-dimensional acoustic intensimetry for sound source localization», *J. Sound Vib.*, vol. 461, p. 114918, nov. 2019, doi: 10.1016/j.jsv.2019.114918.

[26] J. Y. Chung, «Cross-spectral method of measuring acoustic intensity without error caused by instrument phase mismatch», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 64, n.º 6, pp. 1613-1616, dic. 1978, doi: 10.1121/1.382145.

Diseño, caracterización, prototipado y gemelo digital de una plataforma Stewart.

Alba Correal
Grado en Ing. Electrónica, Robótica y Mecatrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
alba.correal@uma.es

Francisco J. Ríos
Departamento de Electrónica
Universidad de Málaga
Málaga, España
fjrios@uma.es

***Abstract*—Este artículo tiene como objetivo mostrar los resultados de un Trabajo de Fin de Grado donde la electrónica se combina con otras disciplinas para el desarrollo de sistemas de posicionamiento de precisión. Así, la electrónica, la mecánica, la computación y el control se unen en tiempo real para la innovación en estos dispositivos de vanguardia, cuyo desarrollo es una revolución para la industria actual. Esta metodología transversal como eje de la ingeniería electrónica está en línea con la filosofía del desarrollo de prácticas para estudiantes dentro del Departamento de Electrónica de la Universidad de Málaga.**

***Index Terms*—Control Electrónico Distribuido, Mecánica Paralela y No Lineal, Gemelo Digital, Plataforma Stewart, Mecatrónica, Educación.**

I. Introducción

A. Motivación: Modularidad, paralelismo y control distribuido como elementos transformadores.

Los mecanismos de posicionamiento de precisión controlados electrónicamente en tiempo real son un instrumento cada vez más utilizado en la industria y la investigación. Entre sus aplicaciones, destacan la fabricación microelectrónica, la nanotecnología, la medicina de precisión o la exploración espacial [1]. Sin embargo, estos sistemas presentan limitaciones que dificultan su uso en todas las aplicaciones necesarias. La complejidad de sus modelos debido a su no linealidad, su alto costo, las dificultades para controlarlos, especialmente en tiempo real, su consumo de energía o su calibración son algunos de los problemas que aún necesitan ser resueltos hoy en día [2]. Así, el desarrollo de este proyecto (que abarca desde el diseño de software incluyendo la arquitectura y modelado de gemelos digitales, hasta el desarrollo de hardware que lo implementa), tiene como objetivo abordar este problema y proporcionar resultados significativos al respecto.

B. Diseño de una Plataforma Stewart: Un enfoque pedagógico que desafía el Estado del Arte (SoTA) actual.

Las plataformas Stewart se basan en cuatro áreas principales de conocimiento:

- Mecánica.
- Sistemas de Control.
- Electrónica.
- Instrumentación.

Aunque estas áreas son comunes a muchos programas de ingeniería, la perspectiva en la que se enseñan probablemente no sea tan profunda como la requerida para desarrollar este proyecto. Si sustituyéramos las áreas anteriores por una definición más específica:

- Mecánica paralela y no lineal.
- Sistemas de control distribuido.
- Electrónica optimizada para gemelos digitales y de potencia.
- Diseño modular de actuadores con retroalimentación de baja interferencia.

Incluso con una definición más precisa, no podríamos captar la esencia de este proyecto: la transversalidad. La verdadera complejidad radica en cómo estos conceptos se interconectan entre sí, cómo los errores o la precisión de cada uno de ellos definen la precisión del siguiente, y así sucesivamente.

Además, como se muestra en el título de esta sección, el concepto de la plataforma desafía el estado del arte actual en la industria de este mecanismo, tratando de resolver algunos de los problemas encontrados en otros diseños que ya están en el mercado.

Dada la complejidad del proyecto, se ha dividido y programado en diferentes paquetes de trabajo.

- Estudio teórico del modelo Stewart.
- Diseño de un Gemelo Digital con herramientas Solidworks y Mathworks.
- Prototipado físico. Caracterización de sensores y actuadores.
- Interconexión de modelos digitales y físicos.
- Estudio de precisión y exactitud.

A lo largo de este documento, profundizaremos en cada una de las secciones anteriores.

II. Análisis de la plataforma Stewart

A. Cinemática paralela

Un mecanismo paralelo es un sistema con una estructura de lazo cerrado, compuesto por un efector final (también conocido como plataforma móvil) con más de un grado de libertad (GDL o n) y una base estacionaria. Estos están conectados por múltiples cadenas cinemáticas independientes (patas o m), que consisten en una serie de enlaces y articulaciones.

El mecanismo está impulsado por actuadores simples (k), cuyo número es igual o mayor que los GDL,Instalado en las articulaciones seleccionadas. Esta definición abarca múltiples escenarios [3]:

1) Cuando k es igual a n, significa un mecanismo paralelo accionado de manera no redundante, que es una forma estándar de mecanismos paralelos.
2) Si k es mayor que n, indica un mecanismo paralelo accionado de manera redundante.
3) Cuando m es mayor que n, significa un mecanismo paralelo con patas excedentes.
4) Si m es menor que n, denota un mecanismo paralelo híbrido que tiene una o más articulaciones actuadas en cada pata.
5) Cuando n, m y k son iguales, representa un mecanismo completamente paralelo.

Dada la cantidad de patas, efectores y grados de libertad del sistema, podemos considerar una plataforma Stewart como un mecanismo completamente paralelo. Sin embargo, un mecanismo paralelo puede categorizarse como simétrico o asimétrico. Se considera simétrico si cumple con estos requisitos [3]:

1) El mecanismo es completamente paralelo en su estructura.
2) La configuración de las articulaciones, que están conectadas a la plataforma móvil y la base estática, sigue una regla específica.
3) En cada pata del mecanismo, los enlaces correspondientes de longitud fija tienen la misma longitud.
4) El patrón de disposición para el tipo y la cantidad de articulaciones en todas las patas es idéntico.
5) El número y la colocación de las articulaciones accionadas en todas las patas son idénticos.

Las plataformas Stewart, una vez más, cumplen con todos los requisitos anteriores. Este sistema de posicionamiento es tanto relativamente simple como ideal para el enfoque inicial de un estudiante de grado hacia los mecanismos paralelos.

B. Teoría de Screws

La teoría de Screws (tornillos en inglés) es un método matemático utilizado en el campo de la mecánica para resolver problemas que involucran fuerzas concurrentes y movimientos de rotación y translación. La aplicación de la teoría de screws en robótica es particularmente útil en el diseño y análisis de manipuladores robóticos, como la plataforma Stewart. Proporciona una forma compacta y eficiente de representar el movimiento y las fuerzas en estos sistemas, lo que lleva a ecuaciones de movimiento simplificadas y algoritmos de control simplificados.

Aunque es poco probable que se enseñe en programas de grado, solo se necesitan algunos conceptos básicos de geometría para comprender completamente la base de la teoría de screws. En esencia, la teoría de screws da una forma de describir simultáneamente el desplazamiento lineal y angular. Un tornillo se representa por una línea en el espacio junto con una magnitud y paso, que respectivamente representan los componentes lineales y angulares.

Dada una línea l conformada por dos puntos:

$$A = (x_1, y_1, z_1) \tag{1}$$

$$B = (x_2, y_2, z_2) \tag{2}$$

Sea $\vec{S}$ el vector que define la línea entre A y B:

$$\vec{S} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1) = L\vec{i} + M\vec{j} + N\vec{k} \tag{3}$$

Sea $\vec{S_0}$ el vector que define el momento entre el origen y la línea:

$$\vec{S_0} = \vec{S} \times \vec{r} = P\vec{i} + Q\vec{j} + R\vec{k} \tag{4}$$

Para adaptar la teoría de screws a cualquier movimiento en el espacio, definimos los screws como:

$$\$ = (S; S_0)/\vec{S} \cdot \vec{S_0} = 0 \tag{5}$$

Con esa definición, el momento de S alrededor de A es:

$$S^A = S^0 + AO \times S \tag{6}$$

Donde O es el origen del marco de referencia desde el cual se definen los parámetros de S.

Si multiplicamos ambos lados por S:

$$S \cdot S^A = S \cdot S^0 \tag{7}$$

Esto muestra que $S \cdot S^0$ no depende del origen. Sea h la variable independiente (paso) de modo que:

$$h = \frac{S \cdot S^0}{S \cdot S} \tag{8}$$

La ecuación del eje del tornillo es:

$$r \times S = S^0 - hS \tag{9}$$

Actualizando las ecuaciones (4) y (5) con (9) [4]:

$$\$ = (S; S_0) = (S; r \times S + hS) = (S; S_0 + hS) \tag{10}$$

C. Modelo Cinemático Inverso

Habiendo comprendido todos los conceptos anteriores, los alumnos pueden entender correctamente el Modelo Cinemático Inverso (MCI) de la Plataforma Stewart.

Según la nomenclatura definida en la Fig.1, la ecuación de equilibrio de fuerzas de una plataforma Stewart es [4]:

$$f_{1i}\$_{1i} + f_{2i}\$_{2i} + f_{3i}\$_{3i} + f_{4i}\$_{4i} + f_{5i}\$_{5i} + f_{6i}\$_{6i} = F\$_P \tag{11}$$

Matricialmente:

$$[G]f = F\$_P \tag{12}$$

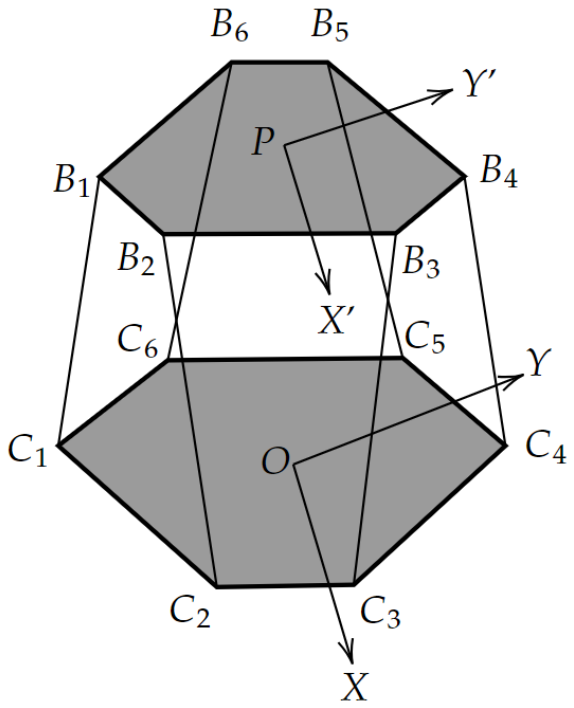


Fig. 1. Esquema de una plataforma Stewart

Donde G es la matriz Jacobiana, que puede expresarse en términos de la posición de las articulaciones. Así:

$$[G]^T = \begin{bmatrix} \frac{B_1-C_1}{|B_1-C_1|} & \frac{B_2-C_2}{|B_2-C_2|} & \frac{B_3-C_3}{|B_3-C_3|} & \frac{B_4-C_4}{|B_4-C_4|} & \frac{B_5-C_5}{|B_5-C_5|} & \frac{B_6-C_6}{|B_6-C_6|} \\ \frac{C_1\times B_1}{|B_1-C_1|} & \frac{C_2\times B_2}{|B_2-C_2|} & \frac{C_3\times B_3}{|B_3-C_3|} & \frac{C_4\times B_4}{|B_4-C_4|} & \frac{C_5\times B_5}{|B_5-C_5|} & \frac{C_6\times B_6}{|B_6-C_6|} \end{bmatrix} \tag{13}$$

III. Modelado Mecánico

A. Solidworks como herramienta pedagógica

Solidworks, el conocido software CAD 3D, se distingue por la metodología utilizada para diseñar cualquier pieza de manera paramétrica. Un uso correcto del software permite realizar cambios significativos en los modelos modificando las medidas deseadas, y sin la necesidad de reconstruir ninguna de las morfologías. Este enfoque de diseño mecánico es muy enriquecedor para los estudiantes, ya que es una forma simple y metódica de diseñar cualquier sistema mecánico 3D.

Además, tiene varios complementos que pueden realizar simulaciones de esfuerzos, cinemática y dinámica con facilidad, lo que permite a los usuarios exportar los resultados como un archivo csv para un análisis posterior. Para realizar tales simulaciones, las restricciones del modelo y los ejes deben definirse con precisión y de manera metódica.

Sin embargo, una de las características clave de Solidworks es que puede exportar toda la configuración del modelo (desde la morfología hasta la posición, orientación y propiedades del material) a un archivo .xml, que puede ser importado por otros softwares de simulación o control, cubriendo una brecha significativa en la modelización de gemelos digitales.

En esta sección, explicaremos cómo se diseñó el modelo, cuáles son las restricciones y una caracterización simple realizada para la depuración de errores utilizando las herramientas de Solidworks.

Como en el resto del proyecto, la modularidad ha sido clave. El hexápodo consta de 6 patas idénticas y dos bases simétricas.

La base inferior es un círculo de 100 mm de diámetro, pero basado en un hexágono circunscrito. Cada una de las líneas que une el punto central con los vértices del hexágono define un eje para posicionar las patas del hexápodo. El punto central de los ejes de las patas está a 12º de la base y a 40 mm del centro.

Alrededor de ellos, se han diseñado algunos salientes de plástico en forma de articulaciones, de modo que puedan colocarse dentro presionándolos contra la base. Estos salientes están orientados perpendicularmente al eje de la pata para optimizar la resistencia del actuador lineal. También están dispuestos simétricamente, utilizando 6 planos, asegurando equivalencia de fuerza y posición para todas las patas. La salida final de la plataforma inferior se puede ver en la Fig. 2.

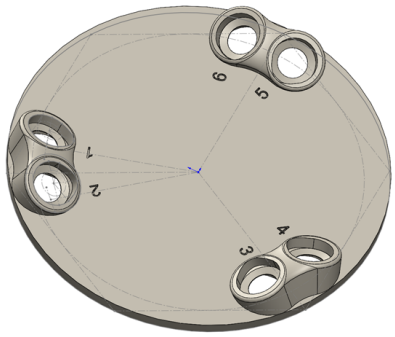


Fig. 2. Base inferior

De manera similar, la base superior es un círculo de 80 mm de diámetro. En este caso, los ejes de las patas están a 30 mm del punto central. Esto asegura que los ejes sean perpendiculares tanto a las articulaciones superiores como a las inferiores, maximizando la resistencia del actuador lineal.

Las patas tienen dos partes principales. La primera está unida a la parte fija del actuador, mientras que la segunda está unida a la parte móvil del actuador. El lugar donde está fijo garantiza una salida de 0 cuando el hexápodo está en su punto central. Por lo tanto, se obtienen coordenadas negativas en la articulación prismática cuando las patas se mueven hacia abajo, mientras que se obtienen coordenadas positivas cuando las patas se mueven hacia arriba.

Simultáneamente, se pueden distinguir dos secciones dentro de cada una: una parte cilíndrica (diseñada para un ajuste correcto dentro de la articulación, incluida una región redondeada) y una parte de prisma cuadrado (del mismo ancho y forma que el motor).

Se han agregado algunas extrusiones al modelo, para una calibración correcta de la posición donde se debe colocar el motor. Estas extrusiones se eliminan después de pegar el motor, permitiendo el movimiento correcto de los efectores finales. El aspecto final del efector, con el motor integrado, se puede ver en la Fig. 3.

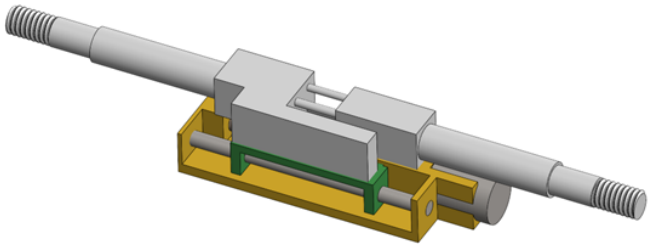


Fig. 3. Vista isométrica del efector

El modelo general muestra que se puede diseñar un hexápodo perfectamente funcional dentro de un espacio pequeño. Sin embargo, las dimensiones y las escalas son clave para un desarrollo correcto de este diseño. Un ligero cambio en las dimensiones lleva a una salida completamente diferente, espacio de trabajo, distribución de carga, etc.

Otro factor clave en la modelización para un gemelo digital son los marcos de referencia. Estos permiten la correcta posicionamiento de las diferentes partes físicas en el modelo matemático. Por lo tanto, se debe realizar un trabajo exhaustivo para asegurar que todos los elementos diseñados tengan su marco de referencia de acuerdo con las expectativas reales.

Dado que, para un desarrollo correcto del modelo matemático, los marcos de referencia deben ser simétricos, el punto z superior y el punto z inferior se orientan en direcciones opuestas, como se muestra en la Fig. 4. Esto también asegura que haya una correlación entre el desplazamiento positivo y negativo desde el punto final.

Hay un marco de referencia adicional necesario para la simulación: posición inicial del punto final. Este marco de referencia permite calcular la diferencia entre la posición deseada y la posición inicial.

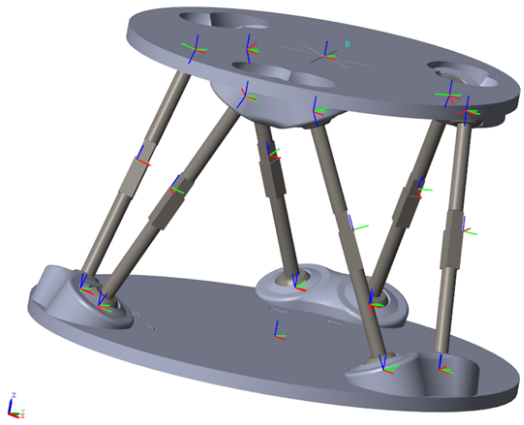


Fig. 4. Vista completa del modelo simplificado de la plataforma Stewart, con sus respectivos marcos de referencia

B. Caracterización Básica: Solidworks Motion

Como sugieren Guangzheng J. et al. [5], el primer punto de control del proceso reside en ejecutar una simulación de movimiento de Solidworks. En este caso, generaremos una tabla con los puntos extremos de los efectores, para que podamos definir el espacio de trabajo de la herramienta. La representación visual de esos puntos corresponde a la Fig. 5.

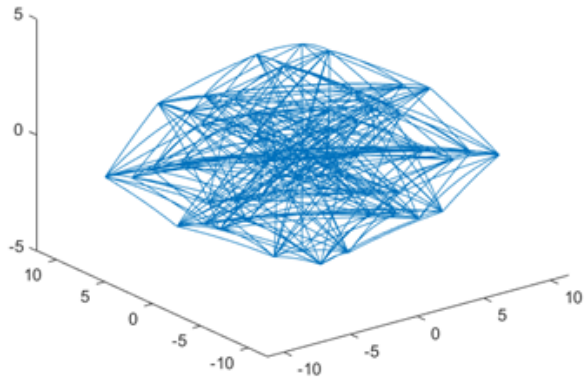


Fig. 5. Espacio de trabajo de la plataforma Stewart

Los rangos máximos de desplazamiento en milímetros obtenidos son:

- Izquierda/Derecha: $-8.3 \leq X \leq 8.3$
- Adelante/Atrás: $-8.3 \leq Y \leq 8.3$
- Arriba/Abajo: $-4.2 \leq Z \leq 4.2$

Los rangos máximos de rotación en grados son:

- Rotación alrededor de Z (Yaw): $-15 \leq X \leq 15$
- Rotación alrededor de X (Pitch): $-10 \leq X \leq 10$
- Rotación alrededor de Y (Roll): $-10 \leq X \leq 10$

Todos los rangos están cubiertos con una precisión de 3.5 micrones.

Esta simulación muestra que la plataforma funciona adecuadamente, lo que nos lleva al siguiente paso, el desarrollo del gemelo digital.

IV. Electrónica

El corazón del proyecto reside en la correcta configuración de la electrónica utilizada para el hexápodo:

La mecánica paralela induce una electrónica paralela, que se deriva en electrónica de control distribuida en sí misma. Y, simultáneamente, la precisión es el parámetro crucial que determina la correcta ejecución tanto del modelo como de la implementación de hardware. La electrónica, específicamente los convertidores AD y su entrada de suministro, juegan el papel más significativo en este ámbito.

A. Electrónica de Control Distribuido

La modularidad y la distribución de control generalmente van de la mano. En este caso particular, hemos desarrollado nuestros propios actuadores lineales con un potenciómetro lineal de realimentación. Estos actuadores también tienen un sensor térmico y una aleta térmica para disipación de calor. Cada uno de los actuadores tiene su propio microprocesador dedicado, que controlará su hardware dedicado. Podríamos considerar cada pata como un sistema integrado con un controlador en bucle cerrado que garantiza su rendimiento.

Desde un punto de vista pedagógico, este enfoque de control descentralizado permite a los alumnos comprender verdaderamente los 3 puntos clave de los SCD (Sistemas de Control Distribuido y Sistemas Integrados):

- Retardos temporales: Dado que la aplicación es un gemelo digital en tiempo real, reducir los retardos temporales es crucial para una ejecución correcta. Además, como las Plataformas Stewart no son LTI (Linealmente Invariantes en el Tiempo), un control conveniente en el dominio del tiempo es especialmente significativo [6] [7].
- Existencia de herramientas de diseño adecuadas: Incluso si se pudiera haber desarrollado un control basado en un Modelo Cinemático Inverso (MCI) en un software de Ingeniería de Sistemas, los recursos computacionales derivados de esta arquitectura (que requiere modelado en una computadora) son significativamente más altos que usar un microcontrolador (programado en C++) para cada actuador. Sin embargo, si se crea dicho modelo, requeriría un desarrollo adicional y significativamente más difícil para la integración del control térmico.
- Confiabilidad y escalabilidad: No hace falta decir que el enfoque descentralizado es mucho más confiable y escalable que el centralizado. El procesador dedicado permitiría la integración de otros sensores o actuadores integrados, lo que conduciría a un algoritmo de control más completo (y aún así, menos complejo) construido ad-hoc para cada pata o efector final [7].

B. Implementación Electrónica

Se necesitan electrónica de potencia y control para desarrollar el hexápodo. Los dispositivos electrónicos implementados en cualquier proyecto de robótica se pueden clasificar en 3: Sensores, actuadores y CIs y procesadores. Dado que el control distribuido es esencial en la filosofía del proyecto, cada pata tiene sus propios sensores y actuadores, y también sus propios microprocesadores de control, lo que significa que es autónomo y modular.

Los sensores utilizados son una posición (potenciómetro lineal) y un sensor de temperatura, y solo hay un actuador, el motor paso a paso lineal.

El uso de un motor paso a paso garantiza un mayor nivel de control, dado que su principio de funcionamiento se basa en el movimiento en una longitud específica.

Como se mencionó en la sección de modelado, el potenciómetro lineal se ha calibrado para que coincida con la carrera mínima y máxima del motor paso a paso. De manera similar, el sensor de temperatura se ha pegado con pasta térmica en el punto de temperatura más crítico del diseño (Fig. 6). Hay cuatro elementos principales con respecto a la electrónica de control para el hexápodo, que todos se pueden ver en la Fig. 7:

- Microprocesador LGT8F328P: crea el lazo de retroalimentación entre el motor y el potenciómetro, ordena el movimiento del motor a la posición deseada y controla los errores derivados del movimiento. Cada pata tiene el suyo.
- Controlador DRV883: convierte la salida del procesador en la entrada necesaria para el control del motor. También es un interruptor de control adicional, ya que su desconexión de la placa evita que el motor se mueva. Cada pata tiene el suyo.
- Microprocesador ESP32 TTGO-T7: Microprocesador central que conecta el gemelo digital al prototipo físico. Recibe la posición deseada de los efectores a través de WiFi y la envía a todos los microprocesadores. También controla los errores centrales.
- Adaptadores de nivel TXS0108E: Convierten la salida de 5V del TTGO a la entrada de 3.3V del LGT8F.

El primer microprocesador juega el papel más importante en el proceso de diseño, ya que es el único sistema de retroalimentación que interrelaciona el gemelo digital con el modelo real: el potenciómetro es leído por este procesador con una resolución de 12 bits. Esta característica, junto con su bajo consumo de energía, lo convierte en un microprocesador muy competitivo.

Dada la precisión lograda por el motor, es esencial que el convertidor AD tenga una desviación menor a 2.4 mV. Esta desviación es clave para todo el diseño, y debe tenerse en

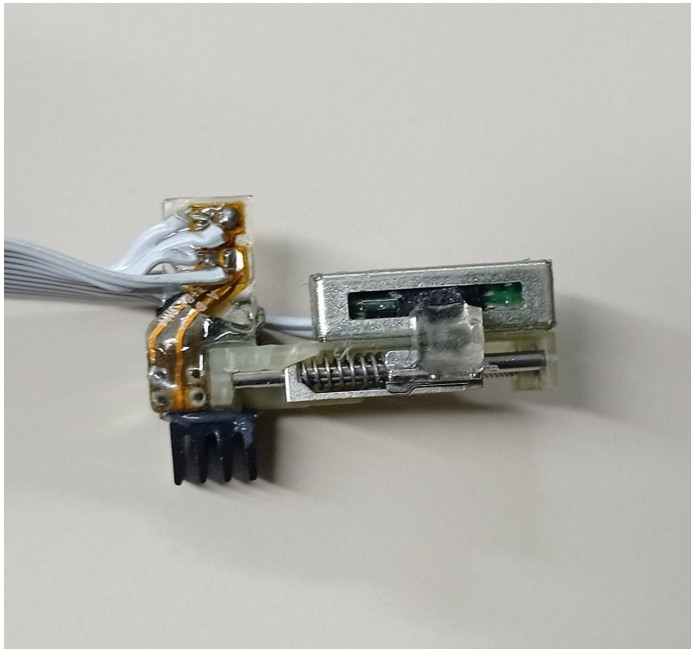


Fig. 6. Efector real

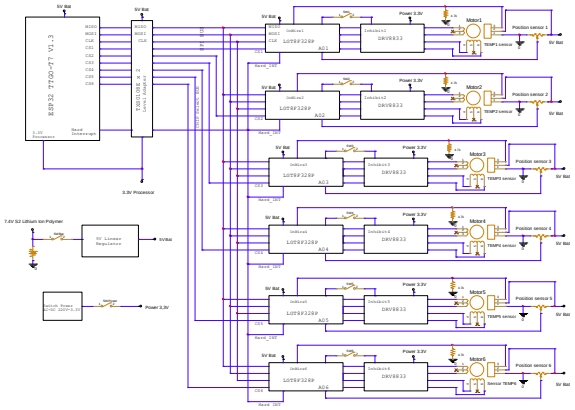


Fig. 7. Esquemático simplificado de la electrónica

cuenta en todo momento. Sin embargo, el factor más influyente para evitar esta desviación es el uso de una electrónica de potencia defensiva y correcta que alimente los circuitos con el menor ruido posible. Por esta razón, se ha conectado un regulador lineal de 5V en la salida de nuestra batería de ion de litio de 7.4V.

V. Arquitectura de Software de Bajo Nivel

A. Control Distribuido

El software utilizado para controlar el hexápodo fue programado en C++ tanto en el TTGO como en el LGT8F. El diseño de este algoritmo se definió siguiendo una simplificación de los principios del Control de Horizonte Decreciente (RHC en inglés) definidos por Huiping Li y Yang Shi [7]. Por motivos de simplicidad, se proporciona un diagrama de alto nivel del funcionamiento básico.

Debe notarse que, mientras que las acciones amarillas muestran código definido en el TTGO, las azules han sido programadas en cada LGT8F, lo que significa que estas acciones se ejecutan simultáneamente en cada efector (Fig.8).

Después de ver el diagrama, podemos afirmar con confianza que la mayor parte del software de bajo nivel y control reside en el LGT8F, y el TTGO solo se utiliza con fines de comunicación. El diseño jerárquico optimiza el uso de la electrónica.

Una de las mayores dificultades del diseño del hexápodo es su tamaño: lograr tal precisión en un diseño tan pequeño definitivamente ha sido una tarea compleja.

B. Comunicación

Los mecanismos de posicionamiento requieren una precisión muy alta. Esto implica que la latencia baja también es crucial para una ejecución correcta.

Además, aunque la Interfaz de Usuario (UI) del hexápodo esté en una computadora, para que se pueda posicionar libremente en cualquier espacio, la comunicación debe ser inalámbrica desde la computadora hacia las placas. Por esa

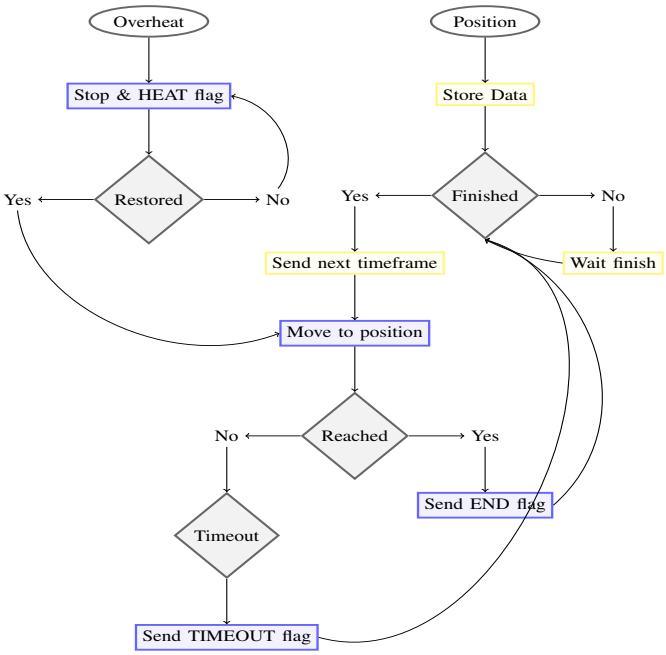


Fig. 8. Algoritmo de Control Distribuido

razón, se utilizó el protocolo UDP WiFi para comunicar el software Simscape Multibody con el TTGO.

Simscape multibody envía un paquete de datos que consiste en una matriz de 6x1. Cada paquete contiene la posición deseada de cada efector. Este paquete se envía luego al TTGO a través de UDP. Según el algoritmo anterior, el TTGO comprueba la disponibilidad de los efectores y envía el nuevo paquete de datos con protocolo SPI. Esto permite que cada efector funcione de manera autónoma, solo comprobando la sincronización una vez que ha alcanzado la posición deseada.

VI. Gemelo Digital

Desarrollar un gemelo digital para un manipulador paralelo no es simple. Sin embargo, utilizando el software correcto y abordando el problema desde la perspectiva del MCI puede simplificar significativamente el proceso.

A. Transmisión en Tiempo Real

En el ámbito de la mecatrónica, el concepto de funcionalidad ”en tiempo real” representa un fenómeno crítico en la integración fluida de sistemas digitales y físicos. Dentro del alcance del hexápodo, este atributo particularmente concierne a la interacción dinámica entre un gemelo digital y su contraparte hardware. Aquí, la funcionalidad en tiempo real denota la capacidad del sistema para procesar, actualizar y sincronizar datos instantáneamente, asegurando una relación cohesiva y receptiva entre los entornos virtual y físico.

En el núcleo de la arquitectura del proyecto se encuentra una característica distintiva: la capacidad de ajustar dinámicamente los parámetros de los efectores de hardware mientras se interactúa simultáneamente con el gemelo digital en tiempo

real [8]. Esta funcionalidad encarna un cambio de paradigma, permitiendo una interacción fluida y sincronizada entre los gemelos digital y hardware. En esencia, este mecanismo de sincronización garantiza que cualquier modificación realizada dentro del gemelo digital, como modificaciones en las posiciones de los efectores finales, se reflejen rápidamente en el dominio físico. Así, el sistema alcanza un estado de alineación continua, donde los cambios en un dominio se propagan rápidamente al otro, fomentando un flujo de trabajo coordinado, que sigue los siguientes pasos:

1) El usuario introduce la salida deseada a través de la Interfaz
2) El gemelo digital traduce la posición del efector final en desplazamiento de cada actuador lineal de las patas
3) El gemelo digital envía la matriz de desplazamiento a través de WiFi al microprocesador de comunicaciones
4) El microprocesador de comunicaciones envía la posición deseada de cada actuador a los microprocesadores distribuidos.

B. Simscape Multibody como herramienta pedagógica

Simscape Multibody es un complemento para el software de Matlab Inc. Específicamente, se utiliza dentro de la interfaz de Simulink, que generalmente se utiliza para ingeniería de sistemas: modelado, control e implementación.

Sin embargo, Simulink solo resuelve sistemas que tienen una función de transferencia implícita o explícita, que debe definirse. No hay enlace entre elementos físicos o mecánicos y su modelo matemático. Simscape Multibody cubre este vacío en el software, permitiendo a los usuarios integrar uniones, efectores, funciones de transferencia, controladores PID y muchos otros elementos en el mismo entorno. Su característica más significativa es su capacidad para asociar cada elemento físico a sus parámetros de funcionamiento (por ejemplo, el tamaño y el rango efectivo de cada pata), así como un marco de referencia que define las coordenadas que definen su movimiento.

Además, se puede importar un modelo 3D desde un software como Solidworks, y, si ese modelo está diseñado correctamente para este propósito, Simscape mismo creará las características básicas de la planta de control. Adicionalmente, cada uno de estos elementos tiene un sistema de detección incorporado, lo que significa que, dependiendo de la configuración definida por el usuario de ese bloque, podemos tener datos en tiempo real de la posición, la velocidad y la aceleración de cada efector virtual.

Simulink también integra un complemento para el desarrollo de UIs simples que permiten la validación del modelo. Esta herramienta, junto con todas las características definidas anteriormente, crea un entorno de pruebas perfecto para que los alumnos prueben sus modelos, definan sus sistemas de control, extraigan datos y simulen su funcionamiento en tiempo real, entre muchos otros.

C. El Modelo del Gemelo Digital

El gemelo digital de la plataforma Stewart tiene 6 bloques principales, como se muestra en la Fig. 9:

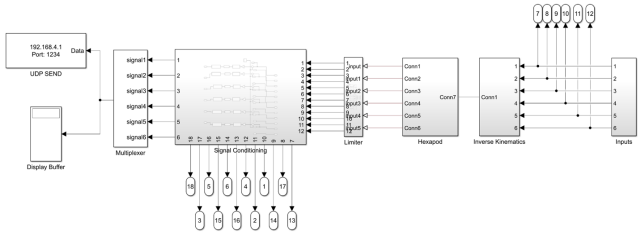


Fig. 9. Diagramas de bloques del gemelo digital

1) Cinemática Inversa y Planta del Hexápodo: Juntos, representan la planta del hexápodo, traducen la posición deseada en el desplazamiento del efector de cada pata y proporcionan un control en lazo cerrado.

Usando una Unión de Casquillo como la que se muestra en la Fig. 10, podemos usar las propiedades de los Bloques de Simscape para obtener la salida real en lugar de la salida deseada. Con esa información, podemos vincular la entrada de la unión a un lazo de retroalimentación con un controlador PID para cada grado de libertad.

El modelo 3D diseñado en SolidWorks se importó a Simscape, generando las uniones, efectores y bases del diseño. Cada uno de ellos, aparte de las restricciones definidas, tiene un sistema de coordenadas asociado y una transformación que permite la interconexión de cada elemento monómico.

La Fig. 11 muestra cómo se realiza la conversión desde una posición del efector final hasta una posición relativa de cada efector gracias al mismo principio que antes: utilizando

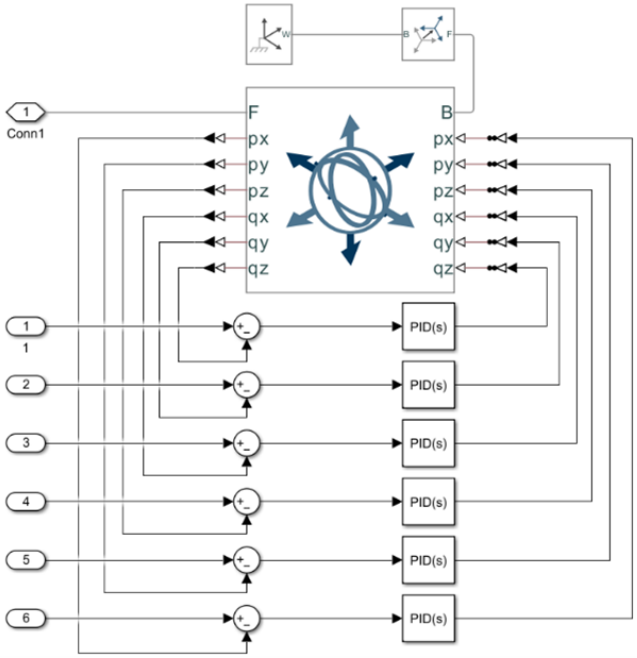


Fig. 10. Unión de casquillo para Cinemática Inversa

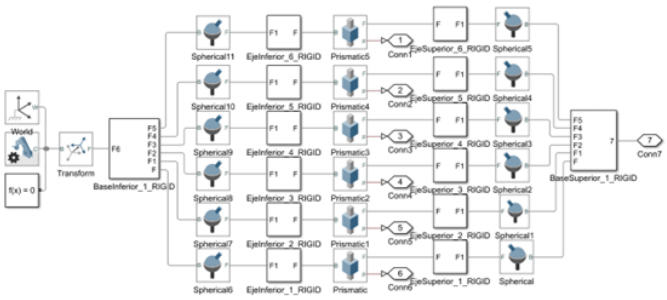


Fig. 11. Modelo Cinemático Inverso de la Plataforma Stewart

la propiedad de auto-sensado de los bloques, que tiene una salida de posición para cada una de las uniones prismáticas que definen los motores del demostrador.

2) Limitador: Evita que los valores excedan los rangos de los motores. Dado que los motores solo funcionan de -4 a 4 mm, debería haber restricciones para estos valores. Comparamos el valor absoluto del motor con el valor de extremo máximo (4.0) y usamos el booleano derivado como una bandera de control. Simultáneamente, hemos definido un limitador de rango de -4.0 a 4.0, que es el valor que se transmitirá eventualmente a los motores.

3) Acondicionamiento de la señal: Transforma la señal de desplazamiento a pasos del motor, y luego crea una conversión de moldeado que hace que los datos sean adecuados para enviar en un paquete.

Primero, los valores se convierten en pasos del motor. Luego, se convierten en un número entero de 16 bits para eliminar los números decimales. Este número se traduce luego a una cadena Ascii. Esta cadena Ascii es adecuada para la transmisión UDP, e interpretada por los microprocesadores como un número.

4) Multiplexor: Une todas las señales en los mismos paquetes.

D. Envío UDP

Envía el paquete a través de UDP al hexápodo.

E. Interactuando con el modelo. Interfaz de usuario y simulación

Se ha diseñado una interfaz simple para un primer uso del hexápodo. Consiste en 6 controles deslizantes, uno para cada grado de libertad en el espacio 3D. Se proporciona una vista detallada en la Fig. 12. Aparte de los controles deslizantes, la interfaz muestra el valor de esa posición particular en el espacio. Cuando una de estas posiciones está fuera del espacio de trabajo (en otras palabras, cuando un efector excede los valores -4.0 o 4.0), se enciende el LED correspondiente al efector.

Debajo de cada uno de los LED, se muestra la posición de cada efector, lo que permite concentrar todos los datos básicos en una sola pantalla.

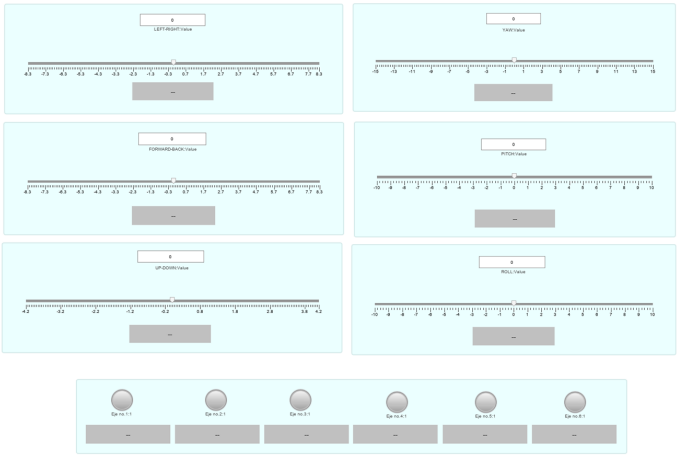


Fig. 12. Interfaz de usuario en Simulink

Estos toques finales, junto con el resto de los elementos descritos en nuestro documento, dan forma al alcance completo del proyecto.

VII. Conclusiones

Este Proyecto Final de Carrera - mostrado en la Fig. 13 - está orientado al desarrollo de un sistema mecatrónico multidisciplinario, donde se combinan electrónica, mecánica, control distribuido y matemáticas orientadas a la cinemática, software de diseño mecánico, software de ingeniería de sistemas. Esto es significativamente útil para prácticas de laboratorio que pueden ser transversales a diferentes departamentos dentro de una facultad de ingeniería. Por lo tanto, con un mismo objetivo, se pueden enseñar muchas asignaturas curriculares. Esto puede ser el comienzo de proyectos educativos innovadores desarrollados en la Universidad de Málaga.

- Hemos desarrollado un diseño mecánico completo de una plataforma Stewart.
- Hemos traducido el modelo mecánico a su correspondiente modelo cinemático de alto nivel.
- Hemos definido un sistema de comunicación que transfiere información de alto a bajo nivel con el objetivo de traducir parámetros de alto nivel en movimiento de efectores de extremo de control distribuido.
- Finalmente, hemos desarrollado una plataforma de gemelo digital de precisión que puede ser utilizada en entornos industriales con facilidad.

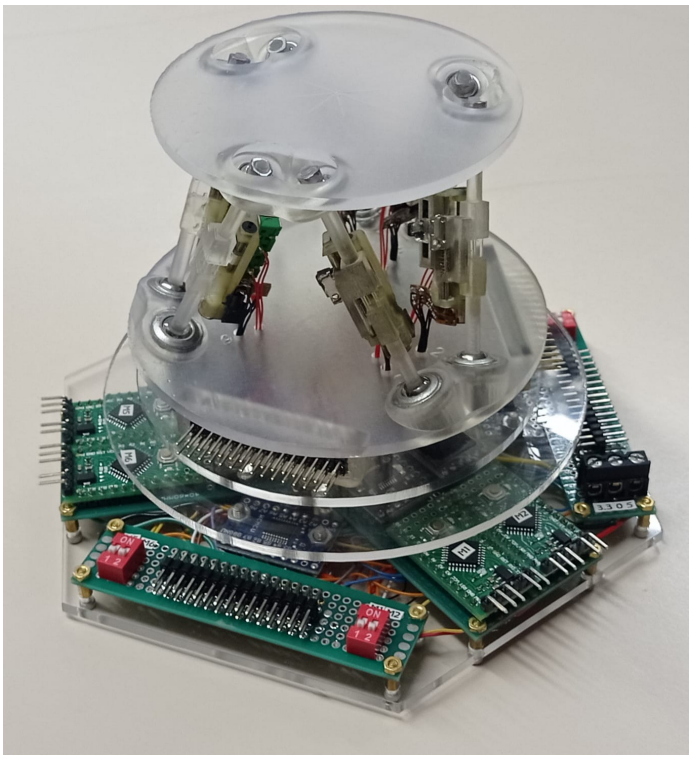


Fig. 13. Vista isométrica del hexapodo real

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Departamento de Electrónica de la Universidad de Málaga por financiar la inscripción en el Congreso.

REFERENCES

[1] Y. D. Patel and P. M. George, "Parallel manipulators applications—a survey," *Modern Mechanical Engineering*, vol. 02, pp. 57–64, 2012.

[2] by J Philip Houdek II BS, "Design and implementation issues for stewart platform configuration machine tools," 1990.

[3] G. Liu, "Optimal kinematic design of a 6-ucu kind gough-stewart platform with a guaranteed given accuracy," *Robotics*, vol. 7, 6 2018.

[4] Z. Huang, Q. Li, and H. Ding, *Basics of screw theory*. Springer Netherlands, 2013, vol. 6, pp. 1–16.

[5] G. Jia, G. Pan, Q. Gao, and Y. Zhang, "Research on position inverse solution of electric-driven stewart platform based on simulink," *The Journal of Engineering*, vol. 2019, pp. 379–383, 1 2019.

[6] G. Boella and L. van der Torre, "Decentralized control," in *Foundations of Intelligent Systems*, N. Zhong, Z. W. Raś, S. Tsumoto, and E. Suzuki, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003, pp. 618–622.

[7] H. Li and Y. Shi, *Robust Receding Horizon Control for Networked and Distributed Nonlinear Systems*, 2013. [Online]. Available: http://www.springer.com/series/13304

[8] N. Bratovanov, "Robot modeling, motion simulation and off-line programming based on solidworks api." Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 3 2019, pp. 574–579.

Diseño y caracterización de amplificador de bajo ruido para banda X en tecnología CMOS 65 nm

Gonzalo López-Gómez
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
820463@unizar.es

Francisco Aznar
Grupo de Diseño Electrónico
Centro Universitario de la Defensa
Zaragoza, España
faznar@unizar.es

Antonio D. Martínez-Pérez
Grupo de Diseño Electrónico
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
adimar@unizar.es

***Resumen*— El trabajo fin de grado consiste en el diseño de un amplificador de bajo ruido (LNA) en tecnología CMOS 65 nm para su implementación en antenas matriciales en banda X (8 GHz) siguiendo un itinerario formativo eficiente. Entre las actividades formativas destaca el adiestramiento en herramientas estadísticas con las que se comprueba que las variaciones introducidas por temperatura, voltaje de alimentación o las inherentes al proceso de fabricación CMOS no alteran significativamente el funcionamiento de cada LNA ni producen diferencias entre ellos relevantes que repercutan en la correcta operación de la antena en conjunto.**

***Palabras clave*—Diseño asistido por computador, diseño microelectrónico analógico, tecnología CMOS.**

I. Introducción

Las nuevas generaciones de redes móviles (5G/6G) y satelitales requieren el despliegue de antenas activas matriciales (Fig. 1) con capacidad de conformado de haz [1]. Estas están formadas por varios elementos radiantes que trabajan de forma coordinada. Cada uno de ellos dispone de un *front-end* electrónico (Fig. 2), cuya primera etapa consiste en un amplificador de bajo ruido (LNA) para la recepción [2].

Cada uno de estos dispositivos, así como sus cadenas de recepción son idealmente idénticos. Sin embargo, sabemos que los LNA se ven alterados por cambios de temperatura, voltaje de alimentación y modificaciones inherentes a la fabricación (PVT y *mismatching*). Estas alteraciones influyen en el comportamiento del amplificador y por lo tanto en las prestaciones del *front-end*. Al alterar cada LNA de forma distinta obtenemos un patrón de radiación distinto del esperado, aunque la posterior combinación de las señales sea ideal. Nos centraremos en las diferencias en la fase y ganancia de las señales ya que esto repercutirá en la orientación de la antena matricial (Fig. 3) y otras características críticas del patrón de radiación.

Esta contribución presenta el estado actual de un trabajo fin de grado (TFG), así como el itinerario formativo seguido por el estudiante. El TFG consiste en llevar a cabo el flujo de diseño completo de un LNA en tecnología CMOS de 65 nm para banda X (8 GHz), utilizada para comunicaciones satelitales, y la caracterización estadística de este, observando las diferencias de fase y ganancia que se producen entre varias réplicas de LNA idealmente idénticos.

El documento se estructura en 6 secciones, contando con esta primera como introducción. En la segunda sección se detallan los objetivos y plan de trabajo del TFG. El desarrollo actual y los resultados esperados se describen en las secciones tercera y cuarta. En la quinta sección se detalla la experiencia del estudiante. Finalmente, en la última sección se presentan las conclusiones.

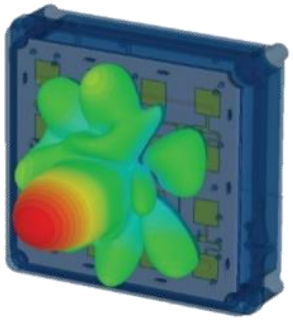


Figura 1: Antena activa matricial

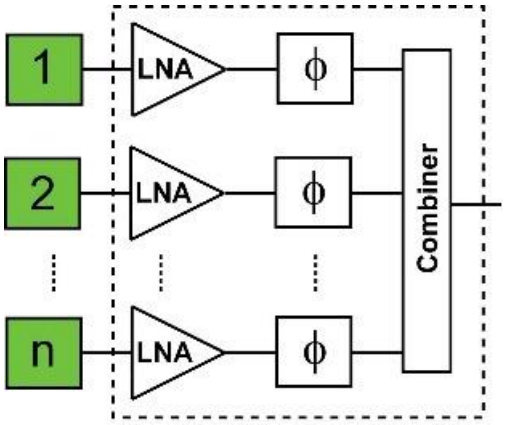


Figura 2: Front-end

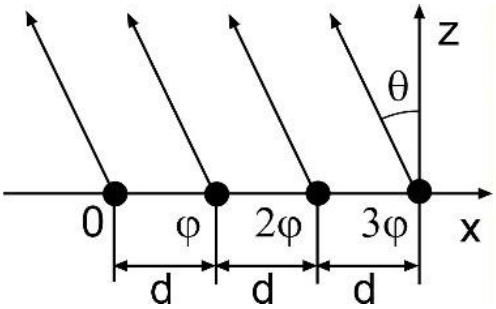


Figura 3: Fase y orientación

II. Objetivos y plan de trabajo

A. Formación

El primer objetivo del TFG es completar la formación del estudiante. Este trabajo es un primer acercamiento al mundo de la investigación, en el cual se aprende tanto a organizar y desarrollar un proyecto como a redactar y presentar los resultados obtenidos. Estos conocimientos son muy valorados en el ámbito profesional.

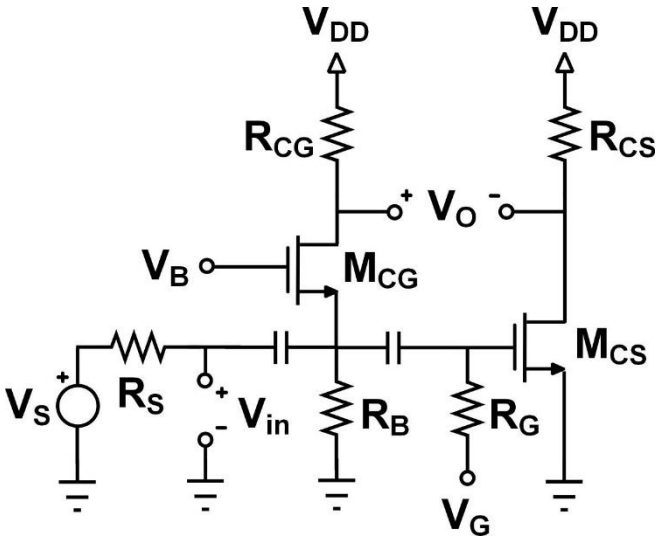


Figura 4: Esquemático LNA 5 GHz

Por otra parte, mediante la selección de asignaturas optativas, el estudiante se ha orientado en los últimos años de grado hacia el área de las telecomunicaciones y la electrónica. Este trabajo le permite profundizar más en el ámbito y darle cierta perspectiva de cómo utilizar los conocimientos adquiridos en el aula en un entorno más práctico.

Llevaremos a cabo la caracterización del LNA con la herramienta *Cadence Virtuoso*, por lo que el estudiante aprenderá a emplear un programa de diseño microelectrónico de carácter profesional y se familiarizará con él durante el desarrollo del TFG.

B. Proyecto

Respecto al contenido del TFG, el objetivo es diseñar un LNA en tecnología CMOS 65 nm para señales en la banda X (8 GHz) con unas prestaciones competitivas según la bibliografía existente (ganancia, ancho de banda, figura de ruido, impedancia, linealidad y consumo de potencia), para su uso en cadenas de recepción de antenas matriciales.

Estudiaremos también el comportamiento de este LNA bajo variaciones estadísticas que simulan el comportamiento de las alteraciones producidas en el proceso de fabricación (PVT y *mismatching*) mediante análisis estadístico. Al combinar señales de múltiples LNA es importante que cada LNA presente la misma ganancia y fase. Estudiaremos el impacto de estas variaciones en cada LNA por separado y en conjunto, especialmente en el error en ganancia y fase, con el objetivo de determinar la precisión en la orientación, la supresión de los lóbulos secundarios y la calidad de los nulos del patrón de recepción de la antena activa.

C. Plan de trabajo

Para asegurar el correcto desarrollo del trabajo proponemos dividirlo en varias etapas.

Primero, tomamos un diseño de LNA en 5 GHz conocido como referencia. Montamos un *test-bench* con el LNA, medimos las magnitudes de interés tanto nominales como bajo iteraciones estadísticas mediante Montecarlo y comprobamos que concuerdan con lo esperado. A continuación, montamos un *test-bench* con cinco réplicas de LNA de 5 GHz. De esta forma, podremos simular variaciones de *mismatch* y estudiar las diferencias entre réplicas de LNA.

TABLA I. RESULTADOS NOMINALES PARA LNA 5GHZ

	Valores
Ganancia (dB)	15.02
S_{21} (dB)	15.63
BW (GHz)	5.736
Fase (º)	–46.82
S_{21fase} (º)	–46.82
R_{in} (Ω)	50.61
S_{11} (dB)	–13.33
NF (dB)	3.562
IIP3 (dBm)	4.218
Pot. Consumo (mW)	5.297

TABLA II. RESULTADOS VARIACIONES DE PROCESO LNA 5GHZ

	Media	***Desviación Std.***
Ganancia (dB)	14.890	0.003
S_{21} (dB)	15.500	0.003
BW (GHz)	5.79	0.32
Fase (º)	–46.54	1.85
S_{21fase} (º)	–46.54	1.85
R_{in} (Ω)	50.71	1.50
S_{11} (dB)	–13.330	0.005
NF (dB)	3.58	0.12
IIP3 (dBm)	4.443	2.067
Pot. Consumo (mW)	5.32	0.63

TABLA III. RESULTADOS VARIACIONES DE *MISMATCH* LNA 5GHZ

	Media	***Desviación Std.***
Ganancia (dB)	15.020	0.0012
S_{21} (dB)	15.620	0.0010
BW (GHz)	5.737	0.010
Fase (º)	–46.81	0.006
S_{21fase} (º)	–46.81	0.006
R_{in} (Ω)	50.61	0.006
S_{11} (dB)	–13.330	0.0015
NF (dB)	3.562	0.005
IIP3 (dBm)	4.215	0.009
Pot. Consumo (mW)	5.299	0.033

Segundo, una vez que sabemos que tenemos un *test-bench* que funciona y en el que podremos estudiar el LNA de 8 GHz adecuadamente procederemos al diseño de este. Para ello, se parte de la arquitectura que mejor desempeño presentaba a 6 GHz en un trabajo anterior [4], e iremos rediseñando hasta alcanzar los 8 GHz. Primero con elementos pasivos ideales, y después con dispositivos integrables en la tecnología CMOS.

Por último, estudiaremos el comportamiento del LNA diseñado en el *test-bench* de simulación mediante el método de Montecarlo para conocer así el error en fase y ganancia que genera un *array* formado por múltiples réplicas del LNA diseñado.

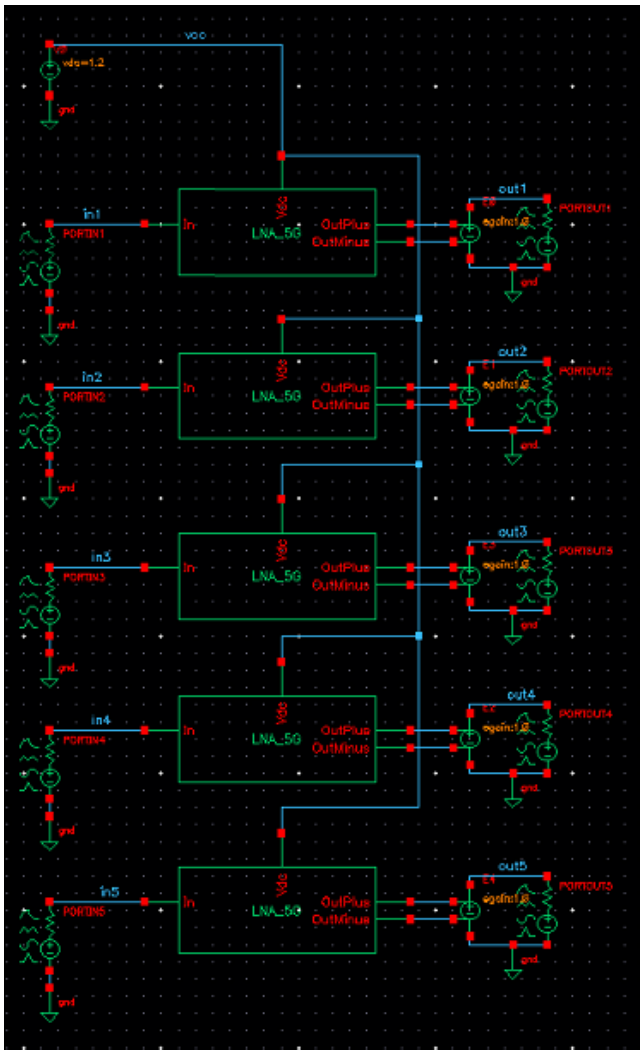


Figura 5: Cinco réplicas de LNA 5 GHz

III. Desarrollo actual

Actualmente solo se ha llevado a cabo el primer paso, es decir, la caracterización estadística de un LNA previamente diseñado para 5 GHz.

A. *Test-bench con un LNA 5 GHz*

Montamos la arquitectura conocida para 5 GHz (Fig. 4) y configuramos las resistencias de polarización y la anchura y tensión de puerta de ambos transistores con los valores óptimos conocidos.

Determinamos mediante simulación la ganancia, el ancho de banda y la fase mediante análisis de pequeña señal y comprobamos que la ganancia y la fase del parámetro S_{21} converge con estos. Determinamos también la potencia consumida, la impedancia de entrada, el parámetro S_{11}, la figura de ruido y el punto IIP3. Aquellas magnitudes que dependen de la frecuencia están evaluadas a 5 GHz. Esto se realiza primero de manera nominal (Tabla I) y luego con variaciones de proceso (Tabla II) y de *mismatch* (Tabla III). Los dos análisis estadísticos están realizados con 200 iteraciones cada uno. Podemos comprobar con variaciones de proceso los valores medios se alejan mucho más de los nominales y obtenemos una mayor incertidumbre que con variaciones de *mismatch*. Los valores son los esperados para así dar por válido el *test-bench*.

TABLA IV. Resultados variaciones de proceso cinco réplicas de LNA 5 GHz

	Media	***Desviación Std.***
$\Delta Gain_{1a2}$ (10^{-15} dB)	–2.132	21.94
$\Delta Gain_{2a3}$ (10^{-15} dB)	–0.577	19.94
$\Delta Gain_{3a4}$ (10^{-15} dB)	0.933	20.4
$\Delta Gain_{4a5}$ (10^{-15} dB)	0.826	21.21
$\Delta Fase_{1a2}$ (10^{-12} º)	–152.8	1350
$\Delta Fase_{2a3}$ (10^{-12} º)	107.1	1205
$\Delta Fase_{3a4}$ (10^{-12} º)	65.85	1335
$\Delta Fase_{4a5}$ (10^{-12} º)	–53.25	1654
Pot. Consumo (mW)	26.6	3.1

TABLA V. Resultados variaciones de *mismatch* cinco réplicas de LNA 5 GHz

	Media	***Desviación Std.***
$\Delta Gain_{1a2}$ (10^{-3} dB)	0.234	15.61
$\Delta Gain_{2a3}$ (10^{-3} dB)	–0.700	15.76
$\Delta Gain_{3a4}$ (10^{-3} dB)	1.882	16.37
$\Delta Gain_{4a5}$ (10^{-3} dB)	–1.511	17.08
$\Delta Fase_{1a2}$ (10^{-3} º)	–2.637	81.23
$\Delta Fase_{2a3}$ (10^{-3} º)	0.413	73.95
$\Delta Fase_{3a4}$ (10^{-3} º)	10.05	93.57
$\Delta Fase_{4a5}$ (10^{-3} º)	–15.32	88.18
Pot. Consumo (mW)	26.48	0.075

TABLA VI. Valores esperados LNA 8 GHz

	Objetivo
Ganancia	> 15 dB
BW	> 8 GHz
Figura de ruido (NF)	< 3 dB
Coeficiente de reflexión (S_{11})	< –10 dB
IIP3	> –10 dBm
Consumo	< 12 mW

B. *Test-bench con cinco réplicas de LNA 5 GHz*

Colocamos ahora cinco réplicas de LNA (Fig. 5). Lo que nos interesa de esta situación son las diferencias en fase y ganancia que se generan entre los LNA debido a las variaciones de proceso y *mismatch*. De nuevo los dos análisis estadísticos están realizados con 200 iteraciones cada uno.

Primero comprobamos que los resultados nominales para cada LNA son idénticos a los del *test-bench* con un LNA. A continuación, medimos las diferencias en fase y ganancia para cada par de réplicas de LNA, las cuales deberían ser idealmente nulas. Comprobamos que con variaciones de proceso (Tabla IV) obtenemos un error insignificante, sin embargo, con variaciones de *mismatch* (Tabla V) este error es significativamente mayor, tanto en su valor medio como en su desviación estadística. Comprobamos que si realizamos las mismas medidas en el caso nominal obtenemos valores del mismo orden que en el caso de variaciones de proceso, por lo que podemos asumir que se trata de algo numérico y que

efectivamente nuestro error en fase y ganancia viene determinado por las variaciones de *mismatch*. Centrándonos en estas variaciones podemos ver que la media tiende a cero y su desviación estándar es mucho mayor que el valor medio. En el estudio que estamos llevando a cabo lo importante es conocer la desviación estándar de estas diferencias entre réplicas de LNA ya que esta nos da el error en fase y ganancia de la primera etapa del *front-end*. Este mismo análisis lo haremos con más profundidad para el LNA de 8 GHz.

Con esto concluimos por tanto la primera parte del TFG ya que tenemos un *test-bench*, el cual conocemos su comportamiento y sabemos que es correcto, en el cual podremos analizar el LNA que diseñemos y por tanto los errores que surjan en la medida podremos asumir que son inherentes al circuito.

IV. Resultados esperados

Una vez que tengamos diseñado el LNA de 8 GHz repetiremos los mismos tests realizados en el LNA de 5 GHz. Primeramente, se anticipa que cada unidad de LNA presente el comportamiento esperado, es decir que tenga unos valores de ganancia, ancho de banda, figura de ruido, impedancia, linealidad y consumo de potencia adecuados para su uso en cadenas de recepción de antenas matriciales (Tabla VI).

Es especialmente relevante el ruido y la impedancia de entrada, ya que al recibir señales de muy baja potencia es importante que se produzca una reflexión no significativa en la entrada y se capte adecuadamente la señal. En nuestro caso, el LNA de 5 GHz no cumple el criterio de la figura de ruido, pero esperamos cumplirlo en el diseño del LNA de 8 GHz mediante una arquitectura diferente.

Una vez que verifiquemos el correcto despeño del LNA, procederemos a su caracterización estadística. Observaremos como las variaciones de *mismatch* afectan al error en fase y ganancia. De esta forma, en este TFG se estudian en profundidad las prestaciones del primer bloque de la cadena de recepción. Posteriormente, se comparará este error con los introducidos por elementos posteriores de la cadena electrónica en condiciones nominales, y a futuro, se podría estudiar el impacto de las variaciones de proceso y *mismatch* en toda la cadena receptora.

V. Experiencia como estudiante

Como alumno del Grado en Física [5] el estudiante ha dedicado los últimos años a orientarse a un ámbito más práctico y tecnológico como es la electrónica, con un especial interés en su aplicación a las telecomunicaciones, un área de gran impacto en la actualidad. Ha adquirido esta formación mediante asignaturas, prácticas y cursos que se detallan a continuación.

A. Asignaturas

Con la asignatura de "Microondas: Propagación y Antenas", descubrió las bases de la emisión de ondas y el funcionamiento de los *arrays* de antenas con la finalidad de conseguir diferentes orientaciones. Aprendió también la utilidad de las guías de ondas.

En "Caos y Sistemas Dinámicos No Lineales" se le enseñó la utilidad de las redes complejas y aprendió sobre sus diferentes estructuras, optimización de caminos e importancia de los nodos.

Con "Micro y Nano Sistemas" tuvo un primer acercamiento a los MEMS y a la electrónica del silicio. En "Electrónica Física" profundizó en este campo, centrándose en las ecuaciones que rigen el comportamiento de los principales elementos semiconductores, diodos y transistores.

Por último, se acercó al mundo digital en "Sistemas Digitales", donde aprendió sobre los transistores como base de las puertas lógicas, así como programación de microcontroladores.

B. Prácticas Externas

Realizó unas prácticas en el Grupo de Diseño Electrónico de la Universidad de Zaragoza [6]. Durante estas 100 horas pudo conocer la herramienta *Cadence Virtuoso* que está empleando para el desarrollo del TFG. Gracias a esta experiencia obtuvo nociones básicas sobre circuitos analógicos fundamentales como el inversor o el oscilador de anillo. También tuvo el primer contacto con los LNA.

Fue durante estas prácticas que el estudiante conoció la arquitectura empleada en la primera parte del TFG. Se le planteó un flujo de diseño mediante el cual tuvo que conseguir alcanzar los 5 GHz de ancho de banda manteniendo unas prestaciones competitivas de ganancia, ancho de banda, figura de ruido, impedancia, linealidad y consumo de potencia. Se enfrentó por primera vez a un proceso de este tipo por sí mismo, adquiriendo los conocimientos necesarios para el desarrollo de este TFG.

A raíz de este reto, más parecido al mundo real que lo aprendido en clase, el estudiante afianzó su interés en el área, ayudando a enfocar su futura carrera profesional al ámbito.

C. Cursos Cadence

Por último, llevó a cabo una serie de cursos [7] que completaron su familiarización con el programa empleado *Cadence Virtuoso*. Con estos cursos pudo aprender más detalladamente sobre el funcionamiento de la herramienta tanto de diseño de esquemáticos como de simulación. Los cursos son:

- *Virtuoso Schematic Editor* (20h)
- *Virtuoso Visualization and Analysis* (8h)
- *Spectre Simulator Fundamentals S1: Spectre Basics* (8h)
- *Virtuoso ADE Explorer and Assembler S1: ADE Explorer and Single Test Corner Analysis* (4h)
- *Virtuoso ADE Explorer and Assembler S2: ADE Assembler and Multi Test Corner Analysis* (8h)
- *Virtuoso ADE Explorer and Assembler S3: Sweeping Variables and Simulating Corners* (4h)
- *Virtuoso ADE Explorer and Assembler S4: Monte Carlo Analysis, Real-Time Tuning and Run Plans* (4h).

D. Plan formativo

El plan de trabajo llevado a cabo y la temática del TFG se han perfilado para fomentar la capacitación de pregraduados dentro de líneas de investigación del grupo de investigación [6], como circuitos analógicos CMOS para radiofrecuencia y ondas milimétricas, potenciadas en los próximos años por el PERTE de microelectrónica y semiconductores [8].

VI. Conclusiones

Este TFG, a pesar de no estar concluido, está por el momento cumpliendo correctamente con los objetivos enumerados anteriormente. El estudiante está adquiriendo los conocimientos necesarios para el correcto desarrollo del trabajo y los resultados ya obtenidos son satisfactorios.

Con la presentación del proyecto en el congreso TAEE, el estudiante podrá alcanzar un mayor nivel de madurez en sus capacidades dada la oportunidad de exponer y defender su TFG no solo en un ámbito académico sino también profesional, además de poder compartir conocimientos y experiencias con personas de referencia en el campo. Siendo, por tanto, una forma perfecta de contribuir a su especialización, alimentando su interés en seguir aprendiendo y formándose sobre tecnología, telecomunicaciones y electrónica, con la perspectiva de seguir en esta línea en Máster y doctorado.

Referencias

[1] G. Hueber and A.M. Niknejad, Millimeter-Wave Circuits for 5G and Radar, the Cambridge RF and Microwave Engineering Series, Cambridge University Press, 2019.

[2] R.J. Mailloux, Phased Array Antenna Handbook, 2nd ed., Artech House, 2005.

[3] Z. Wang, C. Cao, D. Chen and X. Li, "A X-Band Linearized LNA with Low Power Post-Distortion Technology," 2019 IEEE 6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (ISEMC), Nanjing, China, 2019, pp. 1-3, doi: 10.1109/ISEMC48616.2019.8986064.

[4] Alberto Arcusa Puente, “Diseño Monolítico de Amplificadores de Bajo Ruido con Inductores en Tecnología CMOS nanométrica en banda K”, TFM Universidad de Zaragoza, 2022

[5] https://ciencias.unizar.es/grado-en-fisica-0

[6] https://i3a.unizar.es/es/grupos-de-investigacion/gde

[7] https://www.cadence.com/en_US/home/training/all-courses.html

[8] https://planderecuperacion.gob.es/

Aplicación software para la monitorización de un laboratorio de tecnología fotovoltaica bifacial

J. Hidalgo-Peña, A. Garcia-Calabres, S. Moreno-Buesa, E. Muñoz-Cerón, J. Aguilera, J. de la Casa
Departamento de ingeniería Electrónica y Automática, Grupo de Investigación IDEA
Universidad de Jaén
Jaén, España
J. Hidalgo: jhp00012@red.ujaen.es

Abstract*— En calidad de Trabajo Fin de Grado para la titulación de Grado en Ingeniería Electrónica Industrial se ha desarrollado una herramienta software que facilita las tareas de monitorización y evaluación de un sistema fotovoltaico de 20kW que ha sido construido con fines científicos y con el propósito de contribuir a la caracterización de la tecnología fotovoltaica bifacial. La cantidad de variables implicadas en el proceso, hacen necesario el desarrollo de herramientas ad-hoc que faciliten y sincronicen la adquisición y almacenamiento de las variables medioambientales y resultados de operación del sistema. A lo largo del artículo se realiza una detallada descripción de todo el proceso elaboración, haciendo hincapié en los problemas e inconvenientes detectados, y como el estudiante los ha resuelto gracias a las competencias adquiridas en las asignaturas cursadas durante sus estudios de grado.

***Index Terms*—Monitorización sistemas fotovoltaicos, Aplicación software, Python.**

I. INTRODUCCIÓN

Las estadísticas de capacidad renovable 2024 publicadas por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) [1] muestran que en el año 2023 se alcanzó un nuevo récord anual en el despliegue de energías renovables en el sector eléctrico a nivel mundial ya que se pusieron en marcha 473 GW de potencia nominal. Este dato afianza la tendencia que ha seguido el mercado en la última década, apostando claramente por la implantación de este tipo de energías frente a las que se denominan como "no renovables". Las cifras indican que el 86% de la nueva capacidad de producción puesta en marcha durante el último año tiene origen renovable, destacando el crecimiento y el papel de la energía solar fotovoltaica, 345,5 GW en nuevas instalaciones, dato que permite asegurar que ya se ha alcanzado la cifra de 1,5TW fotovoltaicos instalados sobre nuestro planeta.

El sistema eléctrico español en absoluto es ajeno a esta tendencia. A finales del año 2023, y según datos de Red Eléctrica Española [2], de los 125,6 GW que conforman nuestro parque generador, 25,6 GW corresponden a potencia solar fotovoltaica (aproximadamente 5,6GW puestos en marcha en año 2023). La potencia fotovoltaica añadida al sistema eléctrico en red español se ha multiplicado por tres en el último lustro, suponiendo ya casi el 34% de la potencia renovable en España y todo ello sin incluir la multitud de instalaciones existentes en nuestro país, de pequeño y mediano tamaño, legalizadas en régimen de autoconsumo [3].

De lo descrito en los anteriores párrafos se infiere que, en la actualidad, las perspectivas laborales para graduados de niveles Meces 2 o 3 que se especialicen en la tecnología FV son muy halagüeñas. Con carácter anual IRENA [4] realiza un análisis del mercado laboral de las energías renovables que sirve de referencia para todo el sector. La última versión de este informe, publicado en septiembre de 2023, cuantifica en 13,7 millones el número de puestos de trabajos en mercado renovable para el año 2022. De todas las técnicas analizadas en este informe, destaca claramente la tecnología solar FV por su potencial de generación de empleo; así esta creó en 2022 casi 5 millones de empleos directos e indirectos en nuestro planeta, empleando a más de un tercio del total de la mano de obra dedicada a las energías renovables. Para 2050 se estima que trabajarán en el sector FV más de 15 millones de personas de los cuales más del 30% poseerán un perfil de formación altamente cualificado. Esta previsión se fundamenta en dos hipótesis: (1) la mayoría de los análisis indican que se seguirá invirtiendo más en energía solar fotovoltaica que en cualquier otra técnica de generación eléctrica por lo que cada vez se pondrán en operación más sistemas; (2) La potencia global instalada a nivel mundial, que se prevé superé los 10 TW para mediados de siglo, no solo generará un gran volumen de puestos de trabajo en las fases de fabricación de componentes, diseño, ingeniería y montaje de sistemas, también está provocando una alta demanda de profesionales especialistas en su operación, evaluación y mantenimiento de los sistemas ya ejecutados, especialmente en el sector de las grandes plantas.

Como fin último del trabajo que se presenta, se ha completado la formación integral de un futuro graduado en ingeniería en aspectos relacionados con la evaluación de sistemas fotovoltaicos en operación. Los resultados que se incluyen en esta comunicación tienen su origen en un Trabajo Fin de Grado realizado por un estudiante de Grado en Ingeniería Electrónica Industrial. Además, y entre las distintas opciones que se le ofrecen, ha decidido obtener su título con la mención en Sistemas Fotovoltaicos. Durante su proceso de formación, el estudiante ha cursado todas las asignaturas propias de la mención y, además, ha realizado prácticas curriculares y extracurriculares en un grupo de investigación que centra sus intereses en el campo de la ingeniería de los sistemas fotovoltaicos.

El objetivo principal del trabajo que se expone ha consistido en la realización de una aplicación software que, de modo síncrono, recopile y almacene en un fichero de texto plano las variables de operación de un sistema fotovoltaico de 20kW, implementado con tecnología bifacial, cuya finalidad principal es que sirva de laboratorio de investigación para la evaluación del funcionamiento de esta nueva tecnología emergente en el mercado. El citado laboratorio se integra dentro de un proyecto financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación dentro de la convocatoria de Proyectos de Generación de Conocimiento. Para una adecuada evaluación del rendimiento en condiciones reales de operación de un sistema fotovoltaico resulta imprescindible que el mismo sea correctamente monitorizado. La norma IEC 61724-1 [5] describe la terminología, equipos, variables a medir y métodos para su

monitorización y análisis. En algunos casos, como es el que nos ocupa, son múltiples los sensores y equipos que se encargan de la medida de los parámetros, tanto medioambientales como eléctricos, implicados en todo el proceso. Por otro lado, la norma también nos indica como debe ser el calendario de adquisición de datos y elaboración de informes, así como, los requisitos de los intervalos de muestreo y registro en función de la clase de sistema que se pretenda implementar. Evidentemente, el muestreo de todas las variables a registrar debe realizarse de la manera más sincrónica posible. La aplicación software, que se ha desarrollado en lenguaje PYTHON [6], comunica todos los equipos (instrumentación e inversores), utilizando diferentes puertos y protocolos, a un mini-pc industrial con sistema operativo Windows. Este último equipo, conectado a internet, es el encargado de generar y almacenar los ficheros en local y en la nube. Se prevé también que la aplicación envíe alarmas y/o informes de operación con carácter diario.

II. ANTECEDENTES Y DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA OBJETO DE ANÁLISIS

2.1 Descripción global del sistema fotovoltaico

En el marco del proyecto "Modelos optimizados para la caracterización energética de Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red de tecnología bifacial" (Código: PID2021-124161OB-I00), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España, dentro del programa de Proyectos de Generación de Conocimiento 2021, se está implementando en el Campus Científico Tecnológico de Linares un nuevo laboratorio de caracterización específicamente diseñado para el estudio e investigación de sistemas fotovoltaicos (FV) bifaciales **Fig. 1.** El sistema, que ha sido legalizado y conectado a la red como una instalación FV orientada al autoconsumo, cuanta con una potencia global de inversor de 20kW. El sistema está compuesto por cinco inversores trifásicos de 4 kW de potencia que cuentan con dos seguidores independientes del punto de máxima potencia (MPPT) cada uno de ellos. Esto nos permitirá, gracias al algoritmo independiente de MPPT por cada uno de los strings, evaluar configuraciones y punto de operación de los generadores FV hasta para diez configuraciones diferentes [7], [8], [9]. Con la puesta en marcha de este laboratorio se pretende realizar estudios sobre la influencia de la distancia entre filas en la generación de la tecnología solar bifacial. Así mismo se investiga el efecto de la orientación de los módulos en su degradación y generación (retrato o apaisado). Las diferentes configuraciones de los sub generadores **Fig. 2** que conforman cada uno de los strings permitirán, si se alcanzan los objetivos específicos propuestos en el proyecto, contribuir al desarrollo de la tecnología gracias a la propuesta de nuevos modelos de caracterización basados en inteligencia artificial y minería de datos [10], [11].

Fig. 1. Vista aérea de la instalación.

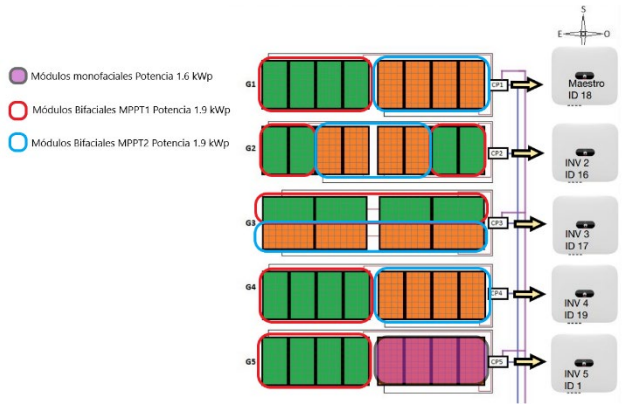


Fig. 2. Configuraciones de los sub generadores.

2.2. Elementos principales del sistema.

Se pasará a continuación a describir someramente los elementos principales que conforman el sistema y que son de importancia para argumentar la solución adoptada:

- Los generadores están conformados por dos tipos de módulos FV de igual tecnología de fabricación (HIT). Un primer modelo incorpora células y encapsulado que le otorgan características bifaciales **Exiom EX470-490HJT(B)-144(HC) (166) BF de 490 Wp** [12]. Un segundo modelo, cuenta con células bifaciales, pero con un encapsulado que lo convierte en monofacial **REC Alpha Pure-R Series de 410 Wp** [13]. El conjunto de todos los módulos nos proporciona una potencia pico de generador total de aproximadamente de 20kW.
- La etapa de potencia está compuesta por cinco inversores de la marca *Huawei* **SUN2000-3-10KTL-M1 (High Current Version) de 4 kW** [14]. Cada inversor cuenta con dos entradas independientes del MPPT. Se ha procurado que cada una de las etapas trabaje a tensiones y potencias similares para considerar uniformemente distribuido el efecto de las pérdidas por seguimiento del punto de máxima potencia. Con respecto a su bus de comunicaciones, estos inversores están conectados en cascada y con una configuración maestro-esclavo.

También se incorpora un sistema adquisición de datos de propósito general, concretamente un **Graphtec GL840**, que cuenta con pantalla y botones de ajuste para facilitar su configuración. Este equipo medirá y registrará todas las

variables eléctricas proporcionadas por los sensores que se distribuirán por el sistema.

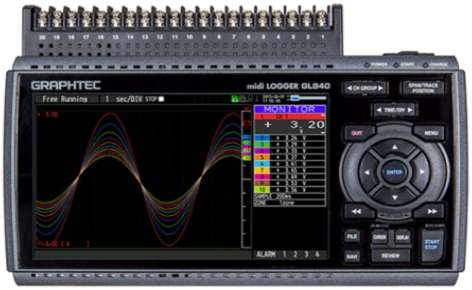


Fig. 3. Sistema de adquisición de datos usado.

2.3. Método de monitorización. Descripción de las variables ambientales y de operación registradas.

Explicados los componentes de la instalación, es de gran importancia comentar las variables que se van a monitorizar. Atendiendo a los distintos apartados de la norma IEC 61724:2022, han sido identificados los parámetros de mayor importancia para el estudio del laboratorio FV presentado [15], [16], [17]. Estos son:

- Irradiancia frontal y posterior en el plano horizontal no corregida espectralmente.
- Irradiancia frontal y posterior en el plano del generador no corregida espectralmente.
- Irradiancia posterior corregida espectralmente medida a diferentes alturas sobre la vertical, coplanar al plano posterior del generador y distribuida estratégicamente por diversos puntos de la instalación (cinco medidas en total).
- Temperatura ambiente.
- Temperatura de operación de módulo (cuatro medidas en total) estratégicamente distribuidas por los generadores.
- Tensión y corriente de operación en cada uno de los diez subsistemas.
- Potencia activa de salida de cada uno de los cinco inversores que conforman la instalación.

Asimismo, es necesario hacer una descripción de los sensores que se usan para la medida de los parámetros significativos del generador FV.

- Para la medida de la irradiancia corregida espectralmente en tiempo real de un sistema bifacial, la norma IEC 61724:2022 indica que será necesaria la existencia de sensores capaces de medir la irradiancia coplanar y horizontal de la cara anterior y posterior. Para ello se han usado siete células calibradas frente a piranómetro previamente en nuestros laboratorios de investigación. También se registrará irradiancia frontal y posterior no corregida espectralmente tanto en el plano del generador como en el plano horizontal. Para ello se utilizarán dos parejas de piranómetro-albedómetro **Fig. 4**. Concretamente, los piranómetros empleados son del modelo *SMP7* de *Kipp&Zonen*, mientras que el modelo de albedómetros es el *SMP3* del mismo fabricante.

Fig. 4. Sensores de irradiancia usados en la instalación.

- Con respecto al resto de parámetros ambientales, que según la norma IEC 61724:2022 son determinantes en el comportamiento del sistema FV, en una primera fase se medirán principalmente temperaturas (diferentes temperaturas de operación del módulo estratégicamente distribuidas y una medida de temperatura ambiente). El sensor utilizado en la medición de la temperatura es un termopar tipo T *RS PRO* **Fig. 5**, que, en conjunción con el sistema de adquisición de datos, presenta las características deseadas para cumplir los requisitos de precisión impuestos por las diferentes normas: ofrece tiempos de respuestas muy rápidos para intervalos de muestreo pequeños (mínimo 0.7 segundos), poseen flexibilidad para el buen conexionado en la parte posterior de los módulos bifaciales y siguen la norma IEC 60584. Además, cumple los requisitos del apartado 9.1 de la norma IEC 61724:2022 en cuanto a la resolución e incertidumbre de la medida. La localización de los termopares se da en la cara posterior como queda indicado en el apartado 9.1 de la norma IEC 61724:2022.

Fig. 5. Termopar tipo T *RS PRO.*

- Los parámetros eléctricos de operación de los distintos sub generadores serán medidos por los propios inversores. Suponiendo que los inversores siempre van a trabajar en el punto de máxima potencia del sub generador FV nos aseguramos que las medidas son fiables.

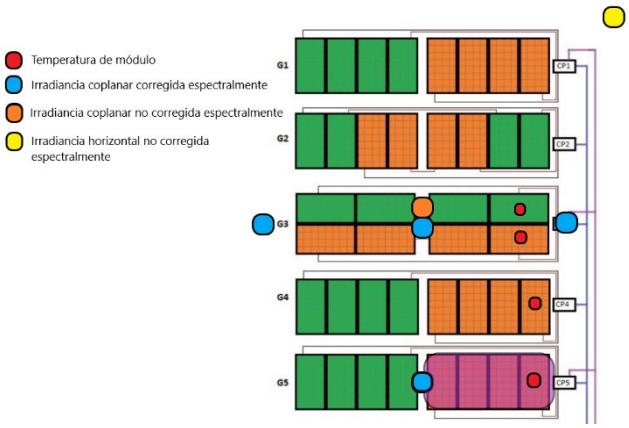


Fig. 6. Esquema simplificado de la ubicación de los sensores colocados.

2.4. Consideraciones previas al diseño de la aplicación software.

Previa a la descripción detallada de la potencialidad funcionamiento de la aplicación software es importante citar y explicar brevemente los distintos protocolos de comunicación del inversor y del sistema de adquisición de datos, para posteriormente describir la solución elegida.

- El inversor Huawei ofrece la opción transmitir y almacenar los datos de operación a una plataforma web propietaria *FusionSolar* [18] a través de conexión Ethernet o WIFI, de esa forma el cliente tiene una visión simplificada del funcionamiento en tiempo real y del histórico de su instalación. Uno de los principales inconvenientes que presenta esta opción es que los parámetros eléctricos son registrados cada 5 minutos, por tanto, no cumple con el intervalo mínimo de muestreo que se pretenden para esta aplicación concreta. Por otro lado, el inversor es capaz de comunicarse mediante *Modbus RTU* [19], este protocolo facilita la obtención de los datos de tensión, corriente y potencia, entre otros, pero presenta un problema. Debido a restricciones a nivel de software de los inversores, la comunicación *Modbus RTU* presenta interferencias que provocan algunos errores en la toma de datos, aunque son fácilmente corregibles. A pesar de ese inconveniente se consiguen tiempos de muestreo menores a 1 minuto, por tanto, son acordes según la norma IEC 61724:2022. De igual manera existe la posibilidad de usar *Modbus TCP* [20], que tiene las mismas características que *Modbus RTU* con la diferencia de que no es necesaria una conexión física entre el inversor y el PC que recepciona los datos.
- El sistema de adquisición de datos GL840 ofrece distintos protocolos y posibilidades de comunicación y de almacenamiento de datos. Este datalogger genera archivo de medidas en diferentes formatos en la memoria local, lo que facilita en gran medida la recogida de los datos medidos por parte del usuario, ya que el archivo es fácilmente entendible y es posible obtenerlo cuando se desea a través del software propio del instrumento de medida o del servidor FTP propio del equipo en caso de estar conectado a la misma red que el PC. También, es posible mantener una comunicación TCP entre el datalogger y un PC, de esta forma se pueden obtener los valores de los canales del sistema de adquisición de datos a través del protocolo SCPI [21]. Con el citado protocolo se pueden realizar operaciones de consulta al instrumento, lo cual simplifica la creación de un archivo de datos con el formato requerido.

2.5. Problemas que resuelve el presente trabajo fin de grado.

Conocidas las características de la instalación y del sistema de monitorización instalado, surge el problema en el que se enmarca este trabajo de fin de grado. Se ha realizado una aplicación software capaz de recopilar los datos de modo sincrónico procedentes de un sistema de adquisición de datos, así como de los inversores. Este software es capaz de recoger todos estos datos y guardarlos en un archivo de formato de texto plano, guardarlos en local y posteriormente a la nube, donde posteriormente, se realizarán herramientas para su análisis en tiempo real. Con este software se pretenden corregir varios problemas que se han detectado al trabajar con los distintos softwares propietarios de los equipos comerciales utilizados ya que esta opción presenta claras desventajas y/o inconvenientes:

- La falta de coordinación en las medidas de los diferentes instrumentos.
- Los formatos en los que los datos son recibidos a través de los distintos softwares propios del fabricante. Aunque en ocasiones los archivos sean del mismo tipo por ejemplo un fichero separado por comas, la arquitectura interna del archivo suele ser diferente. Esto complica en gran medida la automatización del tratado de los datos.
- En la mayor parte de las ocasiones no se cumple con los requisitos de intervalo de muestreo expuestos en la norma IEC 61724:2022.
- Se está expuesto a la posible desaparición de los fabricantes y consecuentemente a la falta de cobertura por parte del servicio al cliente.

III. Proceso de diseño de la aplicación software.

Una vez comentadas las características que presenta la instalación, así como sus componentes, se va a explicar cuál ha sido la solución adoptada y su proceso de diseño.

Como ya se ha comentado anteriormente, el objetivo principal del presente trabajo es el desarrollo de una aplicación software que simplifique el proceso de monitorización de un laboratorio para la caracterización de tecnología fotovoltaica bifacial. Los principales requisitos que debe cumplir la aplicación son:

- Que sea capaz de recibir los datos y parámetros eléctricos procedentes de los inversores y el sistema de adquisición de datos. Todos los datos deben de estar muestreados cada minuto como mínimo para así poder realizar un estudio correcto del funcionamiento de la instalación.
- Conseguir la independencia de los distintos softwares propios de los fabricantes del sistema de adquisición de datos e inversores.
- Crear un archivo de datos donde se almacene la información todo lo recogido de los distintos

instrumentos minuto a minuto, en el que se sincronicen todas las medidas.

- Que se genere un mensaje diario vía correo electrónico al propietario donde aparezca un resumen del funcionamiento de la instalación FV.

La arquitectura de monitorización propuesta es la que se muestra en la figura 7:

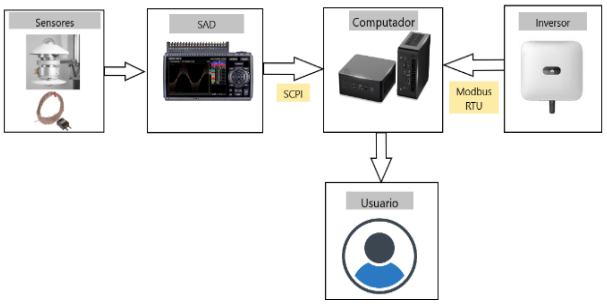


Fig. 7. Arquitectura de monitorización adoptada.

Pasaremos a continuación a describir con detalle la solución adoptada y el porqué de las decisiones tomadas a lo largo del desarrollo de la herramienta de gestión del sistema.

Primeramente, se debe comentar la elección del lenguaje de programación utilizado en la creación de la aplicación software, el lenguaje elegido ha sido *Python* [22]. Las principales características por las que es el lenguaje más adecuado para la realización de esta herramienta son: lenguaje sencillo y fácil de interpretar, gran modularidad y amplio repertorio de librerías capaces de simplificar en gran medida las instrucciones que se usarán en el script, además de aumentar su funcionalidad.

Como entorno de programación se ha elegido *Visual Studio Code*, este programa es ampliamente conocido por los programadores ya que tiene la cualidad de aceptar gran parte de los lenguajes existentes [23]. Además, cuenta con un entorno de programación limpio y de fácil compresión con un código de colores agradable a la vista, así como ser capaz de albergar extensiones que facilitan las labores de programación y depurado del código.

También se considera imprescindible explicar cuáles son los métodos de comunicación seleccionados a la hora de realizar la recogida de datos y parámetros de la distinta instrumentación.

Para poder obtener los datos procedentes del sistema de adquisición de datos GL840 se seleccionó la opción de acceder a los registros de los canales mediante protocolo *SCPI* a través de una conexión *TCP* entre el datalogger y un *PC*. La elección del protocolo *SCPI* se ha basado en varios factores:

- El GL840 no soporta el protocolo *Modbus*, lo cual habría simplificado el código y reducido el número de librerías necesarias.
- El uso del protocolo *SCPI* simplifica en gran medida la posibilidad de sincronización entre el datalogger y los inversores. Ya que se obtendrán los valores de los canales activos siempre y cuando se soliciten y no cuando el sistema de adquisición de datos decida.
- El uso de este protocolo da libertad desde el punto de vista de la no dependencia de un software de terceros.
- Facilidad a la hora de aplicar constantes de calibración de los distintos sensores.

A la hora de obtener los parámetros eléctricos de los inversores se consideraron diversas opciones. La posibilidad de usar los datos obtenidos a través del software *FusionSolar* se descartó desde un principio al no cumplir con el intervalo mínimo de muestreo requerido según la norma IEC 61724:2022. En un primer momento se usaría *Modbus TCP* por la facilidad de codificación y fiabilidad de la conexión, pero se descartó por la necesidad de un equipo hardware de un elevado coste Huawei Smartlogger 3000A [24]. Finalmente, se seleccionó la opción de *Modbus RTU*, ya que era la única que cumplía con las necesidades suficientes para la realización de la herramienta software.

Una vez seleccionado el protocolo de comunicación, se procedió a la conexión del inversor con el PC mediante conexión USB, para ello fue necesaria la implementación de un conversor *RS485* **Fig. 8.** a la salida del puerto de comunicaciones del inversor y la entrada USB del ordenador.

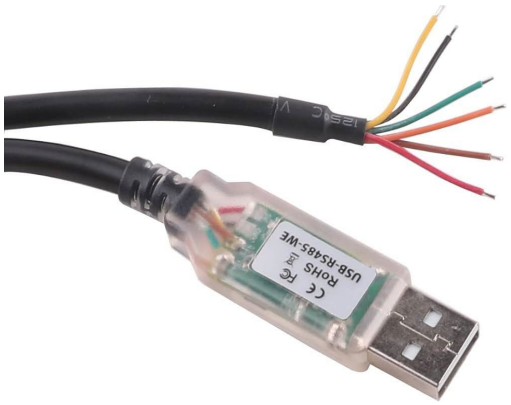


Fig. 8. Conversor Rs485 a USB

Para la correcta instalación del conversor es necesaria su conexión en el puerto de comunicaciones del inversor maestro, para ello, se estudió el mapa de conexiones del mismo. Toda esta documentación e instrucciones están disponibles en los manuales correspondientes al modelo de inversor. Se consultó a su vez la hoja de características del conversor RS485 [25], para identificar los cables necesarios para conectar correctamente el inversor, los cuales son: *naranja (data +), amarillo (data -) y negro para la conexión a tierra y evitar interferencias.*

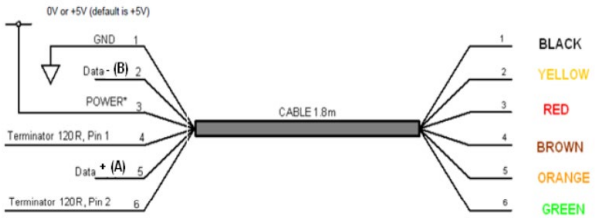


Fig. 9. Esquema de conexiones del conversor RS485.

Una vez identificado el código de colores para el conversor **Fig. 9**, es necesario identificar los pines del puerto de comunicación responsables de la comunicación *Modbus*

RTU. Esto es fácilmente reconocible en el manual del inversor [26].

Pin	Definición	Funciones	Comentarios	Pin	Definición	Funciones	Comentarios
1	485A1-1	RS485A, señal diferencial RS485 con signo positivo	Se utiliza para conectar en cascada el SUN2000 o conectarse al puerto de señal RS485 de SmartLogger	2	485A1-2	RS485A, señal diferencial RS485 con signo positivo	Se utiliza para conectar en cascada el SUN2000 o conectarse al puerto de señal RS485 de SmartLogger
3	485B1-1	Señal diferencial RS485 con signo negativo		4	485B1-2	Señal diferencial RS485 con signo negativo	
5	PE	Puesta a tierra de protección	-	6	PE	Puesta a tierra de protección	-

Fig. 10. Tabla de definición de pines de comunicación.

De la tabla de definición de pines de comunicación anterior **Fig. 10**, se llega a la conclusión de que los pines necesarios para la conexión del conversor al inversor son: pin *1 (data +), pin 2(data -) y pin 13 (tierra).*

Ya distinguidas las conexiones, es necesario desmontar el puerto de comunicaciones del inversor para realizar la conexión física entre conversor *RS485* e inversor, esto viene explicado en el mismo manual de usuario **Fig. 11**.

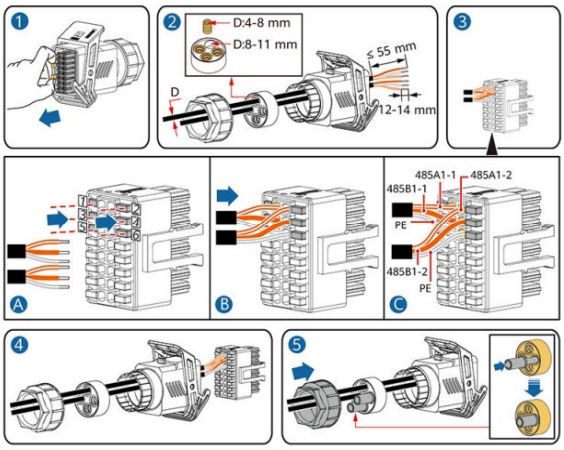


Fig. 11. Proceso de conexión del puerto de comunicaciones del inversor

Una vez se han determinado los diferentes tipos de comunicación a través de los cuales se van a obtener los parámetros característicos de la instalación, se ha de decidir cuál va a ser el dispositivo encargado de gestionar todas estas comunicaciones. Para ello se tienen en cuenta varias opciones, entre las que destacan el uso de una *Raspberry Pi* o un *mini PC*.

- *Raspberry Pi.* Está diseñada para ser una plataforma de bajo costo y de tamaño reducido que puede ejecutar diversas aplicaciones informáticas.
- *Mini PC*. Es un computador tradicional, pero con un tamaño más reducido, pensado para un uso más industrial del mismo.

Se decidió utilizar esta última opción ya que la interfaz del mini PC con un sistema operativo Windows es más familiar al usuario medio. En él se instalaron los programas necesarios, así como los drivers encargados de la gestión del convertidor *RS485*, los cuales fueron descargados e instalados desde la página web del fabricante para no tener problemas de compatibilidad.

Con respecto a la estructura del código fuente encargado de la gestión de todos los instrumentos y registros indicar que se trata de una estructura básica del programa de pedida y guardado de datos. El programa se encarga de crear un fichero en formato '.csv', para posteriormente hacer la conexión, en primer lugar, con el datalogger. Esta disposición es la más eficiente ya que una vez realizadas las pruebas oportunas se identificó que el datalogger no presenta problema alguno a la hora de realizar la conexión y pedida de datos, teniendo una respuesta de los registros de los canales activos en menos de 1 segundo tras la solicitud. En cambio, a la hora de estudiar los datos recibidos por los inversores se detectó un problema, este es, que una vez se realiza la conexión con el inversor y se hace la pedida de datos, aleatoriamente algunos de los registros solicitados son recibidos con un valor de error. Esto se debe principalmente a 2 razones:

- Los inversores están restringidos a nivel de software para que el usuario compre el dispositivo capaz de mandar los registros a través de *Modbus TCP*.
- El uso de *Modbus RTU* por parte de los inversores está limitado a su uso para comunicación entre ellos mismos en configuración maestro-esclavo.

Para solucionar este problema se implementó un bucle de pedida de datos que comprueba que los registros procedentes del inversor no contienen ningún error y que, por tanto, son correctos para su guardado. Este bucle ralentiza el programa, pero se optimizó en posteriores versiones teniendo una duración media de 3 segundos para la correcta recepción de 30 valores procedentes de 6 registros en 5 inversores distintos.

Una vez corregido este imprevisto, se procedió a un test de la aplicación a lo largo de un día completo tras el cual se detecta otro problema añadido. Aunque el cliente Modbus de conexión con el inversor se cierre después de cada pedida de registros, llega un momento en el que el puerto serie se satura, siendo necesario un reinicio de la aplicación. Se probaron diversos cambios con la intención de solucionar este problema (cambiar velocidad de funcionamiento del puerto serie), pero esto no arregló el problema. Finalmente, para solucionar esto, se usó el programador de tareas existente en el sistema operativo *Windows*. De esta manera se consigue ejecutar y cerrar la herramienta software cada 5 minutos, de este modo, el puerto serie de recepción de datos se reinicia y no se llegan a tener los errores por saturación del mismo.

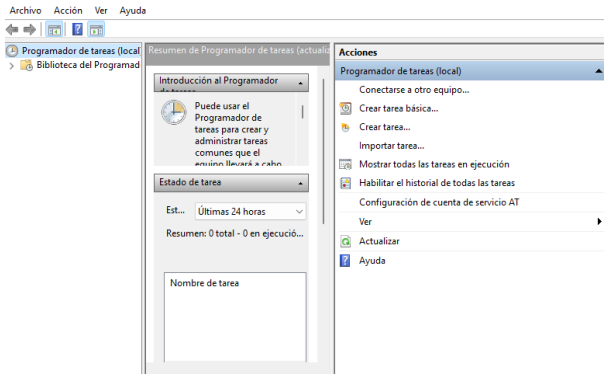


Fig. 12. Interfaz del programador de tareas.

Una vez obtenidos los datos se pasa al siguiente bloque dentro del programa, el guardado de los parámetros obtenidos. Para esto se crea una lista en la que los valores procedentes de los instrumentos serán almacenados. En

primer lugar, se almacenan los datos procedentes del datalogger, seguidos de los parámetros obtenidos de los registros de los distintos inversores. Una vez esta lista está completa, se procede a su almacenado en un archivo '.csv' creado anteriormente con nombre correspondiente a la fecha del día en el que se están tomando las medidas. Para el formato del nombre del archivo ha sido elegido el siguiente: 'AAMMDD.csv', derivando en que los diferentes ficheros aparecerán correctamente ordenados en la carpeta de guardado. En este archivo aparecerán los valores correspondientes a la monitorización de la instalación minuto a minuto.

Para concluir, el programa automáticamente mandará vía correo electrónico un resumen del funcionamiento diario del generador FV. En dicho resumen se muestra la energía generada a lo largo del día, tanto en la parte DC como AC, además, aparecerá una gráfica del perfil de potencia de la instalación.

Fig. 13. Ejemplo del correo recibido por la aplicación.

De esta manera finaliza la labor de la aplicación preparándose para volver a empezar a grabar datos al día siguiente.

IV. RESULTADOS OBTENIDOS HASTA LA FECHA.

Debido a que durante el estudio y desarrollo de la presente herramienta software, se ha detectado una falta de documentación y ejemplos de algún trabajo o investigación similar. Se ha decidido por parte de los creadores de esta aplicación, que la misma sea adjuntada en la plataforma *Zenodo* [27]. Esta plataforma se trata de un repositorio de acceso abierto de propósito general, que permite a los investigadores depositar artículos de investigación, conjuntos de datos, software de investigación, informes y cualquier otro dispositivo digital relacionado con la investigación. De este modo cualquiera tendrá acceso a ella y podrá utilizarla en sus investigaciones. Con esto se intenta fomentar la creación de softwares propios por parte de las instituciones educativas. La información será actualizada cada vez que se tengan nuevos resultados. Para localizar la herramienta bastará con hacer una búsqueda con el título del presente paper "Aplicación software para la monitorización de un laboratorio de tecnología fotovoltaica bifacial". Cabe destacar que la herramienta se encuentra sometida a actualizaciones cada cierto tiempo, por tanto, estas versiones serán adjuntadas en *Zenodo*.

Como se ha indicado anteriormente, la aplicación genera un archivo de datos separados por comas o '.csv'. Todos estos archivos se almacenan, tanto en el disco local como en *Google Drive,* permitiendo el acceso a los datos de forma remota.

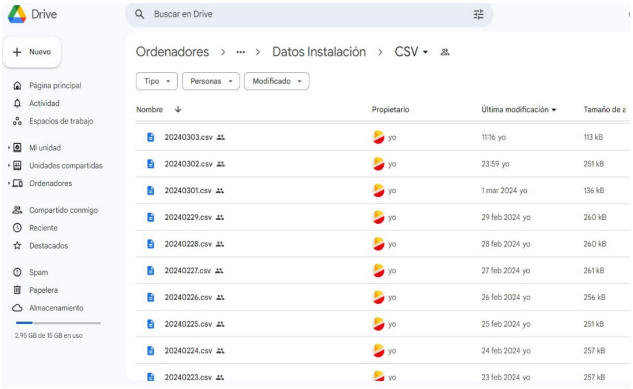


Fig. 14. Carpeta de datos diarios de la instalación.

Dentro de cada uno de estos archivos, se almacenan los parámetros obtenidos por la aplicación con una diferencia de 1 minuto entre medidas. Cada uno de los parámetros viene acompañado de una cabecera donde se indica el nombre y la unidad de medida del mismo. Si ejecutamos una separación de datos en columnas se obtiene un archivo de cómoda modificación y estudio, donde los parámetros eléctricos son fácilmente identificables y separables para cada uno de los MPPT del inversor.

Gracias a esta estructura de archivo, los cálculos y gráficas típicas para el estudio e interpretación de los sistemas FV se convierten en tareas sencillas. Además, los archivos generados tienen una disposición que se presta al posterior tratamiento por parte de cualquier software generado para tal fin. Finalmente se muestran varias gráficas de ejemplo para un día típico de funcionamiento de la instalación FV.

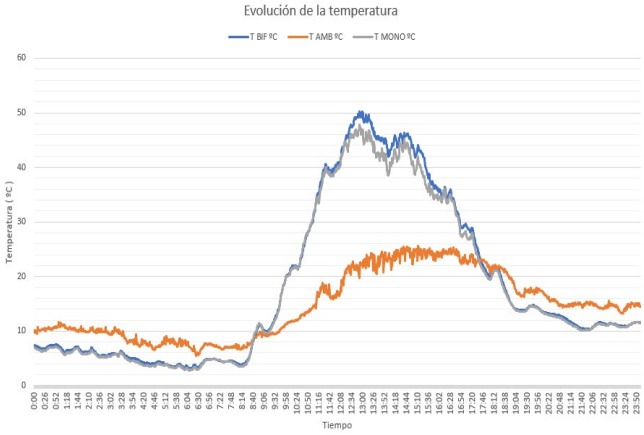


Fig. 15. Evolución de la temperatura medida en la instalación.

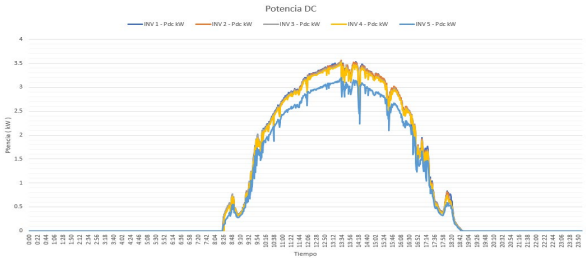


Fig. 16. Curva de potencia para un día concreto

V. COMPETENCIAS EDUCATIVAS ADQUIRIDAS POR EL AUTOR PRINCIPAL DEL TRABAJO (*RELATADAS EN PRIMERA PERSONA*).

Ya que se ha explicado el trabajo realizado, así como todo lo estudiado para su realización, es hora de relacionar todo lo aprendido a lo largo de su elaboración con los conocimientos adquiridos a lo largo de mis años de estudio en la *Universidad de Jaén*.

Si bien es cierto que ha sido necesario un estudio minucioso de las características de los dispositivos implicados, así como una profunda investigación de los diferentes métodos de comunicación, todas estas labores han sido simplificadas en gran parte gracias a los conocimientos adquiridos en diferentes asignaturas del grado en ingeniería electrónica industrial.

En primer lugar, atendiendo a las necesidades del proyecto en materia de programación, se encuentra una clara relación con las asignaturas de *Informática* [28] e *Informática* [29] *industrial*. Gracias a lo estudiado y a las competencias adquiridas en estas materias, la labor de aprendizaje del lenguaje de programación *Python* ha sido simplificada en gran medida. Esto se debe a que en esas asignaturas desarrollé un pensamiento lógico y adquirí la capacidad de programar en diferentes lenguajes, siendo fácil de extrapolar estos conocimientos a otros tipos de programación.

En segundo lugar, creo que es importante recalcar la importancia de otras asignaturas como *Automática industrial* [30] y *Control por computador* [31]. En las que aprendí sobre métodos de programación y protocolos de comunicación, lo cual es otro de los pilares en los que se basa mi trabajo de fin de grado. Es especialmente mencionable la capacitación profesional adquirida en la materia de *Control por computador*, ya que me ayudó a relacionar los conocimientos procedentes de las asignaturas propias de programación con su uso en aplicaciones industriales.

Por último, tengo que hacer hincapié en la mención que he realizado a la hora de finalizar mis estudios. Se trata de la mención de sistemas fotovoltaicos, en esta mención aparecen 4 asignaturas las cuales han hecho que mi interés por esta tecnología se vea catapultada, animándome a realizar el trabajo de fin de grado con el *Grupo de Investigación IDEA*. De este grupo de asignaturas aprendí diferentes vías del estudio de los sistemas FV. En la asignatura de *Tecnología eléctrica* [32]obtuve competencias a la hora de diseñar y dimensionar el cableado y protecciones de una instalación FV. Con la materia de *Instalaciones FV* [33]aprendí sobre el dimensionado de un generador FV, así como los métodos de diseño de los sistemas de autoconsumo FV. Por otro lado, las competencias del funcionamiento a nivel interno de los módulos FV, así como la composición interna de los inversores y reguladores de carga, se estudió en *Electrónica aplicada a los sistemas FV* [34]. Para finalizar con las asignaturas de la mención correspondiente, tenemos *Gestión y mantenimiento de sistemas FV* [35]. Esta materia es la principal responsable de mi entusiasmo a la hora de estudiar la tecnología fotovoltaica, de ella aprendí cómo se trabaja a la hora de investigar el funcionamiento de sistemas FV, como se procede en una auditoría técnica de una planta FV y sobre todo cómo usar correctamente las diferentes normas a la hora de caracterizar un generador FV.

Además de realizar las materias correspondientes a la mención, también realicé las prácticas curriculares en el *Grupo de Investigación IDEA*, donde seguí formándome como ingeniero, aprendiendo a trabajar en equipo y enfrentándome a los diferentes retos que se encuentra un ingeniero en su vida profesional.

Siendo de agradecer el ímpetu puesto por todos mis profesores a la hora de transmitir sus conocimientos y formarme a lo largo de mis estudios en la *Universidad de Jaén.*

VI. CONCLUSIONES

En el presente artículo se han mostrado las principales características de una aplicación software que facilita las tareas de monitorización y evaluación de un sistema fotovoltaico de 20 kW, que ha sido construido con fines científicos y con el propósito de contribuir a la caracterización de la tecnología fotovoltaica bifacial.

Este software puede ser utilizado para distintos propósitos, aunque principalmente su funcionalidad se basa en la investigación FV, también es posible su implementación en asignaturas de la mención en sistemas FV, así como en diferentes materias de los másteres relacionados con la tecnología FV [36]. Se cree firmemente que en un mundo donde la cantidad de información recibida va en aumento, es necesario que se estudien diferentes vías a través de las cuales obtenerla. Por tanto, el estudio por parte de las universidades de aplicaciones similares a la realizada en este artículo, darán un aumento de posibilidades profesionales a los estudiantes.

La aplicación software para la monitorización de un laboratorio de tecnología fotovoltaica bifacial, lleva en funcionamiento varios meses en el Grupo de Investigación IDEA de la Escuela Politécnica Superior de Jaén. A lo largo de este tiempo se ha demostrado su funcionalidad en el campo de la investigación, habiendo recogido datos de la instalación FV para su posterior caracterización.

REFERENCES

[1] I. Renewable Energy Agency, *RENEWABLE CAPACITY STATISTICS 2024 STATISTIQUES DE CAPACITÉ RENOUVELABLE 2024 ESTADÍSTICAS DE CAPACIDAD RENOVABLE 2024 About IRENA*. 2024. [Online]. Available: www.irena.org

[2] Red eléctrica española, “Red eléctrica española.” [Online]. Available: https://www.sistemaelectrico-ree.es/informe-del-sistema-electrico/generacion/potencia-instalada

[3] PILAR SÁNCHEZ MOLINA, “La necesidad de un registro único de autoconsumo en España,” 2024. [Online]. Available: https://www.pv-magazine.es/2024/01/31/la-necesidad-de-un-registro-unico-de-autoconsumo-en-espana/

[4] I. Renewable Energy Agency, *Renewable energy and jobs: Annual review 2023*. 2023. [Online]. Available: www.irena.org

[5] I. E. Commission, “Photovoltaic System Performance – Part 1: Monitoring (IEC 61724-1, Edition 2.0, 2021-07),” *CENELEC*, 2021.

[6] P. S. Foundation, “The Python Tutorial — Python 3.9.5 documentation,” Www.Python.Org.

[7] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *2021 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON) : 6-9 Dec. 2021.*

[8] L. Fernando, A. Realpe, G. Andrea, R. Palechor, A. Felipe, and S. Pino, “Implementation of MPPT algorithms in a charge controller for a cooling prototype with Peltier cells.” [Online]. Available: https://orcid.org/0000-0003-3342-0776

[9] T. Esram and P. L. Chapman, “Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007, doi: 10.1109/TEC.2006.874230.

[10] X. Sun, M. R. Khan, C. Deline, and M. A. Alam, “Optimization and Performance of Bifacial Solar Modules: A Global Perspective.” [Online]. Available: https://nanohub.org/tools/pub

[11] L. B. Kreinin, A. Karsenty, D. Grobgeld, and N. P. Eisenberg, “PV systems based on bifacial modules: Performance simulation vs. design factors,” *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, pp. 1–4, 2016, [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:6117597

[12] “EX470-490HJT(B)-144(HC) (166) BF HJT TECHNOLOGY CELL N-TYPE 25 AÑOS GARANTIA DE PRODUCTO / 25 YEARS PRODUCT WARRANTY.”

[13] “DATOS GENERALES.” [Online]. Available: www.recgroup.com

[14] “Circuit Diagram Battery Ready Plug & Play battery interface 2 Efficiency Curve.”

[15] A. Schmid, G. Dülger, G. Baraah, and U. Kräling, “IV MEASUREMENT OF BIFACIAL MODULES: BIFACIAL VS. MONOFACIAL ILLUMINATION.”

[16] J. Pedro and S. Montero, “REQUISITOS DE MEDIDA Y CALIBRACIÓN EN INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS IEC 61724-1: Part 1-Monitoring.”

[17] M. Gostein *et al.*, “Measuring Irradiance for Bifacial PV Systems: Preprint.” [Online]. Available: https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/80281.pdf.

[18] Huawei Solar, “FusionSolar.” Accessed: Mar. 27, 2024. [Online]. Available: https://eu5.fusionsolar.huawei.com/

[19] “An Introduction to Modbus RTU Addressing, Function Codes, and Modbus RTU Networking Overview Let’s Break Down Modbus RTU.”

[20] Modbusorg, “MODBUS Messaging on TCP/IP Implementation Guide V1.0b Modbus Organization,” 2006. [Online]. Available: http://www.Modbus.org

[21] B. Aravind Balaji, S. Sasikumar, and K. Ramesh, “SCPI based integrated test and measurement environment using LabVIEW,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1045, no. 1, p. 012036, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1045/1/012036.

[22] C. Holguín, Y. Díaz-Ricardo, and R. Antonio Becerra-García, “Ciencias Holguín, Revista trimestral, Año XX, abril-junio 2014 El lenguaje de programación Python/The programming language Python Ivet Challenger-Pérez”, [Online]. Available: http://www.linuxjournal.com/article/2959

[23] B. Johnson, “Introducing Visual Studio Code,” 2019, pp. 1–12. doi: 10.1002/9781119588238.ch1.

[24] “SmartLogger3000A (1)”.

[25] “Future Technology Devices International Ltd USB to RS485 Serial Converter Cable Datasheet,” 2010.

[26] “SUN2000-(3KTL-10KTL)-M1 User Manual,” 2020. [Online]. Available: https://e.huawei.com

[27] “Zenodo.org.” Accessed: Mar. 27, 2024. [Online]. Available: https://zenodo.org/

[28] Universidad de Jaén, “Guía docente Informática.” [Online]. Available: https://uvirtual.ujaen.es/srv/es/informacionacademica/catalogoguiasdocentes/p/2023-24/4/134A/13411008/es/2023-24-13111008_es.html

[29] Universidad de Jaén, “Guía Docente Informática industrial”, [Online]. Available: https://uvirtual.ujaen.es/srv/es/informacionacademica/catalogoguiasdocentes/p/2023-24/4/131A/13112014/es/2023-24-13112014_es.html

[30] Universidad de Jaén, “Guía docente Automática industrial.” [Online]. Available: https://uvirtual.ujaen.es/srv/es/informacionacademica/catalogoguiasdocentes/p/2022-23/4/131A/13112002/es/2022-23-13112002_es.html

[31] Universidad de Jaén, “Guía docente Control por computador.” [Online]. Available: https://uvirtual.ujaen.es/srv/es/informacionacademica/catalogoguiasdocentes/p/2023-24/4/131A/13112004/es/2023-24-13112004_es.html

[32] Universidad de Jaén, “Guía docente tecnología eléctrica.” [Online]. Available: https://uvirtual.ujaen.es/srv/es/informacionacademica/catalogoguiasdocentes/p/2023-24/4/131A/13113014/es/2023-24-13113014_es.html

[33] Universidad de Jaén, “Guía docente Instalaciones FV.” [Online]. Available: https://uvirtual.ujaen.es/srv/es/informacionacademica/catalogoguiasdocentes/p/2023-24/4/131A/13113005/es/2023-24-13113005_es.html

[34] Universidad de Jaén, “Guía docente Electrónica aplicada a los sistemas FV.” [Online]. Available: https://uvirtual.ujaen.es/srv/es/informacionacademica/catalogoguiasdocentes/p/2022-23/4/131A/13113003/es/2022-23-13113003_es.html

[35] Universidad de Jaén, “Guía docente Gestión y mantenimiento de sistemas FV.” [Online]. Available: https://uvirtual.ujaen.es/srv/es/informacionacademica/catalogoguiasdocentes/p/2023-24/4/131A/13113004/es/2023-24-13113004_es.html

[36] J. De La Casa, M. Fuentes, J. V Muñoz, D. L. Talavera, G. Nofuentes, and J. Aguilera, “Herramientas para la docencia de créditos prácticos en asignaturas directamente relacionadas con la energía solar fotovoltaica.”

Sistema embarcado para automatização do manejo da irrigação em agricultura familiar

Ivanildo de Souza Maciel Júnior
Coordenação de Eletrônica
Instituto Federal de Sergipe
Aracaju, Brasil
ORCID: 0009-0000-9106-7590

Erik Gabriel Teles dos Santos
Coordenação de Tecnologia em análise e Desenvolvimento de Sistemas
Instituto Federal de Sergipe
Aracaju, Brasil
erik.santos093@academico.ifs.edu.br

Vinicius Cunha dos Santos
Coordenação de Tecnologia em análise e Desenvolvimento de Sistemas
Instituto Federal de Sergipe
Aracaju, Brasil
vinicius.santos082@academico.ifs.edu.br

Edson Barbosa Lisboa
Coordenação de Eletrônica
Instituto Federal de Sergipe
Aracaju, Brasil
edson.lisboa@academico.ifs.edu.br

Inajá Francisco de Sousa
Depto. de Engenharia Agronômica
Universidade Federal de Sergipe
Aracaju, Brasil
inajafrancisco@academico.ufs.br

***Abstract*— A economia de água é mandatória em todos os setores. Sem este recurso a humanidade sofrerá danos incalculáveis. O emprego da automação e da IoT nos processos de irrigação, sobretudo na agricultura familiar, promove uma solução eficaz para a gestão sustentável da água e de energia. O manejo da irrigação, realizado por sistemas de automação de baixo custo, usando sensores e comunicação sem fio, fornecerá dados ao usuário, que via dispositivos móveis, possibilitará uma irrigação eficiente e customizada. Essa abordagem conservará água, promovendo a sustentabilidade e a produtividade das pequenas propriedades.**

Keywords*— *Sustentablidade, IoT, irrigação, automação, agricultura.

I. INTRODUÇÃO

O conceito de sustentabilidade, derivado do termo latino "sustentare", que significa sustentar, conservar em bom estado e resistir, tem sido amplamente adotado desde sua introdução em 1980 no The World Conservation Strategy [1] .

Ao longo dos anos, esse conceito foi cada vez mais integrado às dimensões ambientais, econômicas e sociais. Estudos Kerr [2] enfatizam o foco da sustentabilidade no bem-estar social, enquanto Robins [3] destaca como objetivos: proteção dos recursos naturais, melhoria da qualidade de vida humana e crescimento econômico.

O desenvolvimento sustentável requer consideração dos aspectos ambientais, sociais e econômicos, formando o tripé da sustentabilidade que conecta o crescimento econômico aliado ao desenvolvimento social e ambiental. A falta de atenção a esses elementos compromete a legitimidade do termo "sustentabilidade" ou "desenvolvimento sustentável", conforme apontado por Sachs [4].

De acordo com o relatório da Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA) de 2022 [5] , é na irrigação que se tem o maior uso da água, correspondendo à metade da água retirada no País, tendo o setor da agricultura irrigada uma demanda que vem apresentando uma crescente elevada ao longo dos anos. Desta forma, sendo um recurso natural essencial à vida na Terra a adoção de critérios técnicos e práticas sustentáveis para o manejo da água de irrigação, visando aumentar a eficiência no seu uso e reduzir os impactos ambientais deve ser empregada.

Para um manejo adequado da irrigação, o volume de água que deve ser disponibilizado não pode estar além da necessidade da planta, a fim de se evitar a erosão, o adensamento, a perda de nutrientes, a poluição dos recursos hídricos, além de trazer doenças para a plantação. Já uma irrigação insuficiente pode provocar a morte da planta.

A execução de um processo de irrigação controlado e automatizado trará uma maior produtividade e menor desperdício de água.

Uma forma para se ter o controle é a implantação de sensores de umidade diretamente no solo para que se possa obter a disponibilidade hídrica das plantas e ser definido o volume correto de água a ser aplicado para uma determinada cultura. Uma outra forma é através da obtenção de dados meteorológicos que possam indicar e contribuir para a definição do volume de água a ser aplicado. Em ambos os casos é a partir de um modelamento matemático que será obtido o quantitativo de água necessário para a irrigação.

O uso da tecnologia, empregando-se dispositivos eletrônicos e sistemas de computação, resultará para o processo de manejo da irrigação tanto uma melhoria da efetividade como uma redução do consumo de energia elétrica e de água.

O avanço da tecnologia vem provocando diversas transformações em todos os setores. Na agricultura não é diferente, onde se observa uma evolução ao longo dos anos que vem tendo um destaque devido ao nível de atualizações que vêm sendo obtidas.

O uso de soluções que empregam a internet das coisas (IoT) em problemas agrícolas traz aumento da produtividade. O uso de sensores tem como objetivo verificar o estado atual da cultura, através da medição de informações do solo, além de poder mapear toda a área de plantio.

As tecnologias de IoT possibilitam a conexão de um sistema de irrigação aos dispositivos computacionais do agricultor, como por exemplo o smartphone, por meio da internet, permitindo o controle e monitoramento da irrigação em tempo real. Em geral, tecnicamente, essas tecnologias são arquiteturas baseadas em camadas capazes de conectar uma grande quantidade de dispositivos entre si, cada um com uma finalidade estabelecida [6].

Com o suporte da IoT, são desenvolvidos sistemas de irrigação inteligentes que apresentam grandes capacidades de processamento e de análise de dados. Um sistema baseado em IoT descrito por Podder et al. [7] utiliza sensores básicos de

umidade do ar e temperatura (DHT11) e umidade do solo e, de forma remota, executa o processo de irrigação. Um outro sistema desenvolvido por Rawal [8] na irrigação, usou informações de sensores de umidade do solo do tipo resistivo controlado pela plataforma do Arduino.

A eletrônica se encaixará nestas atividades com a utilização de plataformas de desenvolvimento baseadas em microcontroladores para o manejo automático de irrigação. Muitos trabalhos utilizam a plataforma do Arduino empregando diversos modelos, tais como o Arduino Uno e o Atmega. Outros utilizam o microcontrolador ARM7. O uso destas plataformas, em conjunto com placas eletrônicas de aplicação específica, possibilita que o agricultor receba informações do processo via GSM (Global System for Mobile Communications) ou bluetooth [9], [10], e [11].

Uma outra plataforma de hardware que tem sido empregada em sistemas de irrigação é a ESP32, que permite o armazenamento, em um sistema computacional de nuvem, das informações obtidas ao longo do processo, além de ser auxiliada pela inteligência artificial. Esta plataforma é bastante utilizada, onde por exemplo pode-se desejar monitorar a qualidade da água baseado em IoT [12].

Os processos que utilizam a irrigação inteligente e a IoT, controladas por plataformas baseadas em microcontroladores podem economizar mais da metade da água em comparação com uma irrigação sem ser automatizada [13].

De maneira geral, somando-se a todas as vantagens proporcionadas por um sistema automatizado, não apenas em termos de conservação de água e energia elétrica, ocorre um aprimoramento da sustentabilidade, estabelecendo uma sinergia entre as ações humanas e o ambiente natural. Portanto, a análise e o correto dimensionamento de um sistema computacional embarcado, no contexto da automação dos processos agrícolas, são úteis e necessários nos tempos atuais.

O projeto proposto nesta pesquisa será o de desenvolver um sistema embarcado de controle de irrigação de fácil utilização que será testado com dois tipos de medidas de controle para a execução do manejo da irrigação: uma usando sensores de umidade de solo para, de acordo com a medição da capacidade de campo, efetuar a irrigação quando necessário; e outro, empregando uma Application Programming Interface (API) de clima para obtenção da radiação solar e, usando equações matemáticas, calcular a Evapotranspiração para definição do volume de água a ser aplicado na irrigação. Toda esta tarefa será acompanhada pelo agricultor de forma remota, através de seu smartphone. Assim, um sistema automatizado e sustentável será alcançado, proporcionando aprimoramentos não apenas no aspecto ambiental, com a conservação de recursos hídricos e energéticos, mas também na elevação da excelência e eficiência do agricultor de pequena escala, fornecendo informações remotas acerca do processo de irrigação, resultando, consequentemente, em um aumento na sua qualidade de vida.

No projeto proposto, o trabalho será realizado com estudos das diversas áreas da eletrônica como da eletrônica digital, dos sistemas digitais, da eletrônica analógica no uso de amplificadores das medidas obtidas dos sensores, da instrumentação eletrônica, do conhecimento e uso das plataformas baseadas em microcontroladores. Além das aplicações que envolvem a eletrônica, será utilizada a informática, através do uso da linguagem de programação, para que remotamente o agricultor possa ter informações do campo em suas mãos. Trazendo para a parte didática, muitas das tarefas descritas serão desenvolvidas, sob supervisão, por alunos de curso de graduação e de curso técnico integrado em eletrônica e informática.

II. OBJETIVOS

O trabalho proposto tem como objetivo geral desenvolver um sistema embarcado, sustentável, para o manejo da irrigação que possa ser utilizado na agricultura familiar, possibilitando a otimização e economia de recursos hídricos e de energia, à medida que tende a proporcionar uma melhor qualidade de vida para o pequeno agricultor.

Para atingir o objetivo principal deste trabalho, foram estabelecidos objetivos específicos não apenas para contribuírem para o alcance dos resultados esperados, mas também promover o aprimoramento técnico da equipe envolvida, composta por estudantes dos cursos técnico, graduação e doutorado. Através das etapas intermediárias será obtido um amadurecimento técnico e ampliado o nível de aprendizado e de conhecimento de uma forma abrangente. Desta forma, os objetivos específicos definidos são:

- Modelar e testar protótipos de sistemas de vazão de água para gerar um aprendizado das variáreis relacionadas a fluxo e controle de água;
- Desenvolver um manejo de irrigação eficiente que opere aplicando um volume de água a uma pressão e vazão adequada e de acordo com o tipo do solo e a necessidade da cultura empregada;
- Projetar uma planta de controle de irrigação utilizando e testando diversos sensores de umidade do solo, otimizando o uso de água e energia;
- Elaborar uma metodologia para utilização de dados meteorológicos obtidos de API´s de clima para efetuar o cálculo da Evapotranspiração e realizar um manejo da irrigação de forma econômica, eficiente e eficaz;
- Implementar uma interface digital amigável e de fácil manuseio para que o pequeno agricultor possa ter informações do processo de irrigação da cultura empregada e de forma remota;
- Tornar o produtor de pequena propriedade apto a executar a irrigação de sua cultura com baixo desperdício de água e com o mínimo esforço possível.

III. METODOLOGIA

O trabalho tem sido desenvolvido com a participação de dois estudantes do curso superior em Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas, atuando na implementação de hardware e software. Ambos são ex-alunos do curso técnico integrado em eletrônica e já possuem experiência em projetos desde então. A avaliação do aprendizado dos estudantes está sendo conduzida de forma contínua, com análise dos problemas encontrados e discussões sobre possíveis soluções, além de apresentação de seminário com a participação de alunos e estagiários do curso de eletrônica, obtendo-se sugestões e gerando aprendizados para as partes.

Um diagrama de blocos do projeto proposto é mostrado na Fig. 1, indicando-se os elementos a serem empregados como sensores; sistema de aquisição de dados; plataforma de

controle baseada em um microcontrolador; conexão com a rede de comunicação de dados; irrigação com atuadores.

As informações obtidas dos sensores serão aplicadas a um sistema de aquisição de dados que será composto inicialmente por um circuito de tratamento de sinal, a fim de condicionar as informações colhidas a níveis controláveis, para posteriormente serem convertidas para o formato digital, ou usando um conversor analógico digital externo ou diretamente aplicado a uma plataforma computacional embarcada.

O sistema microcontrolador, que estará presente na plataforma computacional, fará todo o processo de controle e comunicação com o meio externo, através da aplicação e uso de outros elementos digitais ou analógicos como: memórias para o armazenamento dos dados necessários para o processamento; dispositivos de comunicação com o usuário para as tarefas de geração de relatório ou reconfiguração do sistema, usando uma rede de comunicação cabeada, ou sem fio; e atuadores para a realização da etapa de irrigação.

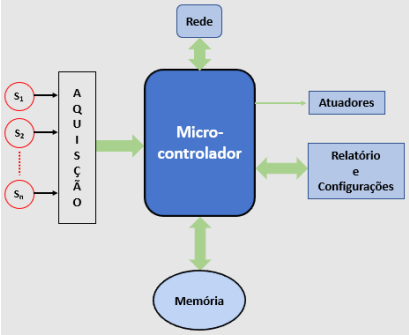


Fig. 1. Diagrama em Blocos de sistema a ser projetado

Para a execução deste projeto algumas fases são importantes: a delimitação e caracterização da área de irrigação; a análise, desenvolvimento e testes em laboratórios específicos; e testes e validação em campo (área de irrigação). Adicionalmente, uma atividade fundamental para o controle dos testes experimentais será o desenvolvimento de softwares específicos em cada uma das fases. Estas fases são detalhadas a seguir.

A. Delimitação e caracterização da área de estudo

O desenvolvimento do projeto será implantado para validação e testes de campo em dois locais diferentes de acordo com a fase do teste, sendo uma fase preliminar e outra final.

Os testes de campo da fase preliminar serão realizados em uma área do Campus Rural da Universidade Federal de Sergipe (UFS), localizado no município de São Cristóvão, estado de Sergipe, Brasil. A Fig. 2 mostra fotos da estrutura a ser utilizada com a área do plantio, reservatório e casa de bomba.

Os testes finais serão realizados no perímetro irrigado de Poção da Ribeira que fica localizado na zona agreste do estado de Sergipe, latitude 10° 47’ 5’’ sul, longitude 37° 24’ 44’’ Oeste, no município de Itabaiana/SE a pouco mais de 50 Km de Aracaju (Fig. 3).

O município de Itabaiana é considerado um grande centro produtor e distribuidor de hortigranjeiros. No perímetro são cultivadas diversas culturas como a batata-doce, alface, cebolinha, coentro, tomate, entre outras. A de maior destaque é a batata-doce devido a sua alta distribuição.

(a) (b) (c)

Fig. 2. Área de testes preliminares: (a) Terreno. (b) Reservatório. (c) Casa de bomba

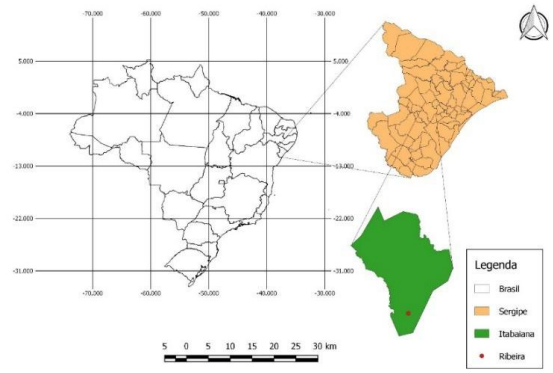


Fig. 3. Localização da Porção de Ribeira [14]

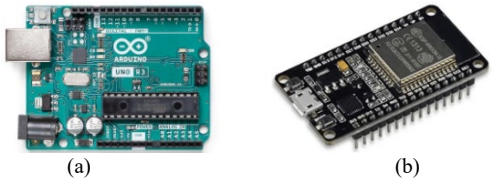
B. Análise, desenvolvimento e testes em laboratórios específicos

Esta fase foi subdividida em uma etapa de revisão bibliográfica e uma de desenvolvimento experimental.

A pesquisa bibliográfica abrange uma interdisciplinaridade ao investigar e examinar uma variedade de fontes. Ela se apoia em três pilares fundamentais: a automação eletroeletrônica na otimização dos processos de irrigação, a integração da IoT para reforçar a segurança ambiental e promover a sustentabilidade, e a implementação de tecnologia para a conservação e uso eficiente dos recursos naturais. As fontes de referência, provenientes de pesquisas de pós-graduação e artigos de revistas especializadas, são cuidadosamente selecionadas e mantidas atualizadas para embasar esse trabalho.

Na parte experimental estão sendo realizados diversos testes em laboratório com o objetivo de atingir a especificação final do sistema embarcado (hardware e software).

Para isso, estão sendo testados diversos componentes como: sensores de umidade do solo; bombas de água; solenoides; entre outros. Para o desenvolvimento do software está sendo empregado inicialmente a plataforma de desenvolvimento do Arduino Uno (Fig. 4a) e posteriormente será testada o uso do ESP32 (Fig. 4b).



(a) (b)

Fig. 4. Plataformas de desenvolvimento: a) Arduino Uno; b) ESP32

Nas rotinas implementadas, foram desenvolvidas etapas de temporização do uso da bomba, controlando, através de sua vazão, o volume de água liberada durante o processo de irrigação, e ainda será implementada a etapa de modelagem matemática para obtenção dos parâmetros necessários à irrigação e, assim, subsidiar o processo de automação, e etapas

de desenvolvimento de um sistema supervisório, possibilitando a interação do usuário, através da internet, com o sistema.

Os procedimentos experimentais estão sendo executados no Campus Aracaju do Instituto Federal de Sergipe e utilizam os laboratórios da coordenadoria de eletrônica com a participação de alunos de graduação do curso de desenvolvimento de sistemas e de alunos do curso técnico integrado em eletrônica. Estes testes envolvem a criação de modelos parciais de plantas eletroeletrônicas para a de definição de protótipos.

Nesta etapa de testes, estão sendo realizadas calibração e verificação da eficiência do sistema e a otimização do código desenvolvido com a plataforma do Arduino UNO. A Fig. 5 mostra, em diagrama de blocos, a planta do sistema de controle de vazão e liberação do volume de água.

Com o objetivo de avaliar seu desempenho e precisão, foram utilizados diversos arranjos para o sistema de controle de vazão. Durante os testes, variou-se o tipo e modelo da bomba e do sensor de fluxo, bem como a diferença de nível entre o reservatório e o medidor de volume. Em algumas medições, o reservatório foi posicionado acima do nível do medidor, permitindo que a bomba movesse a água a favor da gravidade. Em outras ocasiões, o reservatório foi colocado abaixo do nível do medidor de volume, resultando em um fluxo de água contrário à gravidade. Estes cenários são importantes devido as diferenças entre o nível do reservatório e a área irrigada nos campos.

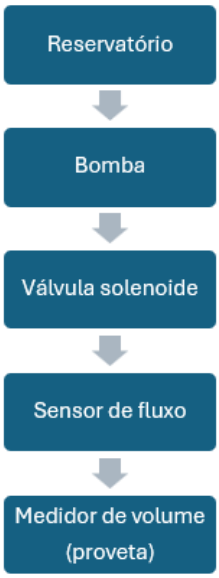


Fig. 5. Planta de controle do sistema de controle de volume de água

Para os tipos de bomba foram testados 3 modelos, e para os sensores de fluxo foram testados 2 modelos. Além da bomba e do sensor de fluxo foi utilizado também uma válvula solenoide, devido a verificar-se, após alguns testes, que algumas bombas, por não possuírem uma retenção de água interna, permitiam a continuação do fluxo de água no sentido reservatório para o medidor de volume, mesmo após o seu desligamento, quando o reservatório se encontrava em um nível acima da área irrigada. Os modelos, especificações e imagens dos componentes utilizados nesta fase são mostrados na Tabela 1.

TABELA 1. MODELOS, ESPECIFICAÇÕES E FOTOS DE BOMBAS E SENSORES DE FLUXO EMPREGADOS

Tipo	Especificações Técnicas	Foto
I. MiniBomba Submersa	- Tensão: 2.5 V a 6 V - Vazão : 1,3 a 2,0 L.min^{-1}	
II. Eletrobomba BF12	- Tensão: 12 V - Vazão: 1,8 L.min^{-1}	
III. Bomba	- Tensão: 12 V - Vazão : 3,8 L.min^{-1}	
IV. Sensor de fluxo de água	- Tensão: 5 V a 24 V - Faixa vazão: 1 a 60 L.min^{-1} - Pressão máxima: 1,75 Mpa	
V. Sensor de fluxo de água	- Tensão: 5 V a 18 V - Faixa vazão: 1 a 120 L.min^{-1} - Corrente máxima: 15 mA	
VI. Válvula Solenoide	- Tensão: 220 V - Frequência: 60 Hz - Vazão: 7 a 40 L.min^{-1} - Pressão: 0,2 a 8 kgf.cm^{-2}	

C. *Testes de campo*

Após a fase experimental em laboratório, será executada a fase de campo. Esta fase compreende duas etapas. A etapa preliminar será realizada no Campus Rural da UFS, onde serão testadas todas as implementações a seguir:

- Instalação e testes com os sensores de umidade;
- Desenvolvimento do código de programa para a execução da irrigação controlada pelos sensores de umidade do solo;
- Implementação do código de programa para a execução da irrigação com lâmina de água definida pelo cálculo da Evapotranspiração e de acordo com os dados obtidos da API;
- Determinação de eficiência do sistema com a comparação da lâmina de água definida pelo sistema com o real volume de água liberada na irrigação medida por hidrômetro;
- Elaboração e aplicação da interface para o acesso remoto ao sistema.

Nesta primeira etapa, a umidade do solo será definida através do uso de dois tipos de sensores: um projetado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e outro usando um sensor de umidade industrial da Watermark.

O sensor baseado no modelo da EMBRAPA, nomeado de Irrigás é mostrado na Fig. 6. Este sensor será confeccionado no próprio Instituto Federal de Sergipe (IFS).

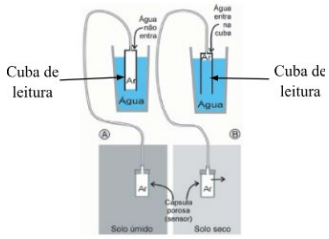


Fig. 6. Sistema de controle de irrigação Irrigás. Adaptada de Calbo e Silva [15]

O outro sensor de umidade a ser empregado é industrial da Watermaker mostrado do Fig. 7. Este sensor funciona indicando o nível de umidade do solo pela técnica de tensiometria. Os dois modelos de medição serão testados e comparados para se verificar a precisão do sistema de controle de irrigação operando com cada tipo de sensor.

Fig. 7. Sensor de umidade de solo da Watermark: https://www.agromercador.ag/sensor-watermark-de-umidade-do-solo-cabo-4-5m.html (acessado em Out. 15, 2023)

Em uma segunda fase do projeto será feito a irrigação através do cálculo da evapotranspiração. Será empregado uma API de clima que fornece dados meteorológicos de acordo com a posição geográfica indicada, além de gerar observações das últimas 24 horas.

Através dos dados obtidos pela API será calculado o valor da Evapotranspiração de referência (ETo) e da Evapotranspiração da cultura (ETc), através das equações definidas pela FAO56 [16], e determinado o valor da lâmina de água que deverá ser aplicada.

Por fim, o sistema passará por testes utilizando uma cultura específica, que será determinada posteriormente. Também será conduzida uma pesquisa de campo com a comunidade de agricultura familiar para realizar ajustes e melhorias no sistema, visando adaptá-lo às necessidades do público-alvo.

Após a conclusão técnica do projeto, será elaborado um manual abrangente de utilização do sistema para a comunidade, acompanhado de um programa de capacitação. Este programa incluirá treinamentos que visam garantir a utilização eficaz do sistema, com ênfase na automação do manejo da irrigação e sua importância.

D. Desenvolvimento dos softwares

A primeira versão do software desenvolvido tem como plataforma alvo o Arduino Uno. A Fig. 8 mostra um diagrama da plataforma e as conexões com os componentes para os testes em laboratório. além dos processos que são executados como a definição do tipo de ação de controle que pode ser temporizado ou por contagem. Nesta etapa a interface com o usuário foi feita pelo monitor serial que dará acesso as ações do processo.

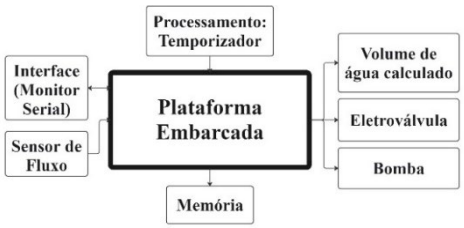


Fig. 8. Diagrama funcional do sistema

Na Fig. 9 tem-se um fluxograma do código elaborado para a execução dos testes. A dinâmica de execução tem início desligando-se a bomba e a válvula. Logo após, o usuário escolhe o tempo de irrigação e inicia o processo que aciona a válvula e liga da bomba, iniciando a irrigação durante o tempo definido previamente. Decorrido este tempo, o sistema desligará a bomba e a válvula finalizando a irrigação. Por fim, o sistema exibe, através do monitor serial, o valor do volume liberado e do fluxo medido pelo sensor de vazão.

IV. RESULTADOS ESPERADOS

A. Procedimentos de medição

Os resultados apresentados correspondem à etapa de definição dos protótipos, com os testes conduzidos de acordo com a configuração delineada no diagrama da Fig. 9.

Como descrito na metodologia, uma variedade de arranjos foi implementada para avaliar a precisão do sistema de controle e o desempenho do software desenvolvido.

As diversas modificações realizadas, envolvendo a troca de bombas, sensores de fluxo e a inclusão ou não da válvula solenoide, proporcionaram uma valiosa experiência para todos os envolvidos, incluindo alunos de graduação, alunos do curso técnico e aluno de doutorado. As discrepâncias nas medições serviram como oportunidade de aprendizado para toda a equipe, promovendo discussões em busca de soluções e correção dos problemas identificados.

Dos três tipos de bombas citadas na metodologia, apenas a bomba III não apresentou resultados satisfatórios quando efetuado a comparação dos valores do volume medido na proveta com o calculado pelo software através da obtenção da informação do sensor de vazão. Este problema ocorreu devido à baixa vazão gerada pela bomba, que se aproximava do valor mínimo da vazão permitida de 1 $L.min^{-1}$ do sensor de fluxo. Mas, mesmo assim quando foi analisado apenas o volume medido na proveta, os resultados apresentaram uma boa constância.

Devido ao fato da vazão mínima limitada pelos sensores de fluxo estarem gerando um resultado instável no volume calculado pelo software e, portanto não possibilitando a comparação entre as medidas de volume dos dois métodos de medição, os arranjos da planta foram limitados ao uso do sensor de fluxo de menor faixa de vazão, 1 a 60 $L.min^{-1}$, definido na Tabela 1 como componente IV.

Desta forma, para esta etapa de definição do protótipo e precisão do sistema, foram testados os seguintes arranjos da planta definida na Fig. 10:

- Arranjo 1 (AR1): Reservatório → Minibomba (I) → Solenoide (VI) → Sensor de fluxo (IV) → Proveta;
- Arranjo 2 (AR2): Reservatório → Eletrobomba (II) → Solenoide (VI) → Sensor de fluxo (IV) → Proveta.

Fig. 9. Fluxograma do código executado

Foram realizados testes adicionais com diferentes combinações utilizando a terceira bomba (Tipo III), o segundo sensor de fluxo (Tipo V) e com ou sem a inclusão da válvula solenoide. No entanto, devido aos problemas identificados, esses testes não puderam ser utilizados como resultados para a análise técnica do sistema, uma vez que apresentaram erros significativos. Entretanto, esses testes serviram como uma demonstração clara da importância de respeitar os limites dos componentes e proporcionaram uma valiosa oportunidade de aprendizado para toda a equipe.

No que diz respeito aos procedimentos conduzidos, cada arranjo foi submetido a 6 (seis) testes distintos, variando-se o período de vazão. Foram selecionadas 3 (três) durações de ativação da bomba, 10 s, 20 s e 30 s, e foram utilizados 2 (dois) modelos de diferença de níveis entre o reservatório e a proveta: um favorecendo a gravidade (AG) e outro contrariando-a (CG). No modelo "favorável", o reservatório foi posicionado acima do nível da proveta, enquanto no modelo "contrário", a proveta estava situada em um nível superior ao do reservatório.

Como forma de identificar os 6 (seis) tipos de configurações foi definida a seguinte nomenclatura: AR1-AG (Arranjo 1, a favor da gravidade); AR1-CG (Arranjo 1, contra a gravidade); AR2-AG (Arranjo 2, a favor da gravidade) e; AR2-CG (Arranjo 2, contra a gravidade). Para cada um dos arranjos foram testados 3 (três) tempos distintos T1 (10 segundos), T2 (20 segundos) e T3 (30 segundos).

A Fig. 10 mostra uma foto da planta real do sistema implementado. Em (a) no arranjo 1 com a minibomba e em (b) no arranjo 2 com a eletrobomba.

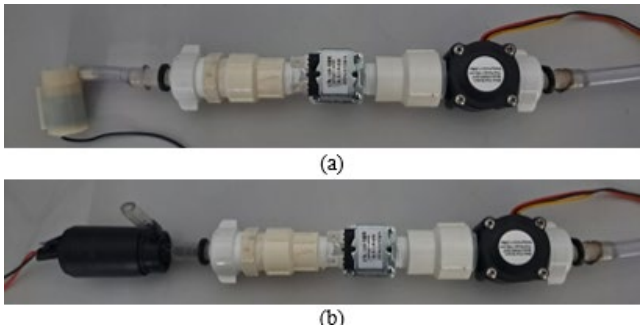


Fig. 10. Planta real do sistema de controle de vazão

B. *Valores e Gráficos obtidos*

Para cada uma das 6 (seis) configurações, foram realizadas 10 (dez) medições do volume que permitiu calcular o valor médio do volume (VM) e o desvio padrão (DP) percentual.

As Fig. 11, 12 e 13 apresentam o comportamento das 10 amostras do volume obtidas tanto por medição direta com a proveta quanto pelo cálculo computacional a partir dos dados do sensor de fluxo. Os resultados contemplam diferentes configurações experimentais, incluindo os dois arranjos distintos e variações temporais de 10 s, 20 s e 30 s, além da consideração da influência da gravidade.

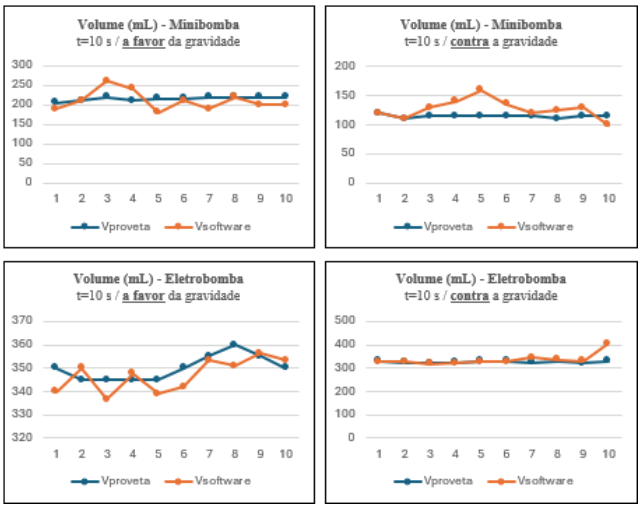


Fig. 11. Comportamento das amostras de volume de água em mL para os arranjos com as duas bombas utilizadas (minibomba I e eletrobomba II) com duração de vazão de 10 s

Analisando os gráficos das Fig. 11 a 13, pode-se notar que as disparidades entre as amostras se ampliam em certas condições específicas. Notavelmente, isso ocorre quando o teste é conduzido com o fluxo contrário à gravidade e utilizando a minibomba.

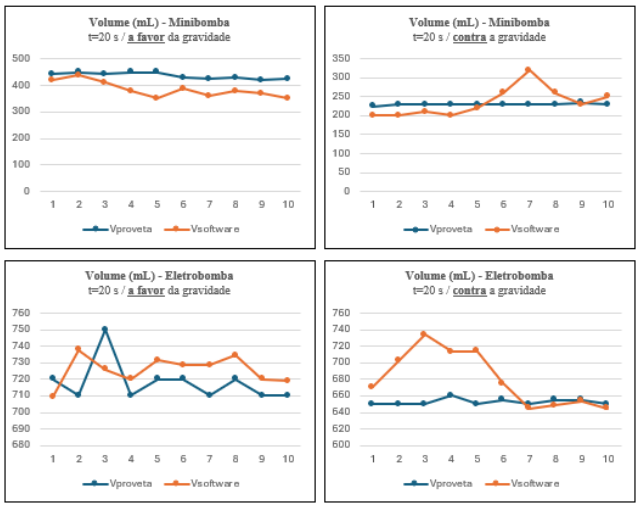


Fig. 12. Comportamento das amostras de volume de água em mL para os arranjos com as duas bombas utilizadas (minibomba I e eletrobomba II) com duração de vazão de 20 s

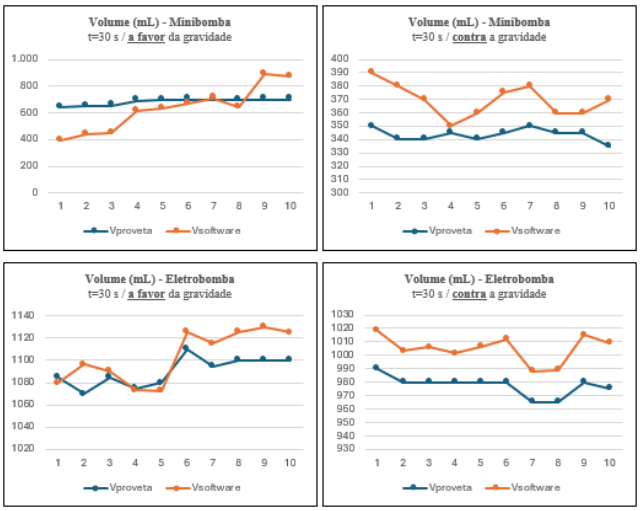


Fig. 13. Comportamento das amostras de volume de água em mL para os arranjos com as duas bombas utilizadas (minibomba I e eletrobomba II) com duração de vazão de 30 s

Essas discrepâncias são atribuídas à redução da vazão, resultando em uma maior margem de erro na medição pelo sensor de fluxo, um problema que é menos significativo na medição direta com a proveta.

A consistência evidenciada nas medições indica que o protótipo da planta em teste demonstrou um desempenho satisfatório. Qualquer necessidade de ajuste parece estar primariamente relacionada à dependência da medição em relação à vazão. Isso pode ser facilmente solucionado ao utilizar uma bomba com uma vazão mais elevada.

Após uma análise mais aprofundada das discrepâncias entre as amostras, foram compilados os dados nas Tabelas de 2 a 5. Essas tabelas apresentam as médias e os desvios padrão das amostras obtidas, juntamente com o erro de precisão, o qual compara os valores médio obtido na proveta com o calculado pelo software, que depende do sensor de fluxo.

Na análise dos dados mostrados nas Tabelas de 2 a 5, observa-se um aumento no erro de precisão quando se altera, no mesmo arranjo, entre a medição a favor da gravidade para a medição contra a gravidade.

TABELA 2. RESULTADOS COM O ARRANJO 1 (USO DA MINIBOMBA - I) A FAVOR DA GRAVIDADE (AR1-AG)

Tempo de duração	Volume na proveta		Volume pelo software		Erro de Precisão (%)
	V_M (L)	DP (%)	V_M (L)	DP (%)	
10 s	215,5	2,6	210,0	11,7	2,6
20 s	437,0	2,8	385,0	7,9	11,9
30 s	682,0	3,5	630,0	27,0	7,6

TABELA 3. RESULTADOS COM O ARRANJO 1 (USO DA MINIBOMBA - I) CONTRA A GRAVIDADE (AR1-CG)

Tempo de duração	Volume na proveta		Volume pelo software		Erro de Precisão (%)
	V_M (L)	DP (%)	V_M (L)	DP (%)	
10 s	114,5	2,5	127,0	13,5	10,9
20 s	230,0	1,0	235,0	16,3	2,2
30 s	343,5	1,4	369,5	3,3	7,6

TABELA 4. RESULTADOS COM O ARRANJO 2 (USO DA ELETROBOMBA - II) A FAVOR DA GRAVIDADE (AR2-AG)

Tempo de duração	Volume na proveta		Volume pelo software		Erro de Precisão (%)
	V_M (L)	DP (%)	V_M (L)	DP (%)	
10 s	350,0	1,5	346,9	2,0	0,9
20 s	718,0	1,7	725,5	1,2	1,0
30 s	1090,0	1,2	1103,3	2,1	1,2

TABELA 5. RESULTADOS COM O ARRANJO 2 (USO DA ELETROBOMBA - II) CONTRA A GRAVIDADE (AR2-CG)

Tempo de duração	Volume na proveta		Volume pelo software		Erro de Precisão (%)
	V_M (L)	DP (%)	V_M (L)	DP (%)	
10 s	326,5	1,3	336,2	7,5	3,0
20 s	652,5	0,5	680,3	4,9	4,3
30 s	977,5	0,8	1004,9	1,0	2,8

O aumento do erro se deve a diminuição da vazão que, conforme as medições, diminuiu no arranjo 1 passando de 1,3 $L.min^{-1}$ para 0,7 $L.min^{-1}$, e no arranjo 2, de 2,2 $L.min^{-1}$ para 2,0 $L.min^{-1}$. Isto devido ao fato de que a minibomba utilizada no arranjo 1 possui uma vazão menor que a eletrobomba utilizada no arranjo 2. Esta diminuição provoca uma imprecisão na medição realizada pelo sensor de vazão confirmada pelo aumento do desvio padrão observado e que também foi um fator para não serem realizadas as medições com o sensor de vazão para o modelo da bomba III por apresentar a menor vazão das 3 bombas testadas.

Sendo os testes realizados para a definição do melhor protótipo, fica claro que ao serem realizados os testes de campo, os erros de precisão, provenientes do uso do sensor de fluxo serão minimizados, haja visto a bomba a ser empregada terá uma vazão bem maior que as atualmente utilizadas.

V. CONCLUSÕES

O artigo em questão desempenhou um papel fundamental no avanço do projeto de doutorado, que se concentra na aplicação da tecnologia para automatizar processos, utilizar sistemas computacionais e implementar a Internet das Coisas (IoT) para preservar um recurso vital para a vida: a água.

Essa pesquisa contribui significativamente para a conservação ambiental, promovendo práticas que visam manter a água em condições ideais, preservando-a para as gerações futuras.

Além disso, o estudo enfatiza a importância do uso consciente dos recursos naturais, a valorização da qualidade de vida e o estímulo ao crescimento econômico sustentável.

É essencial ressaltar que a verdadeira sustentabilidade não se limita apenas ao crescimento econômico, mas também inclui impactos positivos na sociedade e no meio ambiente.

Qualquer abordagem que negligencie esses aspectos não pode ser legitimamente chamada de sustentável ou de desenvolvimento sustentável.

Um aspecto crucial e enriquecedor do projeto foi o seu impacto educacional. As diversas mudanças na configuração da planta e os desafios enfrentados proporcionaram uma valiosa oportunidade de aprendizado para toda a equipe, composta por estudantes e professores dedicados ao projeto.

O conhecimento adquirido e o amadurecimento resultante serão extremamente benéficos para as próximas etapas do trabalho.

Em termos de aprimoramento do projeto, os resultados obtidos já estão sendo utilizados como base para novos testes, onde pretende-se testar uma bomba de vazão maior em um protótipo da planta, ao mesmo tempo em que está sendo implementado a tecnologia Bluetooth para melhorar a interação do usuário com o sistema.

Além disso, está se avançando na implementação de uma planta para os primeiros testes em campo. Esta nova fase envolverá o uso de uma bomba de maior vazão e um sistema que realizará a irrigação de um canteiro com uma cultura específica. Paralelamente à execução desses testes em campo, também será avaliado a eficácia dos sensores de umidade e integrar seus dados ao processo.

REFERÊNCIAS

[1] International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, Org., Estrategia mundial para la conservacion: la conservación de los recursos vivos para el logro de un desarrollo sostenido. Gland: UICN, 1980.

[2] J. R. Karr, “Defining and assessing ecological integrity: Beyond water quality”, Enviro Toxic and Chemistry, vol. 12, no 9, p. 1521–1531, set. 1993, doi: 10.1002/etc.5620120902.

[3] F. Robins, “The Challenge of TBL: A Responsibility to Whom?”, Business and Society Review, vol. 111, no 1, p. 1–14, mar. 2006, doi: 10.1111/j.1467-8594.2006.00258.x.

[4] I. Sachs e C. Furtado, Desenvolvimento: includente, sustentável, sustentado. Rio de Janeiro: Garamond, 2004.

[5] Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico e A. A. Miranda, “Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021: relatório pleno / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico”, Brasília, 2022.

[6] F. Ferrández-Pastor, J. García-Chamizo, M. Nieto-Hidalgo, e J. Mora-Martínez, “Precision Agriculture Design Method Using a Distributed Computing Architecture on Internet of Things Context”, Sensors, vol. 18, no 6, p. 1731, maio 2018, doi: 10.3390/s18061731.

[7] A. K. Podder et al., “IoT based smart agrotech system for verification of Urban farming parameters”, Microprocessors and Microsystems, vol. 82, p. 104025, abr. 2021, doi: 10.1016/j.micpro.2021.104025.

[8] S. Rawal, “IOT based Smart Irrigation System”, International Journal of Computer Applications, vol. 159, no 8, p. 5, 2017.

[9] S. Gnanavel, M. Sreekrishna, N. DuraiMurugan, M. Jaeyalakshmi, e S. Loksharan, “The Smart IoT based Automated Irrigation System using Arduino UNO and Soil Moisture Sensor”, apresentado em 2022 4th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT), Tirunelveli, India: IEEE, jan. 2022, p. 188–191. doi: 10.1109/ICSSIT53264.2022.9716368.

[10] N. Mohan Krishna e G. V. Marutheswar, “Automatic Irrigation System Monitoring by using GPRS or ZIGBEE”, IJERT, vol. V5, no 01, p. IJERTV5IS010068, jan. 2016, doi: 10.17577/IJERTV5IS010068.

[11] N. D. Pergad e Y. P. Patil, “GSM based Water Management in Irrigation System Using ARM7”, vol. 4, no 12, 2013.

[12] C. Correa, D. Dujovne, e F. Bolaño, “Design and Implementation of an Embedded Edge-Processing Water Quality Monitoring System for Underground Waters”, IEEE Embedded Syst. Lett., vol. 15, no 2, p. 81–84, jun. 2023, doi: 10.1109/LES.2022.3184925.

[13] S. S. G. Hashemi, H. B. Mahmud, e M. A. Ashraf, “Performance of green roofs with respect to water quality and reduction of energy consumption in tropics: A review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 52, p. 669–679, dez. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.163.

[14] Cunha, Marcelo Machado, “Desenvolvimento de um sistema embarcado para realização de manejo de irrigação”, Tese (doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2019.

[15] A. G. Calbo e W. L. de C. e. Silva, Sistema Irrigas para manejo de irrigação: fundamentos, aplicações e desenvolvimentos. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2005.

[16] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, e M. Smith, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56: Evapotranspiration. em Crop Evapotranspiration. 1998.

S7B – APPLICATIONS: ROBOTIC, IOT, IA, DOMOTIC, DRONS, ELECTRIC VEHICLE, RENEWABLE ENERGIES, BIOMEDICAL ENGINEERING, ETC.

Diseño, implementación, y evaluación de un modelo de clase invertida y aprendizaje basado en proyectos para electrónica industrial

Angel María Andueza Unanua
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Comunicación
Universidad Pública de Navarra
Pamplona, España
angel.andueza@unavarra.es https://orcid.org/0000-0002-5692-4937

***Abstract*— El uso de las metodologías activas como herramientas para mejorar el aprendizaje, interés y motivación entre el alumnado, es una de las iniciativas más extendidas entre las docentes. En este contexto se presenta el diseño de un modelo para la formación en instrumentación electrónica en el Máster de Ingeniería Industrial de la Universidad Pública de navarra (UPNA), basado en la combinación de las metodologías de clase invertida (FC) y aprendizaje basado en proyectos (PBL), frente a una formación magistral clásica realizada en un grupo de control. Los resultados del modelo no presentan un impacto significativo en los resultados académicos y de valoración con respecto al grupo de control. Además, se ha observado un nivel de aceptación de la metodología activa de FC muy por debajo del PBL debido a la percepción que un grupo del alumnado tiene de sí mismos en la asignatura y a una secuencia temporal deficiente en las clases. Por ello se plantea una discusión crítica e integral del modelo dual usado, las metodologías, de la dinámica estudiantil del curso y de los factores motivacionales que influyen en el grupo estudiado.**

Keywords*— *Metodologías aprendizaje activo, Clase invertida, PBL, electrónica e instrumentación, IoT.

I. INTRODUCCIÓN

Las metodologías activas de aprendizaje, son una serie de estrategias y técnicas que buscan el aprendizaje del alumnado, en base a la aplicación práctica del conocimiento, la participación y la motivación. Aunque todo aprendizaje es activo, el aprendizaje activo debe implicar algo más que solo escuchar al docente: la participación activa del alumnado en actividades de aprendizaje que tengan valor y permitan desarrollar tareas de análisis, síntesis y evaluación [1]. En la actualidad, existe una tendencia generalizada a la aplicación sistemática de metodologías activas de aprendizaje en la educación universitaria debido a su aparente capacidad para mejorar la motivación, el compromiso y el rendimiento del estudiantado [2], [3]. Son varias las metodologías que consideran la aplicación del aprendizaje activo, entre las que destacan, el aprendizaje basado en problemas (Problem Based Learning, PrBL) [4], el aprendizaje basado en retos (Challenge Based Learning, CBL) [5], el aprendizaje basado en proyectos (Project-Based Learning, PBL) [6] y la clase invertida (Flipped Classroom, FC) [7].

La FC es un método pedagógico en el que el aprendizaje se realiza fuera del aula, a través de contenidos online. Durante la clase se llevan a cabo dinámicas como la puesta en común de dudas, resolución de problemas u otras actividades colaborativas y participativas en las que el docente ejerce como guía [7], [8]. La metodología PBL busca fomentar el aprendizaje activo y significativo a través de la realización de proyectos prácticos y relevantes para los alumnos, que trabajarán en grupos [9]. Investigaciones previas sugieren que estrategias de aprendizaje activo, como FC y PBL, son soluciones prácticas para lograr los resultados de aprendizaje deseados y promover una mejor calidad de aprendizaje, ya que estos enfoques fomentan un aprendizaje personalizado y dinámico [10]–[15].

En este estudio, se presenta el diseño e implementación de un curso universitario de Máster mediante la combinación de las metodologías FC y PBL para la instrucción en instrumentación electrónica. A tenor de estos resultados obtenidos, el uso combinado de metodologías activas no presenta un impacto significativo en los resultados académicos y de rendimiento con respecto al grupo de control, alejándose de los resultados de otros trabajos previos, que mostraron rendimientos mejorados [2]. Además, se ha observado un nivel de aceptación de la metodología activa de FC muy por debajo de la PBL. Por ello se plantea una discusión crítica e integral del diseño del curso, el uso de las metodologías, de la dinámica estudiantil y de los factores que influyen en el alumnado estudiado.

II. DESCRIPCCIÓN DE LA ASIGNATURA

A. Descripción de la asignatura

Sistemas electrónicos e instrumentación, es una asignatura obligatoria del semestre de otoño del primer curso del Máster en Ingeniería Industrial de la Universidad Pública de Navarra (UPNA). La asignatura estudia los fundamentos del sensado y el acondicionamiento de señal en los sistemas de instrumentación electrónica. El número de participantes en la asignatura suele situarse a lo largo de los cursos en torno a 70 u 80 (ver sección IV.A Participantes). La titulación donde se encuadra la asignatura es un máster oficial habilitante. De los alumnos matriculados en la asignatura, el 80% ha cursado previamente titulaciones de Grado de Ingeniería en la UPNA, y en su mayoría el Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales (GITI). Esta carrera posee tres especialidades en los dos últimos cursos: mecánica, eléctrica y electrónica industrial. El otro 20% del alumnado proviene de otras universidades con titulaciones de grado como: química, automática, mecánica y energías renovables. En consecuencia, los estudiantes presentan distintos niveles de conocimientos y experiencia en electrónica. En concreto, el 40% de los estudiantes proceden de la especialidad de Mecánica, el 30% de Electricidad, el 25% de Electrónica Industrial, y el 5% restante de otras especialidades. Para tratar esta heterogeneidad, los alumnos del Máster se dividen en dos grupos; el grupo 1 está formado por el alumnado especialista en mecánica y otras especialidades; el grupo 2, con el alumnado de las menciones eléctrica y electrónica.

El contenido del curso se divide en tres módulos. El módulo 1, cubre las terminologías, principios básicos en

metrología y sistemas electrónicos de medida. El Módulo 2, incluye el estudio de los transductores, los circuitos analógicos básicos de acondicionamiento de señal y las no idealidades de los componentes electrónicos. Por último, el Módulo 3 introduce el ruido y las interferencias en los sistemas de instrumentación y medida [16]. El curso tiene una duración de doce semanas, de noviembre a enero, con una carga lectiva semanal de cuatro horas por grupo. Los materiales didácticos, anuncios, comunicaciones y actividades se apoyan en la plataforma de aprendizaje en línea 'Mi Aulario', suministrada por Sakai. El contenido teórico del curso es similar en ambos grupos, así como los métodos de evaluación: un proyecto/actividad experimental en grupo (50%), trabajos individuales (10%) y un examen final teórico individual (40%). El examen final consta de una parte teórica que aúna un ejercicio de respuesta tipo test y dos preguntas cortas de desarrollo teórico; y otra parte de ejercicios de análisis/diseño de sistemas de medida e instrumentación. Para superar el examen es necesario obtener una nota mínima de 5 sobre 10. Una vez se ha clarificado la estructura y contenidos de la asignatura, indicar que el presente trabajo se centrará en del diseño, desarrollo e implementación de la estructura de la asignatura para el grupo 2, quedando el grupo 1 como referencia o grupo de control con el que poder evaluar el impacto alcanzando con las estrategia que se presentaran a continuación

III. Diseño del curso

El diseño de la asignatura se basa en la aplicación de los modelos pedagógicos cognitivo y constructivista. El cognitivismo es un modelo pedagógico cuyo eje fundamental es aprender “haciendo” y donde el alumnado progresa, desarrolla, evoluciona secuencialmente en las estructuras cognitivas para acceder a conocimientos cada vez más elaborados [17]. El contenido del curso está diseñado en sesiones en la que la progresión de los conceptos se enlaza y construyen a partir de las sesiones anteriores. Este modelo se promueve a través de la clase invertida. Por otra parte, el constructivismo hace hincapié en la adquisición de nueva información por parte del alumnado a partir de sus conocimientos y experiencias anteriores mediantede una serie de procesos de aprendizaje activo y autoevaluaciones. Por otro lado, el enfoque constructivista de la asignatura se centra en métodos de aprendizaje activo que sitúen al alumnado como constructores del aprendizaje e implicándose en su propio proceso de aprendizaje fuera del tradicional esquema pasivo. Este modelo se promueve a través de un aprendizaje basado en proyectos. El diseño del curso propicia que el alumnado realice varias tareas significativas, como la resolución de problemas y presentación de soluciones, lo que les permite conscientemente reflexionar sobre lo que están haciendo y promover un entorno de aprendizaje activo.

Tal como se ha expuesto en la sección anterior, hay dos perfiles de acceso muy diferenciados por lo que el diseño de la asignatura es diferente en cada grupo. Para el grupo 1 se diseñó el curso mediante una metodología de clase magistral para desarrollo de la parte teórica, combinado con una actividad experimental de diseño electrónico en el laboratorio. Por otro lado, para el grupo 2 se implementó una metodología de clase invertida para las sesiones de teoría, combinada con aprendizaje basado en proyectos en respuesta a los conocimientos previos en electrónica que posee el alumnado cuando accede al curso. El alumnado del grupo 2 habían cursado durante sus estudios de grado una asignatura relacionada con a la ofertada en el Máster. Por este motivo, se optó por descartar las tradicionales clases expositivas y en su lugar implementar metodologías activas como la FC para facilitar la adquisición de las competencias requeridas por parte de los alumnos en el Máster y favorecer una dinámica en el curso más activa en el aula. Además, el curso incluye una actividad (basada en PBL) para aplicar los conceptos trabajados en la FC, así como para promover la motivación, el trabajo en equipo y el desarrollo de contenidos más avanzados que los que adquirieron durante sus estudios de grado.

De esta forma, el curso constó de dos partes diferenciadas, de seis semanas de duración cada una. La primera fase se centró en la aplicación de un enfoque de FC, mientras que la segunda fase se centró en una actividad colaborativa experimental basada en un proyecto electrónico del Internet de las Cosas (IoT). A continuación, detallamos la estructura y funcionamiento de cada uno de ellas.

A. Aula invertida

La Fig.1 muestra el modelo de aula invertida diseñado mediante un ciclo de tres etapas [18]. El ciclo de aprendizaje tiene una duración de tres días por cada sesión presencial en el aula. En el enfoque de aprendizaje aplicado, el estudiantado debe trabajar los conceptos clave, la terminología y los fundamentos del tema mediante material audiovisual elaborado para la asignatura antes de la sesión de clase (ver referencia [19]). El siguiente paso requiere del alumnado aplicar en el aula los conceptos de la instrumentación electrónica adquiridos en casa, y junto con el profesor, resolver los problemas planteados sobre los sistemas de instrumentación y medida trabajados previamente. En este punto, los estudiantes trabajan en grupo para resolver los problemas planteados, propiciando un aprendizaje colaborativo e interactivo [20]. Posteriormente el alumnado debe trabajar individualmente los conceptos tratados para afianzar su asimilación, pudiendo también hacer uso de tutorías presenciales o grupales semanales para resolver cuestiones que hayan quedado en el aire en casa y durante la clase en el aula. La clase invertida supone 5 sesiones de 2 horas en el aula, realizadas a lo largo del mes de noviembre.

Fig. 1. Estructura del modelo de clase invertida desarrollado en el curso.

Como se observa en la Fig. 1 en la fase de aula invertida, los estudiantes participan en varias actividades asíncronas diseñadas para facilitar el aprendizaje autodirigido. Estas actividades incluyen tareas estructuradas previas a la clase, como ver varios vídeos cortos de clases pregrabadas y apoyar el trabajo mediante cuestionarios individuales de

autoevaluación utilizando la plataforma Wooclap. Como paso final del enfoque de aula invertida, se presenta a los estudiantes un ejercicio corto relacionado con los temas tratados en los vídeos. Este ejercicio se diseñó para ayudar a reforzar los conceptos clave y facilitar la participación activa con el material suministrado. Los vídeos pregrabados han sido elaborados para durar entre 8-14 minutos e introducen conceptos clave, terminología y métodos de cálculo relacionados con el material del curso. Los vídeos se crearon utilizando narraciones en MS PowerPoint y se cargaron a través de la plataforma Edpuzzle, lo que les permite acceder al material a su conveniencia durante todo el curso. Edpuzzle es una aplicación web basada en la metodología de aula invertida que permite subir vídeos con el contenido a estudiar. El diseño del curso usando Edpuzzle permite intercalar preguntas breves en la secuencia del vídeo para conocer el seguimiento del mismo, y evaluar la asimilación de los conceptos. Indicar que los vídeos no pueden ser avanzados por los estudiantes para asegurar que son visionados de principio a fin.

Una vez en el aula, la clase comienza con la resolución por parte del docente del ejercicio corto planteado, lo que permite repasar e introducir los conceptos trabajados de manera individual mediante el aula invertida. Tras ellos hay un espacio para discusión y el planteamiento de dudas sobre los conceptos de la sesión. Posteriormente, se introducen las actividades a desarrollar en el aula, que consisten en problemas estructurados para relacionar e interconectar los conceptos vistos y trabajados en los vídeos, pero de una manera práctica y aplicada. Cada ejercicio plantea varios apartados, que deben ser resueltos por parte del alumnado, trabajando en equipos de entre 2 y 4 personas. En ese ambiente se busca propiciar el trabajo colaborativo y la discusión para llegar a un resultado final. Una vez ha pasado el tiempo destinado a resolver cada apartado, y utilizando la plataforma Wooclap, comparten el resultado de su trabajo de forma anónima mediante el uso de su móvil o Tablet. Con ello se intenta gamificar el trabajo en el aula, y, sobre todo, ver el si el estudiantado ha alcanzado el objetivo perseguido, permitiendo al docente replantear la clase, pudiendo parar y explicar los conceptos que no hayan quedado claros o seguir según el plan previsto. Ésta dinámica permite adaptar las clases al conocimiento de los alumnos y a su situación, personalizando más el proceso de enseñanza-aprendizaje (Just in Time Teaching, JiTT) [21].

Tras la sesión en el aula, los estudiantes deben trabajar los conceptos de manera autónoma si lo consideran necesario. En el caso de que todavía no tengan claro alguno de los aspectos trabajados, disponen de las tutorías presenciales, y de la tutoría grupal a través de zoom para resolver cualquier dada al respecto de las sesiones trabajadas en esa semana. La clase invertida ha sido programada para que suponga un número total de horas 5.5 horas de trabajo por cada una de las sesiones, lo que se corresponde con 0.27 créditos ECTS (European Credit Transfer and Accumulation System), del total de 3 ETCS que posee la asignatura.

B. Aprendizaje basado en proyectos

Con el objetivo de afianzar los contenidos teóricos trabajados en la clase invertida, así como desarrollar otros aspectos formativos relacionados con la gestión de proyectos o el trabajo en grupo, se emplea una metodología PBL. Este tipo de metodología de aprendizaje activo presenta grandes ventajas para su utilización en la asignatura ya que el estudiantado adquiere un rol más activo, se favorece la motivación académica, y se puede trabajar aspectos más avanzados de electrónica industrial. El proyecto persigue la implementación de un proyecto de diseño electrónico para crear un dispositivo IoT autónomo, capaz de medir y enviar la información a través de un sistema inalámbrico LoRa de bajo consumo. Empleando un microcontrolador (µC) SMD21 integrado en una placa Arduino MKR WAN 1300, y plataformas como The Things Network (TTN) o Google Sheets (GS), se persigue construir un sistema IoT de bajo coste, abierto, autónomo y con las mismas características que presentan las soluciones profesionales (ver Fig. 2).

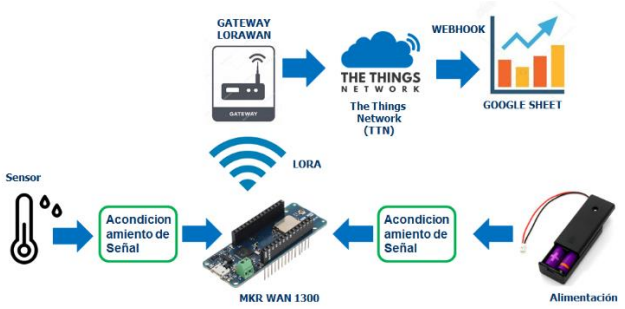


Fig. 2. Esquema de la Arquitectura del proyecto electrónico IoT desarrollado en el curso [22].

La idea con la que se crea la actividad es la de hacer un proyecto aplicado. Se pretende que los alumnos sientan que lo que aprenden es cercano y conecta con su realidad. Para poder llevar a cabo todo esto, se parte de una premisa, ellos deben participar en la elección del dispositivo IoT que quieren diseñar. De esta manera se les incentiva para que hagan lo que les resulte más atractivo desde el principio, favoreciendo la motivación y el planteamiento de la actividad como un desafío personal. A través de esta metodología los alumnos elaboran el contenido, diseñan el proyecto y colaboran entre sí, aprendiendo y haciendo por ellos mismos, muy en concordancia con las competencias que necesitarán disponer en su inminente salto al mundo profesional [22].

Esta actividad se desarrolla en grupos de 4 formados por los propios estudiantes, si bien se sugiere que los grupos sean heterogéneos y estén formados por alumnos con perfiles de acceso diferentes (eléctricos/electrónicos), facilitando así el aprendizaje colaborativo y el apoyo mutuo durante el mismo. El proyecto ocupa 8 sesiones de 2 horas, realizadas a lo largo del periodo comprendido entre los meses de diciembre y enero.

IV. METODOS

A. Participantes

Tal y como se ha detallado previamente, los estudiantes de la asignatura se ubican en dos grupos en función de su perfil de acceso: el grupo 1 estaba formado por estudiantes especializados en mecánica, mientras que el otro, el grupo 2, estaba compuesto por estudiantes con formación previa en especialidades eléctrica y electrónica, respectivamente. El grupo 1 fue el grupo de control, con una metodología de enseñanza basada en clases presenciales tradicionales y una actividad experimental en el laboratorio. En el grupo 2 utilizó simultáneamente el aprendizaje basado en proyectos y la clase invertida.

Se explicó a los estudiantes el propósito del estudio que comprende este trabajo y se les informó de que los datos se

utilizarían únicamente con fines académicos. Durante el estudio, se informó a los participantes de que responder al cuestionario era voluntario y que las respuestas se recogerían de forma anónima. Las encuestas son siempre realizadas en papel y de forma presencial para favorecer el número de participantes en la misma. La muestra del alumnado que participó en el estudio se presenta en la Tabla I.

TABLE I. ESTADISTICAS DE LOS PARTICIPANTES EN EL ESTUDIO

	Curso 2023/2024	
	Grupo 1	*Grupo 2*
Alumnos/as totales	38	45
Hombres	33 (86.8%)	40 (88.8%)
Mujeres	5 (13.2%)	5 (11.2%)
Edad media (años)	24.04	23.82
Alumnos/as fuera de la UPNA	9 (37%)	2 (4.5%)
Asistencia promedio al aula	20.6 (54.2%)	33.71 (75%)
Participación en la encuesta	29 (76%)	41 (91%)

Como puede observarse, el número de alumnos de cada grupo es homogéneo. En ambos grupos, el número de alumnos es superior al de alumnas, no superando estas últimas en ningún caso el 14% del total. Además, la edad media de los participantes en el estudio se sitúa en torno a los 24 años, lo que indica que el perfil del alumnado es el de un graduado/a que continúa sus estudios de Máster al terminar los de grado. En términos absolutos la asistencia al aula en las clases (no obligatoria) fue mucho mayor en el grupo 2 que en el grupo 1, presentando el grupo 1 un mayor número de alumnos/as de que cursaron el grado fuera de la UPNA. Al ser la participación voluntaria, el porcentaje de estudiantes que cumplimentó los cuestionarios es variable, si bien, es lo suficientemente elevado como para que los resultados puedan ser estadísticamente representativos.

B. Modelo de encuesta y tratamiento de los datos

El principal objetivo perseguido con los cuestionarios es identificar el impacto global en su aprendizaje y su satisfacción al combinar el enfoque de clase invertida con una actividad colaborativa basada en proyectos. Los cuestionarios se diseñaron y adaptaron de forma que los estudiantes pudieran demostrar la eficacia de las actividades en su aprendizaje y aportar comentarios sobre el diseño del curso. Además, las respuestas proporcionadas por los alumnos son de utilidad para mejorar y analizar la asignatura en los siguientes cursos. Durante el curso, se realizó una encuesta el primer y último día. Además, se recogieron comentarios de respuesta libre. La encuesta inicial tenía como objetivo conocer el punto de partida del alumnado y sus inquietudes iniciales respecto a la propuesta de diseño de la asignatura. La encuesta final pretendía conocer la valoración global del alumnado sobre la asignatura analizando diferentes dimensiones: metodologías utilizadas, aprendizajes alcanzados, organización de la asignatura, relación entre el profesor- los alumnos, etc. El cuestionario final se basó en el "Student Evaluation of Educational Quality" (SEEQ) [23] pero utilizando una versión reducida de 23 (grupo 1) y 28 (grupo 2) preguntas, modificada a partir de la propuesta presentada por M. Corbalán et al. [24]. La encuesta constaba de enunciados que cubrían diversos aspectos del curso. Se pidió a los participantes que indicaran su nivel de acuerdo o desacuerdo con cada afirmación utilizando una escala Likert de 5 puntos. La escala iba de 1 (totalmente en desacuerdo) a 5 (totalmente de acuerdo), con 2 indicando desacuerdo, 3 indicando neutralidad y 4 indicando acuerdo. En la encuesta el alumnado debía indicar también su especialidad de procedencia. Todos los cuestionarios empleados pueden consultarse en la referencia [25].

TABLE II. FIABILIDAD DEL CUESTIONARIO APLICADO

Categoría	**Preguntas**		**α Cronchbar**	
	Grupo 1	***Grupo 2***	***Grupo 1***	***Grupo 2***
Aprendizaje/Actividades	4	13	0.946	0.866
Organización/Evaluación	6	3	0.956	0.965
Relación con Estudiantes Entusiasmo /Interacción en clase	8	5	0.968	0.967
Valoración asignatura	2	4	0.814	0.8012
Encuesta total	20	25	0.9683	0.9377

Como la estructura de las encuestas SEEQ se basa en una escala de Likert, la fiabilidad o consistencia interna de los resultados se ha medido utilizando el Alfa de Cronbach, α. El cuestionario también incluía preguntas que permitirán realizar análisis cuantitativos de las experiencias de los alumnos durante el curso. Para el cálculo de la consistencia interna de los cuestionarios se han excluido esas preguntas, 4 en caso del grupo 1 y 3 en el grupo 2. En general, una puntuación superior a 0.7 suele ser aceptable [26]. Los resultados de la Tabla II muestran la fiabilidad del alfa de Cronbach en las encuestas SEEQ en cada grupo y agrupando las categorías del cuestionario. En todos los casos, los cuestionarios y las categorías presentaron un alfa de Cronbach superior a 0.8, lo que indica una buena fiabilidad interna.

TABLE III. ESCALA LIKERT USADA PARA LOS DATOS DE LA ENCUESTA

Valor	**Rango promedio**	**Interpretaciόm**
1	1-1.80	En total desacuerdo
2	1.81-2.60	En desacuerdo
3	2.61-3.40	Neutral
4	3.41-4.20	De acuerdo

Las respuestas de la encuesta se analizarán estadísticamente a partir de la frecuencia, el porcentaje y las medias ponderadas (μ). Los valores medios se interpretaron utilizando escalas Likert que se muestran en la Tabla III [27].

V. RESULTADOS

El objetivo último de este trabajo es contestar la siguiente pregunta: ¿Tiene el modelo combinado de clase invertida y aprendizaje basado en proyectos un impacto positivo real sobre la percepción y el aprendizaje del alumnado del grupo 2 del Máster? Para responder a esta cuestión, nos apoyaremos, por un lado, en los resultados de las encuestas realizadas al estudiantado, y por el otro, en los resultados académicos logrados por éstos. Además, para analizar los resultados tendremos en cuenta la dinámica estudiantil y otros factores que influyen en el grupo estudiado: conocimientos previos, la procedencia y la relación con respecto al grupo de control. El grupo objetivo del estudio es el grupo 2, quedando los resultados del grupo 1 como referencia para valorar el impacto logrado sobre el grupo 2 mediante el curso desarrollado.

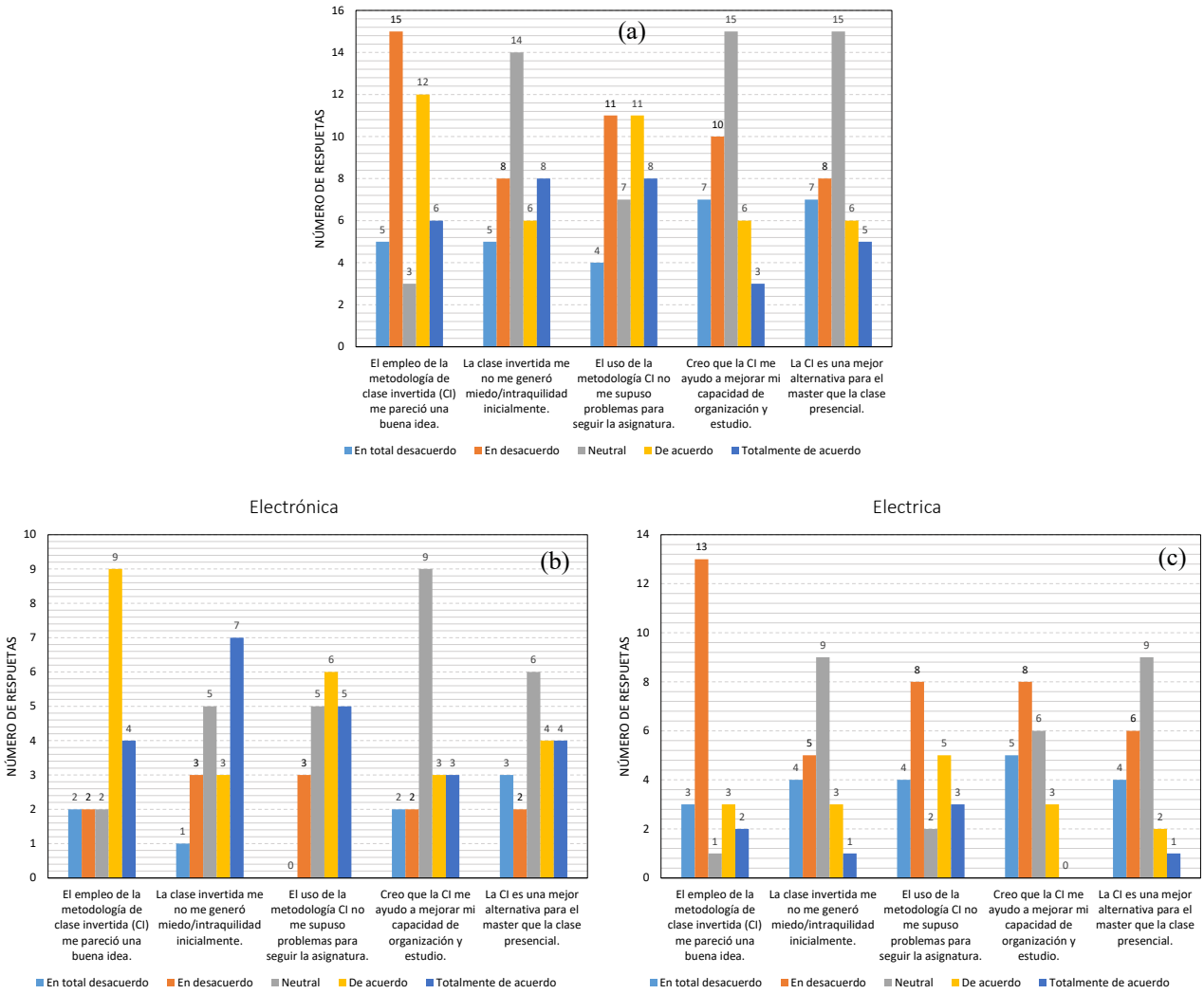


Fig. 3. Resultados de la encuesta SEEQ relativas a la actividad activa de Flipped Classroom (a) de la clase completa (41 respuestas), (b) el alumnado de la mención de electrónica (19 respuestas) y (c) de la mención eléctrica (22 respuestas).

A. Experiencia de aprendizaje de la clase invertida

El cuestionario final tenía cinco preguntas qua abordaban la experiencia ligada al uso de la metodología de clase invertida en el grupo 2. La Fig. 3(a) muestra los niveles de satisfacción generales del grupo 2. Todas las preguntas presentan una valoración media μ entre 2.7 y 3.1, que en base a la interpretación de la Tabla III, supondría una valoración neutra. Sin embargo, en la primera pregunta se observa una fragmentación en la respuesta, ya que el porcentaje de respuestas que valoran positivamente la FC es similar al que lo hacen negativamente. En la pregunta tres, relativa a las dificultades ocasionadas por el uso de la FC en la asignatura, el resultado es similar al de la preg.1. Pese a que el uso de la FC no supuso problemas entre los alumnos (preg.2 $\mu = 3.2$), el alumnado interpreta que su uso no ha supuesto un beneficio para ellos en su capacidad de estudio/organización ($\mu = 2.7$), o fuera una alternativa mejor que una clase magistral ($\mu = 2.9$).

Estos resultados muestran un impacto poco relevante de la FC entre el alumnado que ha participado en el curso. El resultado obliga a reflexionar de manera crítica respecto al diseño y de la actividad. Es por ello que debemos plantear un análisis más profundo de los resultados de la Fig. 3, sobre todo considerando al alumnado del curso, un grupo muy heterogéneo con niveles de conocimiento en electrónica muy diferentes. Así, el 46 % del alumnado participante en la encuesta proviene de la mención de electrónica del GITI, el 54% de la mención eléctrica del GITI. Estos datos parecen estar en relación con la tendencia polarizada que se observa en la Fig.4. Para poder conocer mejor la causa de esos resultados, se han desagregado en base a la especialidad de procedencia de cada estudiante.

La Fig. 3(b) y 3(c) muestran los datos separados del alumnado procedente de la especialidad electrónica (19) y eléctrica (22), respectivamente. Analizando la Fig. 3(b) podemos apreciar como la valoración de la FC es mucho más positiva que las mostradas para la clase completa (ver Fig. 3(a)), ya que este grupo está de acuerdo con el uso de la FC y la no existencia de problemas para seguir la asignatura (preg.1 μ=3.6, preg.2 μ=3.6 y preg.3 μ=3.7) mediante FC. Sin embargo, tampoco aprecian un beneficio claro en el uso del FC (preg.4 μ=3.2) ni la valoran como una mejor alternativa a la clase magistral (preg. 5 μ=3.2). En contraste, el alumnado de la especialidad de eléctrica (ver Fig. 3(c)) no está de acuerdo con las de cuestiones plateadas, salvo la pregunta 3 (μ=2.8). Este grupo de alumnos/as no están de acuerdo con el uso de la metodología FC para el estudio de los contenidos de la asignatura (preg.1 μ=2.5) y ello les supuso intranquilidad y miedo (preg.2 μ=2.6). Además, consideran que su uso no les

ha ayudado a mejorar su capacidad de estudio y organización (preg.4 μ=2.3), considerando que no es una mejor alternativa que una clase magistral (preg.5 μ=2.5). Estos resultados muestran que la percepción respecto de la FC está muy vinculada a la formación con la que accede el alumnado. Por ello es necesario analizar cuál es la causa de esta realidad, en especial, analizando la influencia del diseño del curso en la fase de FC. Este aspecto se abordará en la sección discusión.

B. Experiencia de aprendizaje basado en proyectos

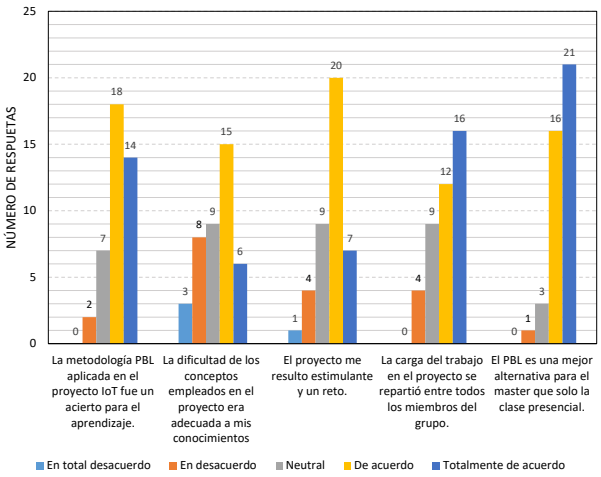


Fig. 4. Resultados de la encuesta SEEQ relativas a la actividad activa PBL.

La Fig. 4 muestra los resultados de la encuesta relativos al desarrollo del proyecto IoT basado en una metodología PBL. Puede apreciarse a simple vista cómo la distribución de respuestas es más positiva con respecto al aprendizaje basado en FC. La mayoría del alumnado (90%) está totalmente de acuerdo en que el proyecto IoT es una mejor alternativa a las clases presenciales (preg.5 μ = 4.4), y de acuerdo en que su uso fue una buena idea para el aprendizaje (preg.1 μ = 4.1), y un reto estimulante (preg.3 μ = 3.7). Por otro lado, consideran que la dificultad del proyecto era acorde a sus conocimientos (preg.2 μ = 3.3). El alumnado valora la actividad como una herramienta de aprendizaje acertada y que mejorara su formación con respecto a la formación presencial.

C. Experiencia de aprendizaje y organización de la asignatura

La Fig. 5(a) presenta las cuestiones relativas a la organización de la asignatura y a aspectos relacionados con el aprendizaje desarrollado en el grupo 2. Como puede verse el alumnado está de acuerdo en valorar el curso como desafiante, estimulante (preg.1 μ=3.4) y como algo valioso para su futuro (preg.2 μ=3.7). El 81% del alumnado está de acuerdo en considerar claras las explicaciones del funcionamiento y organización de la asignatura (preg.4 μ=4.1). Sin embargo, el aprendizaje y desarrollo de la asignatura no ha supuesto un aumento del interés de la electrónica del alumnado (preg.3 μ=3.1). Este resultado se puede justificar en base a que la valoración de la pregunta 4 del alumnado de la especialidad eléctrica ha sido μ=2.8, frente al μ=3.42 de la especialidad electrónica. Por último, es interesante destacar como el 81% está de acuerdo en considerar que el material disponible para el desarrollo de la asignatura está bien preparado (preg.5 μ=4.1). Este resultado deberá ser tenido en cuenta en la discusión final donde se analice la causa por la que la actividad desarrollada de FC no ha tenido un impacto positivo sobre el alumnado.

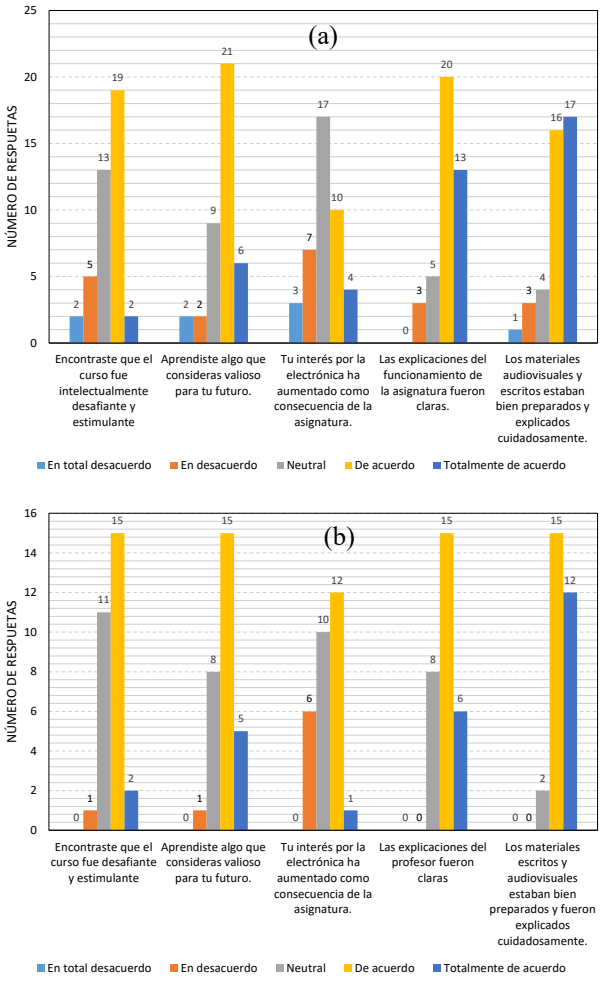


Fig. 5. Resultados de la encuesta SEEQ relativas al aprendizaje y organización de la asignatura (a) grupo 2 y (b) grupo 1.

Los resultados del grupo 1, se muestran en Fig. 5(b). Como puede verse el alumnado está de acuerdo en valorar el curso como desafiante, estimulante (preg.1 μ=3.6) y como algo valioso para su futuro (preg.2 μ=3.8), al igual que en el grupo 2. Es interesante destacar como la asignatura ha supuesto un aumento del interés de la electrónica del alumnado más alto que en el grupo 2 (preg.3 μ=3.3), probablemente por su mayor desconocimiento previo. En lo relativo al material usado en la asignatura (preg.4 μ=4.2) y al desarrollo de la docencia en el aula (preg.5 μ=4.3), el 72% alumnado considera que las explicaciones desarrolladas en las clases por el docente fueron claras, y el 93% está totalmente de acuerdo con que los materiales están bien preparados y explicados. En general, los resultados de ambos grupos para las mismas cuestiones son similares, independientemente de las metodologías empleadas para el desarrollo de la docencia.

D. Relación alumnado-docente

Otro aspecto fundamental para analizar los resultados del diseño de la asignatura es el desarrollo y evaluación de la labor del docente. El estudiantado del grupo 2, expresó valoraciones positivas sobre todas las afirmaciones presentadas en el cuestionario relativas a la relación alumnado-docente tal y como se muestra en la Fig. 6(a). Los valores medios calculados para cada afirmación son μ > 4.05, lo que demuestra que “fuerte acuerdo" con la labor desarrollada a lo

largo de la asignatura, tanto en los aspectos de motivación, dinamismo e interacción con el alumnado.

Los resultados del grupo 1 mostrados en la Fig. 6(b), muestran también valoraciones positivas sobre todas las afirmaciones presentadas en el cuestionario relativas a la relación alumnado-docente. Los valores medios calculados para todas de cuestiones, salvo la primera, fueron del $\mu > 4.3$, mostrando un acuerdo total con el trabajo desarrollado por el docente en la asignatura, en los aspectos relativos a la motivación, dinamismo e interacción con el alumnado. En la cuestión 1, el 69% de los alumnos en ambos grupos estaba de acuerdo en que se les animo a participar en clase (preg1 μ = 3.8 y preg.2 μ = 3.9). Nuevamente, los resultados en esta dimensión para ambos grupos no muestran variaciones significativas, incluso, en algunos aspectos, son mejores en el grupo de control.

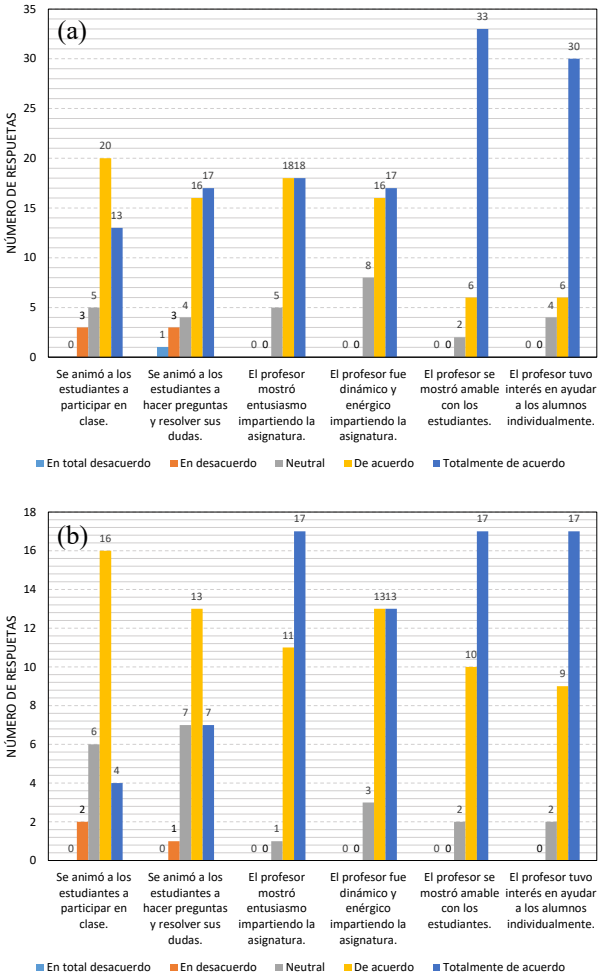


Fig. 6. Resultados de la encuesta SEEQ relativas a la actividad relación alumnado-docente (a) grupo 2 y (b) grupo 1.

E. Valoración general de la asignatura

Las últimas preguntas de la encuesta hacen referencia a la valoración final de la asignatura por parte de los alumnos en tres dimensiones diferentes: valoración global de la asignatura, del docente, y la valoración de las actividades activas implantadas (grupo 2). Los resultados para ambos grupos pueden verse en la Fig. 7. Resaltar que la escala Likert de valoración es diferente, correspondiendo 1 a muy mal y 5 a muy bien.

Como apreciamos en la Fig. 7(a) el alumnado del grupo 2 valora bien la asignatura en relación a otras cursadas en la titulación ($\mu = 3.81$). Este resultado es algo inferior en el grupo 1 (ver Fig. 7(b)), con una media $\mu = 3.41$ y puede deberse a su menor afinidad con la electrónica. Respecto a la valoración del docente, en ambos grupos, más del 85% del alumnado valoró muy bien la labor desarrollada en la asignatura, siendo el resultado en el grupo 2 ($\mu = 4.46$) algo mejor que en el grupo 1 (μ = 4.3). Estos resultados muestran que el alumnado de ambos grupos valoró positivamente la asignatura, así como la labor desarrollada en ella por el docente. Además, parecen apuntar a que el desarrollo docente del grupo 2, basado en metodologías activas, es algo más valorado que el desarrollado en el grupo 1. Sin embargo, es necesario analizarlos considerando todos los aspectos coyunturales que

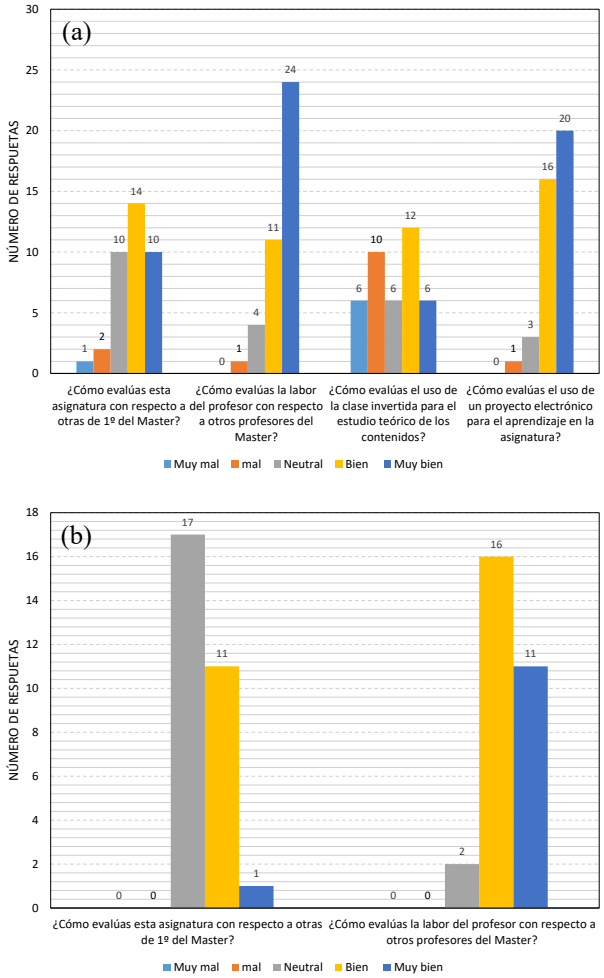


Fig. 7. Resultados de la encuesta SEEQ relativas a la valoración final de la asignatura en el (a) grupo 2 y (b) el grupo 1. Las preg. 3 y 4 solo figuran en el grupo 2 al ser relativas a las actividades activas desarrolladas.

Uno de los aspectos clave para este estudio era analizar el impacto sobre el alumnado del uso combinado de FC y PBL para el diseño de la asignatura. Las preg.3 y 4 del a Fig. 7(a) abordan la valoración final del desarrollo de ambas actividades en la asignatura. Nuevamente, y en relación con los resultados mostrados en la subsección A, la valoración sobre la actividad de FC está muy polarizada, con un 40% del alumnado que la valora negativamente y un 45% que lo hace positivamente (μ = 3.05). Si analizamos los datos de forma desagregada, el grupo de alumnos de la especialidad eléctrica

presenta una valoración media de μ = 2.55, y el de electrónicos del μ = 3.7, lo que sigue representando una división de su valoración debida a los conocimientos previos y perfil de acceso. Por lo tanto, aunque estadísticamente el grupo 2 completo, no rechaza la actividad de FC, un porcentaje elevado del mismo (~40%) la valora mal, y considera que su aplicación no es acertada. Finalmente, si observamos el resultado de la preg.4, podemos ver cómo el alumnado valora muy bien el proyecto bajo la metodología PBL (μ = 4.38), lo que está en línea con el resultado que se mostró en la subsección B, y demuestra un nivel alto de satisfacción en su desarrollo.

F. Valoración de respuesta libre

En la Tabla IV se muestran algunos comentarios de respuesta libre que los estudiantes han dejado en las encuestas del grupo 2. Se dividen es aspectos positivos y negativos de la asignatura/docente. Para limitar el número de respuestas se presenta una muestra representativa de 4 respuestas por cada aspecto.

1) Aspectos positivos:

a) Respuesta 1: "Las clases invertidas son una buena idea para seguir la asignatura al día aunque estaría bien que los vídeos pudieran pasarse hacia adelante. Buen trato hacia el alumno y se implica mucho en la asignatura".

b) Respuesta 2:"Creo que está muy bien la manera de organizar la asignatura y la manera de impartirla por el docente".

c) Respuesta 3: "La idea del proyecto es muy buena. Hace la asignatura muy llevadera y se sale de la linea típica de los trabajos de otras asignaturas que al final es hacer un informe y ya. Aquí sí que llegas a construir algo y puedes complicarte lo que te dé la gana así que puedes dar más rienda suelta a la imaginación y eso lo encuentro muy positivo".

d) Respuesta 4: "La clase invertida me parece interesante y que la mitad de la nota sea del proyecto está bien también".

2) Aspectos negativos y de mejora:

a) Respuesta 1: No me gusta la metodológica de CI. Me parece que nuestra base (mención Eléctrica) es muy inferior a la que se demanda al seguir la clase por videos y sin explicarla en clase. Creo que dificulta el estudio suponiendo una gran carga adicional".

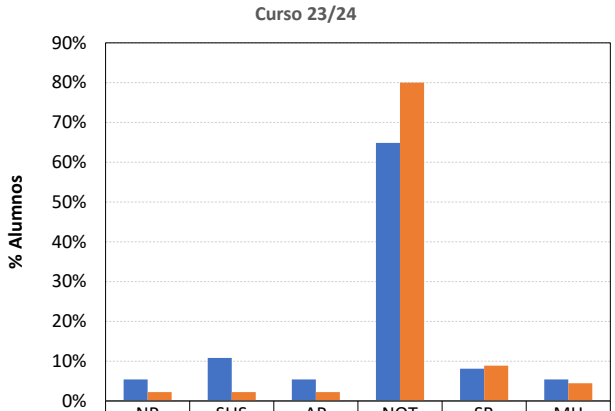
b) Respuesta 2:"El aula invertida en general. Es una metodología bien planteada pero mal ejecutada que puede ser útil cuando se viene con una base sobre la materia y se dispone de los conocimientos mínimos para desarrollar y adquirir los conocimientos nuevos de forma más independiente y dejar más tiempo en clase para problemas y dudas".

c) Respuesta 3: "La clase invertida no me ha servido de mucho. Teniendo los dias de clase seguidos no da tiempo a prepararse la clase a verse la anterior, a hacer apuntes y a estudiar. Con lo cual no tenemos dudas al dia siguiente, no tenemos nada basicamente. Para los electricos el ritmo ha sido frenético en cuanto a teoría y no siempre hemos podido seguir bien elnritmo de la clase".

d) Respuesta 4: "Las clases invertidas no ayudan a entender los conceptos de la asignatura".

G. Resultados académicos

Finalmente, para analizar y detectar el impacto sobre curso, vamos a ver estudiar los resultados académicos de cada grupo. En este estudio, este parámetro está sujeto a un sesgo inicial que lo limita parcialmente; los estudiantes en cada grupo tienen diferentes niveles de conocimiento previo en electrónica. Este aspecto condiciona las posibles conclusiones que se pueden obtener, pero nos permite observar si una metodología tradicional conduce a un rendimiento académico similar al de la combinación de las metodologías activas. Para evaluar el rendimiento, analizaremos tres aspectos: la nota media de cada grupo, la distribución de calificaciones y el porcentaje de estudiantes que aprueban la asignatura.



	NP	SUS	AP	NOT	SB	MH
GRUPO1	5.41%	10.81%	5.41%	64.86%	8.11%	5.41%
GRUPO2	2.22%	2.22%	2.22%	80.00%	8.89%	4.44%

Fig. 8. Distribución porcentual de las calificaciones de ambos grupos.

Si analizamos los resultados del rendimiento académico basados en la nota media, los resultados son ligeramente mejores en el grupo 2, con una nota media de 8.2 respecto a 7.6, del grupo 1. Al evaluar las escalas de calificación por curso (ver Fig. 8), el grupo 1 presentó resultados algo peores en la distribución de calificaciones, en especial en el porcentaje de alumnos no presentados (NP) y suspensos (SUS). Si observamos la distribución de estudiantes que aprobaron la asignatura en cada grupo, el grupo 2 presenta una tasa de éxito promedio mejor (% aprobados/matriculados) del 94%, en comparación la del grupo 1, que se queda en el 84%. Si ahora comparamos el rendimiento académico respecto al curso 2022/23, los resultados son del 79% y 93% para los grupos 1 y 2, respectivamente. Como vemos esos resultados son similares al curso en estudio, si bien la tasa de éxito es algo mejor en los ambos casos. La suma de todos estos resultados presentados muestra en general un mejor rendimiento académico en los estudiantes del grupo 2, pero como hemos visto, la diferencia con respecto al grupo 1 no puede directamente atribuirse o relacionarse con la aplicación de metodologías activas de enseñanza. La variación, aunque pueda parecer significativa, y está muy ligada al perfil de acceso y nivel medio de los alumnos, por lo que será necesario ver la evolución en los próximos cursos.

VI. Discusión

Una vez han sido presentados los resultados del estudio, es necesario reflexionar al respecto de los mismos. En general los resultados de satisfacción docente de la asignatura y el profesorado han sido buenos o muy buenos en los dos grupos. Sin embargo, hay tres aspectos que destacan sobre el resto: la baja valoración de la FC por parte de un grupo muy elevado

de los alumnos, mayoritariamente los que provienen de la especialidad eléctrica del GITI, la buena valoración de la metodología PBL entre todo el alumnado, y la no presencia de resultados o valoraciones cuantitativas mucho mejores en el grupo del estudio (grupo 2) con respecto al grupo de control (grupo 1).

El rechazo del 40% de los alumnos del grupo 2 a la FC debe hacernos reflexionar al respecto de los motivos que pueden estar detrás. Para comenzar, queda patente que el grupo que lo rechaza es homogéneo y se identifica claramente con un perfil de estudiante que tiene la electrónica como una materia percibida como lejana o ajena. Analizando los datos de la encuesta inicial del grupo 2 [25], una de las preguntas trataba de analizar el punto de partida de los alumnos, preguntando si preferían la clase en el aula y prácticas, respecto al curso basado en el uso combinado de FC y PBL. Es destacable que el 50% (9/18) del alumnado de la especialidad de eléctrica prefiriera la opción de clase magistral. A ello debemos añadir que en la misma encuesta el 39 % (7/18) de los estudiantes de la especialidad manifestaron que ya habían usado FC, y de entre ellos, el 57% prefería una clase presencial. Todos estos datos muestran una predisposición inicial negativa o escéptica con respecto a la metodología de FC, estado que el desarrollo y planificación de la asignatura no consiguió modificar, más bien éste se acentuó. Es por ello que debe hacerse un análisis crítico del diseño y planificación de la actividad de FC para conocer sus causas y poder mejorar los resultados alcanzados.

Si analizamos los resultados presentados en la sección V, la organización, desarrollo y enfoque realizado en la asignatura ha sido valorado positivamente por el alumnado del grupo 2, y también por el grupo de control. Estos resultados permiten de partida asegurar que el desarrollo docente es similar y por lo tanto los resultados que de él se derivan pueden ser comparables. Si analizamos el desarrollo del curso de FC, podemos apuntar inicialmente a tres cuestiones cruciales para que su desarrollo sea satisfactorio: la calidad del material audiovisual, el desarrollo temporal de las sesiones de FC y la implicación del alumnado. En el grupo 2, la mayoría del alumnado valoró muy positivamente el material empleado (vídeos, apuntes, ejercicios, etc.), incluido el grupo de eléctricos ($\mu = 3.73$), por lo que ésta no parece la causa de que el curso no haya alcanzado el nivel satisfacción requerido. Por otro lado, uno de los posibles problemas que pudieron existir para afectar a su desarrollo es que las clases en el aula eran consecutivas (miércoles y jueves). Dado que cada sesión requería al menos entre 1-2 horas de trabajo pre-asistencia al aula, los estudiantes que tienen un conocimiento menor, como el caso de los eléctricos, pudieron sentirse sobrepasados por el trabajo y el tiempo que debían dedicar entre clases. Esto nos lleva al tercero de los factores, la implicación de todo el alumnado, que parece claro no se ha conseguido, generando que algunos estudiantes no puedan participar en clase y aprovechar así el modelo mixto que propone la FC. En este punto, el alumnado que viene de la mención de electrónica pudo motivarse e implicarse mejor al tener un mayor conocimiento y resultarles más sencilla la nueva dinámica. Esta reflexión, se ve reflejada en las respuestas libres del apartado resultados. En este sentido, cabe replantearse el calendario semanal de la asignatura para poder establecer un timing más acorde al perfil heterogéneo de los alumnos del grupo 2 y al diseño de un curso FC. Sin embargo, este desajuste en el desarrollo de la asignatura no justifica exclusivamente el rechazo general de este grupo de alumnos/as. Por ello, al finalizar la evaluación (enero 2024), se realizó una entrevista personal con varios alumnos que quisieron participar en el estudio para comentar aspectos positivos y negativos de la asignatura en representación de sus compañeros. En la entrevista, dos de los estudiantes, de la especialidad de eléctrica manifestaron que el desarrollo de la FC resultó muy complicado debido a dos cuestiones: su nivel de conocimiento de partida en electrónica no era el adecuado, y sentían que el uso de la FC les hacía "trabajar" y dedicar mucho más tiempo que sus compañeros del grupo 1, cuya metodología docente era magistral y a los que consideran como iguales (alumnado de bajo conocimiento en electrónica). Percibían que estaban en desventaja, que su esfuerzo era mayor y que dedicaron más tiempo para obtener el mismo resultado. Esta insatisfacción parece ser la causa de los resultados mostrados en la encuesta y la falta de implicación. Parece que los estudiantes se limitan a valorar su esfuerzo en base al realizado por sus compañeros, de forma que no se centran en el aprendizaje, más bien en el resultado final. Trabajos previos analizando el empleo de la FC para el desarrollo de cursos académicos superiores ya apuntan en la misma dirección [28]–[30], en especial en lo relativo a la preparación deficiente de las clases y la falta de motivación entre los alumnos cuando trabajan en dinámicas de FC [28].

En contraste la metodología PBL ha tenido una aceptación acorde a los objetivos perseguidos. Esta asimetría se justifica ya que es un trabajo aplicado en grupo, colaborativo y con una dinámica mucho más abierta al ritmo personal. Lo anterior, unido a su carácter más práctico, determinan que la motivación, implicación y percepción de esfuerzo en la actividad sea mucho mejor que en la FC, actividad que requiere una implicación individual mucho más intensa, donde deben enfrentarse al estudio solos y sin el apoyo de nadie. A ello se suma que los alumnos que se perciben con menor conocimiento se sientan "injustamente tratados" y la desmotivación crezca o retroalimente entre ellos.

Por último, si analizamos comparativamente los resultados de ambos grupos, tanto en la encuesta como en los resultados académicos, no se aprecian mejoras significativas que puedan establecer con claridad que este tipo de metodologías docentes es más eficaz que el uso de una clase presencial. Tanto en la experiencia de aprendizaje, valoración y relación alumnado-docente, los resultados no parecen apuntar a una mejor percepción entre los alumnos. El único aspecto donde el grupo 2 superaba sustancialmente al grupo 1, ha sido en que la tasa de éxito de la asignatura, que es un 10% mejor, pero estos resultados son lógicos ya que la mayoría del alumnado del grupo 1, poseía un nivel de conocimiento en electrónica muy inferior a cualquiera de los alumnos del grupo 2, por lo que era más probable un peor desempeño promedio entre ellos.

VII. Conclusiones

En este estudio se presenta el diseño implementación, y evaluación de un modelo de clase invertida y aprendizaje basado en proyectos para la formación en electrónica industrial de estudiantes del Máster de Ingeniería Industrial de la UPNA. Bajo un prisma de diseño cognitivo y constructivista, se desarrolló un curso de FC para el estudio de los contenidos teóricos de la asignatura, combinado con un proyecto electrónico IoT destinado a aplicar los conceptos estudiados. El curso fue desarrollado sobre un grupo de 45 estudiantes, con conocimientos previos en electrónica, y sus resultados fueron comparados con los de un grupo de control de 38 alumnos, cuyos contenidos teóricos fueron

desarrollados con una clase magistral estándar. Los resultados han mostrado que la percepción que un 40% de los alumnos tienen sobre sí mismos en la asignatura (conocimientos previos, gestión tiempo, relación entre iguales) suponen un obstáculo para el desarrollo exitoso de la metodología de FC al no ser capaces de implicarse y seguir su desarrollo programado adecuadamente. Esto unido a una distribución temporal de las clases problemática, ha propiciado que la actividad FC no haya resultado efectiva a parte del alumnado limitando los objetivos de aprendizaje perseguidos. En contraposición, el alumnado del curso ha manifestado una buena valoración del proyecto IoT con independencia de su formación previa debido al perfil de actividad grupal colaborativa, abierta y más aplicada. De igual forma, el curso propuesto no ha manifestado una mejora significativa de los resultados obtenidos con respecto al grupo de control, más allá de los debidos a un conocimiento descompensado en electrónica entre los grupos, por lo que deberá replantearse el diseño de curso con el objetivo de subsanar todos los errores encontrados.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en esta comunicación se enmarca dentro del desarrollo del proyecto de innovación educativa PINNE 2022 de la Universidad Pública de Navarra "Aplicación de metodologías activas basadas en casos reales - Colaboración Universidad-Empresa".

REFERENCIAS

[1] C. C. Bonwell and J. A. Eison, Active Learning: Creating Excitement in the Classroom. 1991 ASHE-ERIC Higher Education Reports. 1991.

[2] S. Freeman et al., "Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics," Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., vol. 111, no. 23, pp. 8410–8415, Jun. 2014, doi: 10.1073/PNAS.1319030111/SUPPL_FILE/PNAS.1319030111.ST04.DOCX.

[3] D. A. Bernstein, "Does active learning work? A good question, but not the right one.," Scholarsh. Teach. Learn. Psychol., vol. 4, no. 4, pp. 290–307, Dec. 2018.

[4] Akiyama Koji, "Problem-based Learning Style IoT System Education Method by Student's Self-construction of Prototype System | Semantic Scholar," Int. J. Internet Things 2018, vol. 7, no. 2, pp. 30–36, 2018.

[5] D. López-Fernández, P. Salgado Sánchez, J. Fernández, I. Tinao, and V. Lapuerta, "Challenge-Based Learning in Aerospace Engineering Education: The ESA Concurrent Engineering Challenge at the Technical University of Madrid," Acta Astronaut., vol. 171, no. December 2019, pp. 369–377, 2020.

[6] D. P. Morales, E. Castillo, L. Parrilla, A. Garcia, and A. Ótin, "Towards Project-Based Learning applied to the Electronic Engineering Studies," 2015 Conf. Des. Circuits Integr. Syst. DCIS 2015, 2016.

[7] S. G. Wilson, "The Flipped Class," Teach. Psychol., vol. 40, no. 3, pp. 193–199, Jul. 2013.

[8] J. O'Flaherty and C. Phillips, "The use of flipped classrooms in higher education: A scoping review," Internet High. Educ., vol. 25, pp. 85–95, Apr. 2015.

[9] W. A. Moylan, "Learning by project: developing essential 21st century skills using student team projects," Int. J. Learn., vol. 15, no. 9, pp. 287–292, 2008, [Online]. Available: http://ijb.cgpublisher.com/product/pub.30/prod.1895

[10] P. A. E. Chis et al., "International Forum of Educational Technology & Society Investigating Flipped Classroom and Problem-based Learning in a Programming Module for Computing Conversion Course Menyelidiki Flipped Classroom dan Pembelajaran Berbasis Masalah dalam Modul Pemrogra," Int. Forum Educ. Technol. Soc. Investig., 2018, [Online]. Available: https://doi.org/103.119.141.233

[11] V. S. Andrini, H. Pratama, and T. W. Maduretno, "The effect of flipped classroom and project based learning model on student's critical thinking ability," J. Phys. Conf. Ser., vol. 1171, no. 1, 2019.

[12] M. Chi et al., "Implementation of the Flipped Classroom Combined with Problem-Based Learning in a Medical Nursing Course: A Quasi-Experimental Design," Healthc., vol. 10, no. 12, pp. 1–11.

[13] L. Moreno-Ruiz et al., "Combining flipped classroom, project-based learning, and formative assessment strategies in engineering studies," Int. J. Eng. Educ., vol. 35, no. 6 A, pp. 1673–1683, 2019.

[14] M. Paristiowati, U. Cahyana, and B. I. S. Bulan, "Implementation of Problem-based Learning – Flipped Classroom Model in Chemistry and Its Effect on Scientific Literacy," Univers. J. Educ. Res., vol. 7, no. 9 A, pp. 56–60, 2019.

[15] K. Chua and M. Islam, "The hybrid Project-Based Learning–Flipped Classroom: A design project module redesigned to foster learning and engagement," Int. J. Mech. Eng. Educ., vol. 49, no. 4, pp. 289–315, Oct. 2021.

[16] A. Andueza, "Sistemas electrónicos e instrumentación." https://www.unavarra.es/ficha-asignaturaDOA?idioma=es&codAsig=720204

[17] M. Alias, T. A. Lashari, Z. A. Akasah, and M. J. Kesot, "Translating theory into practice: integrating the affective and cognitive learning dimensions for effective instruction in engineering education," Eur. J. Eng. Educ., vol. 39, no. 2, pp. 212–232, 2014.

[18] L. D. Lapitan, A. L. A. Chan, N. S. Sabarillo, D. A. G. Sumalinog, and J. M. S. Diaz, "Design, implementation, and evaluation of an online flipped classroom with collaborative learning model in an undergraduate chemical engineering course," Educ. Chem. Eng., vol. 43, no. January, pp. 58–72, 2023.

[19] A. Andueza, "Vídeo Termoresistencias," Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=uEJlrRwFWLg

[20] R. Motameni, "The combined impact of the flipped classroom, collaborative learning, on students' learning of key marketing concepts," J. Univ. Teach. Learn. Pract., vol. 15, no. 3, 2018.

[21] G. M. Novak, "Just-in-time teaching," New Dir. Teach. Learn., vol. 2011, no. 128, pp. 63–73, Dec. 2011, doi: 10.1002/TL.469.

[22] A. M. Andueza Unanua, "Design of an Internet of Things project for electronic instrumentation training of industrial engineers," 15th Int. Conf. Technol. Learn. Teach. Electron. TAEE 2022 - Proc., 2022.

[23] H. W. MARSH, "Seeq: a Reliable, Valid, and Useful Instrument for Collecting Students' Evaluations of University Teaching," Br. J. Educ. Psychol., vol. 52, no. 1, pp. 77–95, 1982.

[24] M. Corbalan, I. Plaza, E. Hervas, E. A. J. Zaragoza, and F. Arcega, "Reduction of the Students' Evaluation of Education Quality questionnaire," 2013 Fed. Conf. Comput. Sci. Inf. Syst. FedCSIS 2013, pp. 695–701, 2013.

[25] A. Andueza, "Cuestionarios empleados en el estudio para los grupos 1 y 2.," 2024. https://drive.google.com/file/d/1pTDx2L_9kLTjM4-Ezu6tNNdy-Af4HBeq/view?usp=sharing

[26] M. Tavakol and R. Dennick, "Making sense of Cronbach's alpha," Int. J. Med. Educ., vol. 2, pp. 53–55, Jun. 2011.

[27] E. Sözen and U. Güven, "The Effect of Online Assessments on Students' Attitudes Towards Undergraduate-Level Geography Courses," Int. Educ. Stud., vol. 12, no. 10, p. 1, 2019.

[28] G. Akçayır and M. Akçayır, "The flipped classroom: A review of its advantages and challenges," Comput. Educ., vol. 126, pp. 334–345, Nov. 2018.

[29] J. D. Smith, "Student attitudes toward flipping the general chemistry classroom," Chem. Educ. Res. Pract., vol. 14, no. 4, pp. 607–614, 2013.

[30] P. A. Porcaro, D. E. Jackson, P. M. McLaughlin, and C. J. O'Malley, "Curriculum Design of a Flipped Classroom to Enhance Haematology Learning," J. Sci. Educ. Technol., vol. 25, no. 3, pp. 345–357, Jun. 2016.

Metodología Basada en Proyectos para Introducir en la Electrónica a Estudiantes de Diseño Industrial

Noelia Marzal Peña
Departamento de Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos
University of Málaga, Málaga 29071, Spain
Email: noeliamarzal@uma.es

Sebastian Martin
Departamento de Ingeniería Eléctrica
University of Málaga, Málaga 29071, Spain
Email: smartin@uma.es

***Abstract*—La electrónica está presente en multitud de productos en forma de comunicaciones, sensores, control, etc.., y suele ser un componente importante. Por lo tanto, tener conocimientos de electrónica para poder integrar los sistemas electrónicos en los productos es de gran relevancia en su diseño. Aquí se propone una metodología basada en proyectos para un curso introductorio a la electrónica en Ingeniería de Diseño, que tiene en cuenta el enfoque particular de la Ingeniería de Diseño y resuelve las principales dificultades que hemos detectado que encuentran los estudiantes en relación a la electrónica en el diseño de productos.**

***Index Terms*—Diseño Industrial, aprendizaje basado en proyectos, electrónica básica, aprender haciendo**

I. Introducción

La electrónica está presente en multitud de productos industriales, en diferentes formas: sensores, comunicaciones, control, etc.. y por ello es imprescindible que el alumnado del Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo del Producto, desarrolle las competencias necesarias para integrar estos elementos en el diseño de productos.

A. Contexto

El título de Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo del producto en la Universidad de Málaga, está enfocado a formar al alumnado de manera transversal en las diferentes ramas que engloba el diseño de productos, entendido éste como diseños de cualquier índole que combinen las prestaciones tecnológicas e industriales con las estéticas, culturales, funcionales, medioambientales y de calidad. Y, en muchos casos, para conseguir las prestaciones funcionales es necesario recurrir a la electrónica. Por ello hay varias asignaturas dentro del plan de estudio con el objetivo de que el alumnado adquiera las competencias necesarias para aplicar la electrónica en los productos que diseñen. Entre esas asignaturas destacamos las tres siguientes, que son obligatorias:

- En primer curso "Fundamentos de Informática", que proporciona las bases de programación y funcionamiento de computadores.
- En segundo curso "Fundamentos de Ingeniería Eléctrica" que trata principalmente de la teoría de circuitos para corriente continúa, alterna y sistemas trifásicos.
- Y en tercer curso "Electrónica y Automatización del Producto" donde se proporciona una introducción a la electrónica analógica y la electrónica digital, incluyendo también sensores, actuadores y algoritmos y procesos de automatización.

Este trabajo fue financiado en parte por el Departamento de Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos y por el grupo de investigación PAIDI TEP 144 ambos de la Universidad de Málaga.

En los últimos años hemos asistido a una gran difusión de los denominados "productos inteligentes", en su mayoría basados en electrónica, donde la parte funcional ya se les presupone y donde otros aspectos como la estética han pasado a ser aspectos diferenciadores (ante las mismas prestaciones). Como ejemplo representativo se puede considerar la lámpara LED de *De LaMetric Sky* [1], que consiste en un conjunto de teselas LEDs triangulares que pueden organizarse para representar diferentes formas en el plano. Además también se puede elegir el contenido que se muestra en las teselas, luces de diferentes colores, imágenes o patrones que se pueden configurar y seleccionar desde un teléfono inteligente. En las Figs. 1 y 2 se muestra la misma lámpara en dos configuraciones diferentes de forma y contenido.

Siguiendo con los productos de iluminación, también se han integrado en los últimos años otros elementos como placas solares para alimentación de baterías que alimentan al elemento generador de luz. Un ejemplo es la lámpara de la Fig. 3, [2]. Otros elementos que también son cada vez más frecuentes son los sensores táctiles para encendido y apagado o los sensores de presencia.

Hemos detectado que los alumnos tienen dificultades para relacionar la teoría con la práctica y muchos se quedan en la forma estética del producto sin ahondar en los elementos

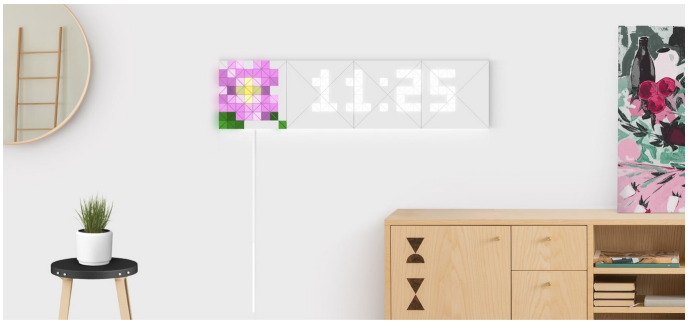


Fig. 1. Lámpara LaMetric Design, [1]

Fig. 2. Lámpara LaMetric, [1]

electrónicos. Algunos alumnos, conscientes de la importancia de integrar elementos electrónicos en los productos, tratan de profundizar en ese tema en el Trabajo de Fin de Grado (TFG). Esa profundización suele plantearse como una actividad extra que les supone un gran esfuerzo y en muchas ocasiones se frustran y no terminan de detallar esa parte del producto.

Entre las principales dificultades observadas destacamos:

- Los estudiantes de Diseño suelen ver la electrónica como algo exógeno al proceso de diseño del producto, por lo que inicialmente tienen poca motivación para aprender sobre electrónica;
- Al tener pocas asignaturas relacionadas directamente con la electrónica, han tenido pocas oportunidades de practicar con las herramientas y conceptos básicos de la electrónica.

Fig. 3. Lámpara de Mesa Solar LED Inalámbrica para Exterior Luize, [2]

B. Objetivos

Una vez detectada la dificultad que presenta el alumnado en la realización de la parte electrónica que componen los productos, se propone aquí una metodología de enseñanza que trata de resolver esas dificultades. En particular la metodología propuesta contiene un entorno y unas actividades programadas en el tiempo para ayudar al estudiantado a adquirir las competencias que necesitan para diseñar productos con electrónica. Y que ese diseño sea viable económica y técnicamente, con el objetivo de que les sirva en el ámbito profesional que desarrollen cuando completen esta parte de su formación académica.

C. Revisión de la literatura

La literatura sobre metodología basada en proyectos es muy amplia. Los principios de esta metodología están bien establecidos y hay multitud de publicaciones sobre su aplicación, como por ejemplo: [3] donde se aplica a instalaciones de generación fotovoltaica, [4] donde se aplica a asignatura de diseño en una universidad técnica de Dinamarca, [5] en la que se aplica a los sistemas eléctricos de potencia, o [6] que describe su aplicación a la enseñanza de la electrónica en China.

La contribución de este trabajo frente a la extensa literatura existente consiste en la adaptación del método de aprendizaje basado en problemas al alumnado del Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo del Producto de la Universidad de Málaga. Se han identificado las principales dificultades que encuentra el alumnado de este Grado en la implementación de la electrónica en sus proyectos de diseño, y se han propuesto soluciones, que se han llegado a implementar en parte, incluyendo aquí algunos de los resultados obtenidos.

II. Metodología

La metodología propuesta tiene en cuenta las recomendaciones de Larmer y Mergendoller [7] sobre la aplicación del aprendizaje basado en problemas. Las recomendaciones en [7] resumen la experiencia por parte del profesorado en la aplicación durante más de 10 años del aprendizaje basado en problemas. Resumimos aquí las recomendaciones de [7] con algunas adaptaciones a nuestro caso:

1) Generar la necesidad de saber sobre el tema.
2) Una o varias cuestiones sobre las que centrar el proyecto. En el planteamiento de las cuestiones se sigue un enfoque constructivo, comenzamos por cuestiones sencillas por ejemplo diseñar y construir una lámpara con un interruptor de proximidad, y progresivamente a lo largo del curso se van planteando cuestiones más complejas. Esto se hace así porque hemos observado que plantear un proyecto completo con todas las cuestiones desde el principio, suele producir frustración en la mayor parte de nuestro estudiantado, que encuentra un escalón demasiado alto entre su punto de partida y los objetivos que se fijan.
3) Aprendizaje centrado en el alumno, el alumnado toma la responsabilidad de su propio aprendizaje.

4) También se intenta incorporar el uso de habilidades como la colaboración y el uso de la inteligencia artificial para resolver algunas cuestiones. El alumnado trabaja en pequeños grupos.
5) Se les proporcionan (o se les recuerdan) herramientas que tienen a su disposición como recursos bibliográficos, contenido web, inteligencia artificial, etc.. Y la importancia de que busquen sus propias respuestas y mantengan un espíritu crítico con la información y las soluciones que encuentran.
6) Su evolución es supervisada por el profesorado, que proporciona comentarios y sesiones de discusión para proporcionar información sobre hasta qué punto se están alcanzando los objetivos y qué se puede hacer para seguir mejorando. El profesorado pasa a ser un guía o tutor del trabajo.
7) Finalmente los proyectos se presentan públicamente en clase y cada grupo debe defender su solución.

Los proyectos se plantean como casos reales. La información adquirida a través del aprendizaje auto dirigido forma parte de su experiencia que es la mejor fórmula de aprendizaje. Los principales hitos que deben completar en el proyecto se muestran en Fig. 4.

Para la incorporación de la electrónica al proyecto consideramos una lista de componentes electrónicos habituales y opciones sobre esos componentes empleados en productos, que resumimos a continuación:

- Que contengan sensores (luz, temperatura, presión, movimiento, etc..) y realice operaciones de forma automática utilizando la información de esos sensores.
- Interfaz que muestre información de interés para el usuario (una pequeña pantalla LED por ejemplo).
- Interfaz que permita al usuario introducir información o instrucciones en el dispositivo, por ejemplo: ajustar la hora, fijar una alarma, etc..
- Comunicaciones entre el producto y otros dispositivos (bluetooth, wifi, gps, etc..). Por ejemplo que envíe información sobre su posición, o que el usuario pueda acceder de forma remota a las medidas de los sensores del dispositivo, o que el usuario pueda enviar información al dispositivo (datos o instrucciones).

Conocido el entorno donde actuar, se crean las especificaciones del proyecto. En este punto de definen las categorías generales para la construcción de los componentes del proyecto, que permitan crear diferentes configuraciones para alcanzar los objetivos. Es decir, se definen los diferentes componentes que van a dar solución al problema planteado y a las especificaciones definidas. Será importante en este punto, definir las posibles entradas de información e instrucción así como posibles salidas de información.

Posibles entradas de información e instrucciones:

- Fijos en la memoria del dispositivo (“valores de fábrica” que no se pueden cambiar).
- A través de: botones, teclado, interruptores.
- A través de pantalla táctil.
- Por voz (o ciertas palabras clave o sonidos).
- Por medio de sensores: luz (puede ser cierto rango concreto, como por ejemplo infra-rojo), temperatura, humedad, presión, movimiento, campo magnético (sensor de efecto hall), nivel de agua, inclinación, etc..

Posibles salidas de información:

- Luz.
- Acústico.
- Pantalla.
- Movimiento: dispositivo con partes móviles, por ejemplo una envolvente que se abra o se cierre, o partes que generen un flujo de aire (tipo ventilador).
- Temperatura: por ejemplo que ciertas partes del dispositivo se calienten o se enfríen.

Como aplicación de esta metodología se plantea como proyecto de curso, el diseño y fabricación de un producto “sencillo” que contenga alguna parte de electrónica, como por ejemplo una lámpara en la que se utiliza electrónica para controlar la intensidad de la luz o realizar combinaciones de luces, en las que se controla cuando se enciende y se apaga cada tipo de luz. En esta metodología destacamos los siguientes puntos:

1) el hecho de tener que fabricar un producto que funcione les anima a aprender más sobre los elementos que intervienen (entre ellos la electrónica)
2) el proyecto se organiza por fases, cada una con objetivos específicos (diseño conceptual, selección de materiales, electrónica, etc.),
3) en cada fase los alumnos son tutorizados por el profesor y se les facilita material de consulta adicional para que puedan extender su aprendizaje.

Fig. 4. Hitos a completar durante el desarrollo del proyecto

III. Caso de estudio y resultados

En la asignatura de Proyectos de Diseño del tercer curso del Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo del Producto, el alumnado aprende a realizar la parte formal de un proyecto de diseño de producto, a generar todos los documentos que engloban un producto para que este pueda ser fabricado bajo la norma UNE 157001:2014: Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico.

Los conocimientos previos de electrónica, electricidad, modelado, generación de planos, cálculo de estructuras, son

básicos para cursar esta asignatura y son adquiridos en los cursos anteriores.

Como parte del aprendizaje basado en proyectos, la asignatura también tiene como objetivo, que el alumnado aprenda metodologías que le ayuden a poner en el mercado productos viables técnica y económicamente.

En el curso 2023-2024, se le propuso al alumnado poner aprueba sus conocimientos de electrónica, mezclados con el diseño y para ello se les planteó el reto o problema de diseñar una lámpara.

Tal y como se describe en la metodología el primer paso fue fijar los **objetivos** asimilando conceptos y adquiriendo competencias en el mundo de la iluminación.

Para que el alumnado tuviera conciencia de los elementos electrónicos y componentes del producto objeto de estudio, se uso la metodología de la ingeniería inversa.

Tal y como indica el artículo de Ramos Acosta, [8] la ingeniería inversa estudia o analiza un producto disponible en el mercado (software, dispositivo electrónico, pieza mecánica, estructura, etc.) con el fin de conocer detalles de su diseño, construcción y operación con el fin de estudiar en profundidad el producto y poder hacer mejoras. En este caso, esta metodología ha sido usada para que el alumnado conozca los componentes electrónicos de una lámpara y como estos se integran en la apariencia estética del producto.

Al alumnado, ya organizado en grupos, en concreto se formaron 8 grupos, compuestos por entre 5 y 6 personas, se les facilitó una lámpara sencilla para su estudio y herramientas para que pudieran analizar su montaje y elementos.

Una vez comprendido el funcionamiento y elementos del producto, se pasó al siguiente punto, la **definición estratégica**, en este punto cada grupo tenía que decidir que tipo de lámpara iba a hacer, para ello hicieron una clasificación:

- Interior: lámpara de pie, de pared, de sobremesa, colgante, etc...
- Exterior: farola, uso privado, público, baliza, empotrado...

Acotado el mundo de la iluminación y centrados en un campo, el alumnado llevó a cabo un estudio de mercado de las diferentes opciones y aplicaciones que ya existen con la finalidad de generar las especificaciones del producto, en este caso tenían que resolver las siguientes preguntas:

- ¿cómo se enciende la lámpara?
- ¿que fuente de alimentación lleva?
- ¿que tipo de bombilla debe llevar? ¿temperatura de color?¿CRI?
- ¿contará con algún elemento adicional acústico, pantalla?
- ¿cómo se lleva a cabo el mantenimiento del producto?
- ¿contará con algún sensor de encendido o apagado automático?
- ¿que componentes eléctricos y electrónicos lleva y como se relacionan?
- ¿tienen los elementos que estar protegidos con algún IP específico?
- ¿qué normativa debe cumplir el producto y los elementos que la integran?
- ¿cuanto ocupan los elementos electrónicos y eléctricos y como lo encuadro en la estética del producto?
- ¿puedo innovar en el sector de alguna manera?
- ¿a qué clase de público o usuario se dirige el producto?

En esta parte de generación de las especificaciones, el alumnado se vio abrumado por la cantidad de opciones que podían elegir y el número de preguntas o problemas a resolver para el diseño del producto que se les había asignado. En esta fase, es de gran importancia la tutorización del proyecto por parte del profesorado para guiar al alumnado y que este no se vea incapaz de realizar este paso. Con trabajo en grupo, guiados y la adquisición de conocimientos en los pasos previos,todos los grupos generaron las especificaciones del producto.

Realizadas las especificaciones de producto, se pasa a la definición de elementos, en esta parte hay que tener en cuenta la dualidad de los proyectos planteados, por una parte, deben ser técnicamente viables y funcionales y en segundo lugar, estéticamente atractivos al consumidor final.

En esta parte del proyecto, el alumnado presentó bastantes dificultades en la elección de los elementos, en concreto les supone un gran esfuerzo trasladar los conocimientos teóricos en prácticos, sobretodo en la elección de los diferentes elementos que componen el producto y que no se ven de manera específica en el grado. Esto trajo como resultado que la mayoría de los grupos optaran por replicar la opción que se les había dado como ejemplo al principio, en la definición de objetivos. En concreto 5 de los 8 grupos optaron por esta opción, el 62.5% del alumnado.

Posteriormente, se llevó a acabo el desarrollo teórico del mismo, que consiste en realizar planos técnicos, arquitectura de producto, medición y presupuesto. Y por último, se les da opción de hacer un prototipo mediante impresión 3D.

Se muestran algunos de los proyectos presentados por el alumnado en las Figs. 5 a 9.

Uno de los grupos trabajó en una lámpara para uso infantil que se muestra en la Fig. 5. Esta lámpara está inspirada en el juego Tetris, y cuenta con una base luminosa y una serie de piezas que encajan en la base. El desarrollo de toda la metodología de diseño estético la justificaron según objetivos definidos en la asignatura, pero la parte eléctrica-electrónica la redujeron al mínimo como se aprecia en la Fig. 6.

Otro de los grupos desarrolló una lámpara de sobremesa con la posibilidad de quitar la tulipa para tener una lámpara auxiliar decorativa y portátil como se muestra en la Fig. 7. La idea conceptual de la lámpara se basa en un soporte para lapicero y móvil para poder usar en el escritorio y la opción de quitar la tulipa para usar esta como lámpara decorativa de sobremesa.

Este grupo contempló tres elementos eléctricos; una entrada de carga a través de un puerto USB, la fuente luminosa y la batería, como se observa en la Fig. 8, sin embargo no contemplaron los elementos de conexión entre dichos componentes, ni especificaciones técnicas de los mismos,esto ocurrió en 7 de los 8 grupos.

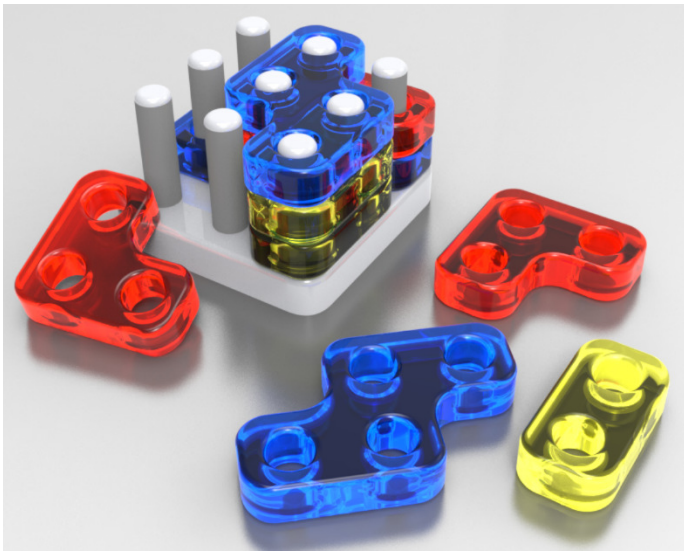


Fig. 5. Imagen de lámpara Tower Lamp realizada por alumnos

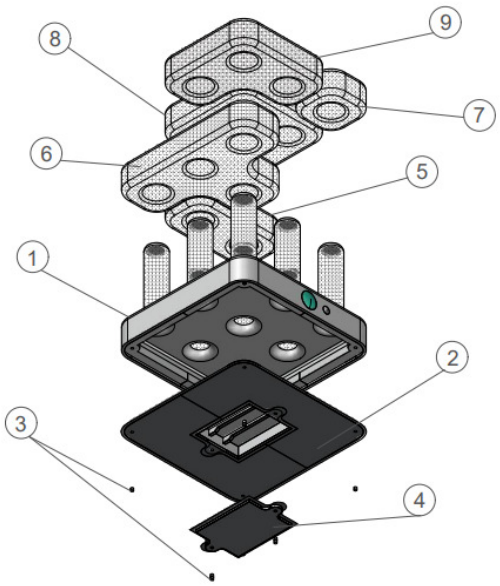


Fig. 6. Explosionado de lámpara Tower Lamp Alumnos

Por último, destacar, que hubo un único grupo, de 8 que había en total, que presentó un esquema de conexión eléctrica del producto mostrado en la Fig. 9 , que además tenía la peculiaridad de ser una lámpara con una innovación en la parte de la tulipa, ya que contemplaron la levitación magnética como unión de la parte superior.

IV. Conclusiones

El número de alumnos que cursó la asignatura, y por tanto hizo el proyecto fueron un total de 47, agrupados en grupos de 6-7 alumnos, se crearon un total de 8 grupos de trabajo. Aún contando con una lámpara física de ejemplo, el alumnado presentó las siguientes dificultades:

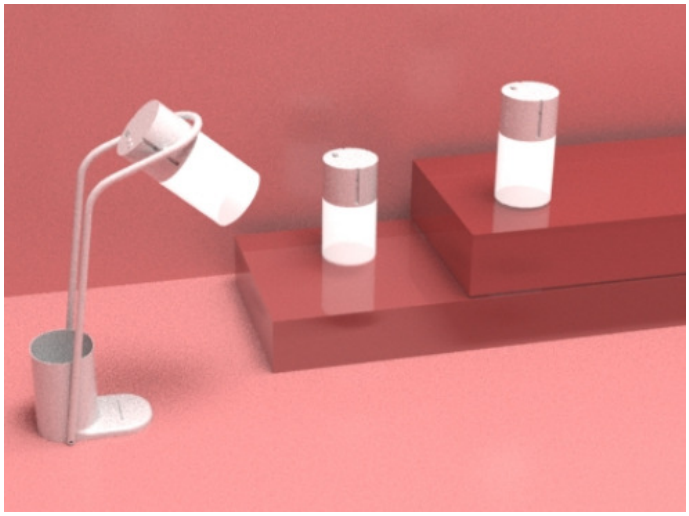


Fig. 7. Imagen fotorrealista lámpara de sobremesa Nokta

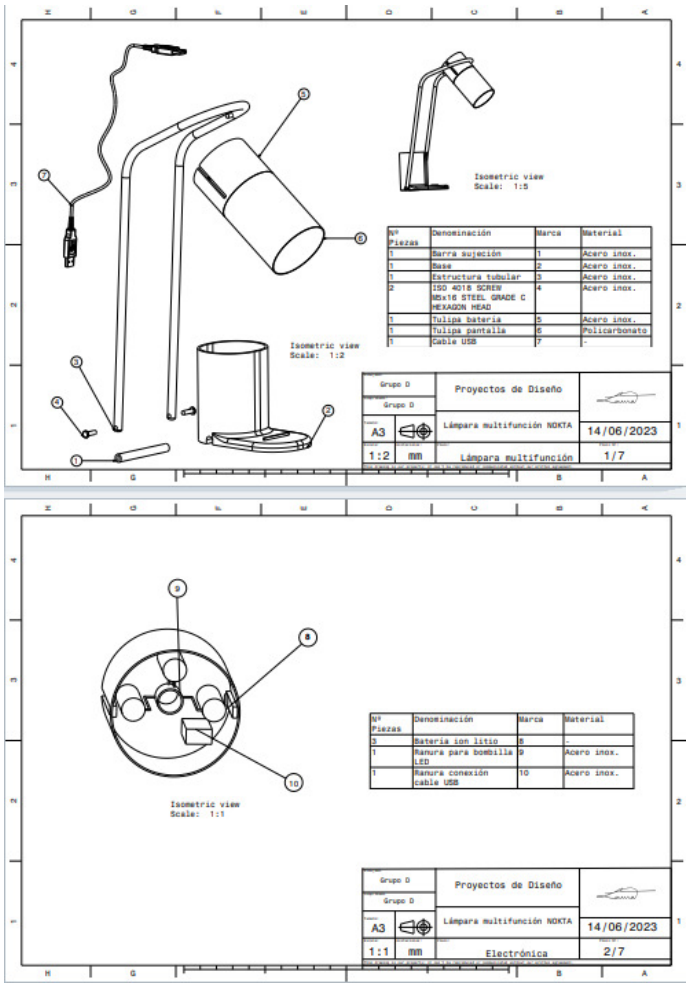


Fig. 8. Plano explosionado lámpara de sobremesa Nokta Alumnos

- No saben aplicar la parte teórica de diseño de circuitos, esto se da en el 12.5% de los grupos.
- Les cuesta encontrar alternativas al objeto que se les

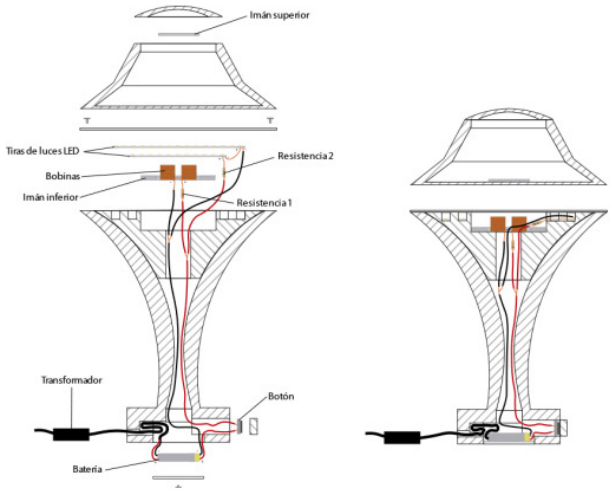


Fig. 9. Ilustración de las conexiones y elementos eléctricas del producto MagneLamp

facilita, con lo que el conjunto en general, usaba como fuente de alimentación pilas de usar y tirar para sus productos, solo después de indicárselo, algunos cambiaron a baterías alimentadas por cables USB. En concreto, el 12.5% , 1 grupo de los 8, uso pilas, el 37.5% , que conforman 3 de los ocho grupos, optó por carga mediante batería a través de conexión USB y el 50% , 4 grupos de los ocho, optaron por enchufarlo a la corriente directamente mediante un interruptor.

- Obvian los espacios físicos dentro del producto que necesitan los elementos electrónicos. Esto ocurre en el 100% de los grupos.
- Desconocen los diferentes componentes que debe llevar el sistema electrónico, solo después de indicárselo, algunos les añaden un espacio y una entrada en la carcasa para carga de batería. Esto ocurre en el 37.5% de los grupos participantes.
- Debido a la complejidad que les supone la parte electrónica, en la mayoría de los casos, optan por replicar el ejemplo que se les facilitó al principio del ejercicio. Aún así, obvian las conexiones entre piezas, esto ocurrió en el 100% del conjunto.
- Solo un grupo nombra elementos de regulación de intensidad y temperatura de color en la lámpara pero sin especificar el funcionamiento, unión ni características técnicas.

Sin embargo, a pesar de estas dificultades, en general la respuesta del alumnado ha sido bastante positiva, se han involucrado en el proyecto y hemos observado un incremento tanto en la motivación para aprender electrónica como en la consecución de los resultados de aprendizaje relacionados con la electrónica. Como principal dificultad destacamos que al alumnado le cuesta relacionar los conceptos teóricos de las distintas áreas de conocimiento que se les enseña en el grado, pero que con una tutorización, guiándoles y ofreciéndoles metodologías o herramientas de aprendizaje práctico, son capaces de resolver los problemas planteados y desarrollar productos novedosos y técnicamente viables.

Destacar también, que lo que más motiva al alumnado, es poder realizar físicamente un prototipo de su producto una vez desarrollada toda la parte teórica del mismo. Hemos observado que ésta es la mejor forma de plasmar, entender y fijar los conceptos teóricos aprendidos en asignaturas previas. Y que además les sirve de base para seguir formándose como profesionales del campo en el que se vayan a desarrollar una vez finalizado el grado.

Seguiremos desarrollando y aplicando metodologías nuevas de enseñanza con el objetivo de que el alumnado adquiera competencias que les sean realmente útiles en su vida profesional, en particular en el desarrollo de productos con componentes electrónicos.

AGRADECIMIENTOS

Les damos las gracias a los alumnos del Grado de Diseño de Productos que cursaron la asignatura de Proyectos del Diseño durante el curso 2022-2023 por participar en este pequeño experimento que nos ha hecho ver el papel tan importante que juega el profesorado en la motivación del alumnado para enfrentarse al ámbito laboral.

REFERENCES

[1] LaMetric Sky, "The most versatile smart lighting ever created." Consulted on February 2024. Online https://lametric.com/en-US/sky/overview.

[2] Sklum, "Luize Outdoor Wireless LED Solar Table Lamp." Consulted on February 2024. Online https://www.sklum.com/es/comprar-lamparas-mesa-exterior/151826-lampara-de-mesa-solar-led-inalambrica-para-exterior-luize.html.

[3] F. Martinez, L. C. Herrero, and S. de Pablo, "Project-Based Learning and Rubrics in the Teaching of Power Supplies and Photovoltaic Electricity," *IEEE Transactions on Education*, vol. 54, no. 1, pp. 87–96, 2011.

[4] Z. Zhang, C. T. Hansen, and M. A. E. Andersen, "Teaching Power Electronics With a Design-Oriented, Project-Based Learning Method at the Technical University of Denmark," *IEEE Transactions on Education*, vol. 59, no. 1, pp. 32–38, 2016.

[5] N. Hosseinzadeh and M. R. Hesamzadeh, "Application of Project-Based Learning (PBL) to the Teaching of Electrical Power Systems Engineering," *IEEE Transactions on Education*, vol. 55, no. 4, pp. 495–501, 2012.

[6] H. Fan, H. Xie, Q. Feng, E. Bonizzoni, H. Heidari, M. P. McEwan, and R. Ghannam, "Interdisciplinary Project-Based Learning: Experiences and Reflections From Teaching Electronic Engineering in China," *IEEE Transactions on Education*, vol. 66, no. 1, pp. 73–82, 2023.

[7] J. Larmer and J. Mergendoller, "Seven Essentials for Project-Based Learning," *Giving Students Meaningful Work*, vol. 68, no. 1, pp. 34–37, 2010.

[8] D. A. Ramos Acosta, "(in Spanish) Uso de la ingeniería inversa como metodología de enseñanza en la formación para la innovación," in *World Engineering Education Forum: Innovation In Research And Engineering Education: Key Factors For Global Competitiveness*, (Colombia), pp. 1–7, 2013.

Sistema de ensayo y caracterización de cargadores de baterías para vehículos eléctricos

Manuel A. Perales Esteve
Dpto. de Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
mperales@us.es

Alfredo Pérez Vega-Leal
Dpto. de Ing. Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
alperez@us.es

Federico Barrero
Dpto. de Ing. Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
fbarrero@us.es

Manuel G. Satué
Dpto. de Ing. de Sistemas y Automática
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
mgarrido16@us.es

M. Ángeles Serrano Ochoa
Dpto. de Derecho Procesal
Universidad de Sevilla
Sevilla, Spain
mserrano13@us.es

***Abstract*— La presencia de infraestructura de carga es esencial para potenciar y fomentar el uso del vehículo eléctrico. Esta infraestructura pública o privada se puede considerar como una parte de la tecnología asociada al vehículo eléctrico, y debería estudiarse y analizarse como parte del currículo en ingenierías relacionadas con electricidad, electrónica y energía, entre otras. En este trabajo se hace una descripción general de las principales características hardware y software asociadas un cargador comercial de vehículos eléctricos, y se presenta una plataforma funcional que puede usarse en actividades docentes. En la realización del sistema se hace hincapié en el protocolo vehículo-poste de recarga, desarrollándose un emulador de vehículo eléctrico que permite el uso del poste sin vehículo real, lo que facilita el uso en sesiones de laboratorio.**

Keywords*— *Clases prácticas, infraestructura de recarga de baterías, vehículos eléctricos.

INTRODUCCIÓN

En comparación con los vehículos basados en motores de combustión interna tradicionales, el fomento de los vehículos eléctricos (VE) aparece hoy en día como una vía que debe ser explotada para lograr cero emisiones, independientemente de la controversia inherente a esta tecnología en lo relativo a sus efectos medioambientales dado que los vehículos enchufables siguen generando problemas que deben ser abordados. En cualquier caso, los beneficios demostrables asociados al uso de VE son evidentes, al no generar gases de efecto invernadero, ofrecer menores costes de mantenimiento y utilización, así como una conducción silenciosa y suave, y por tener una mayor eficiencia que los vehículos de combustión interna [1]. Pocas áreas tecnológicas en el mundo son tan dinámicas como la relacionada con el VE que en los últimos años ha ofrecido una mejora considerable, un crecimiento exponencial de ventas, una mayor disponibilidad de modelos y un mayor rendimiento. Sirva como ejemplo que los denominados BEV, 100% eléctricos o VE basados en batería, representaron en 2023 un 13% del mercado de coches nuevos vendidos en la Unión Europea, con una tendencia comercial que le favorece frente a los vehículos convencionales de combustión interna [2]. No cabe duda de que los VE son la tecnología clave para descarbonizar el transporte por carretera, un sector que representa alrededor de una sexta parte de las emisiones de gases contaminantes globales y, como tal, vemos ambiciosas políticas públicas que fomentan su crecimiento [3], si bien podemos afirmar, en términos generales, que la disponibilidad de carga de la batería es un factor crítico para el despliegue de esta tecnología [4].

En este contexto tecnológico, la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, que cuenta con una amplia tradición de más de 50 años en la formación de ingenieros industriales, desarrolla una labor profusa y actual en el ámbito investigador [6]-[10], y va a cambiar la configuración del Grado especialista y Máster generalista en Ingeniería de las Tecnologías Industriales, pasando a un Grado generalista y dejando la especialización para el Máster. La nueva titulación de Ingeniero Industrial que se plantea es asimilable a los planes de estudio que se imparten actualmente en las Universidades Politécnicas de Madrid, Cataluña o Valencia, así como en la Universidad del País Vasco, si bien se va a ofrecer una asignatura optativa en la especialidad denominada “Electrónica para la Industrial Digital y la Transición Energética” denominada “Electrónica para Movilidad Eléctrica”, enfocada hacia la tecnología y gestión energética de los vehículos eléctricos. La nueva asignatura se centrará en la tecnología y gestión energética del VE, se impartirá durante el primer cuatrimestre del sexto curso de la titulación y tendrá asignados 5 créditos ECTS. Los contenidos que tiene asignados incluyen sistemas electrónicos de gestión energética en VE, la tecnología electrónica de potencia para VE, los cargadores e infraestructura de recarga, así como la electrónica auxiliar del vehículo. La organización docente se está desarrollando en estos momentos (la asignatura se impartirá por primera vez en el curso 2025-2026), aunque las actividades formativas y metodologías docentes que se emplearán incluyen clases prácticas, en las que se engloba la propuesta planteada en este artículo.

El trabajo que se presenta será la base que permita la convergencia entre teoría y práctica en la formación docente relacionada con la tecnología de carga de los VE. En la sección II se describen las principales características asociadas a la infraestructura de recarga de un VE. Posteriormente, en la sección III se presenta el sistema que se ha desarrollado para realizar ensayos y caracterizar el comportamiento de un sistema típico de recarga comercial. Las pruebas realizadas y las conclusiones alcanzadas se detallan en las secciones IV y V, respectivamente.

INFRAESTRUCTURA DE RECARGA EN VE

La batería del VE es, posiblemente, la principal barrera a la que se enfrentan muchos individuos a la hora de poseer un VE. A pesar de los esfuerzos por mejorar la tecnología de las baterías, la mayoría de los VE todavía tienen una autonomía limitada. Esta realidad tecnológica favorece la búsqueda de soluciones relacionadas con la disponibilidad y desarrollo de los sistemas de carga de los VE. Incluso si es posible encontrar

cargadores en un viaje, será necesario dedicar un tiempo para recargar el VE. Cada vez hay más cargadores disponibles como parte de la infraestructura pública, pero la batería sigue impidiendo que los VE alcancen su máximo potencial.

La carga de VE está disponible a diferentes velocidades, costes y ubicaciones, debiendo los cargadores adaptarse a las necesidades de los conductores, Fig. 1. En Europa, por ejemplo, se establecen cuatro niveles de carga dependiendo de la velocidad: nivel 1 (carga lenta usando AC), nivel 2 (carga entre lenta y semi rápida usando AC), nivel 3 (carga semi rápida a rápida usando AC) y nivel 4 (carga rápida en DC). Los roles estratégicos de los diferentes modos de carga dependen de donde sea la carga (carga en el hogar, carga accesible al público o carga en el trabajo), y sus principales retos y obstáculos son:

- El tiempo de recarga. Una buena parte de los cargadores públicos disponibles son de nivel 2, lo que significa que se necesitarán aproximadamente, por ejemplo, entre 8 y 12 horas para cargar completamente la batería de un Tesla. Cuando los VE inevitablemente se conviertan en algo común, será un tremendo desafío desarrollar un sistema público de soporte a la tecnología para que funcione como el usuario típico está acostumbrado. Todo a pesar de que es muy probable que la mayor parte de la carga del vehículo se realizará en la vivienda habitual del usuario.
- Los efectos generados en la infraestructura eléctrica. Los VE consumen mucha energía. En la actualidad representan aún un escaso porcentaje de los vehículos que circulan por las carreteras, y su impacto en la red eléctrica es insignificante. Sin embargo, a medida que crezca el número de VE en las carreteras, es previsible que supongan una carga importante y a considerar en la red eléctrica.

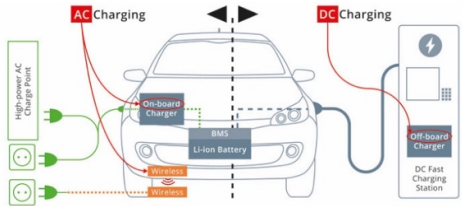


Fig. 1. Cargadores de baterías en vehículos eléctricos [5].

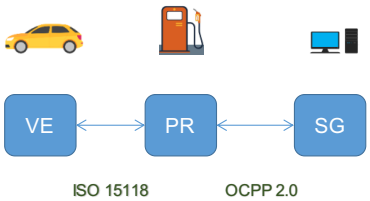


Fig. 2. Diagrama de las conexiones entre elementos del equipo de laboratorio para recarga de VE.

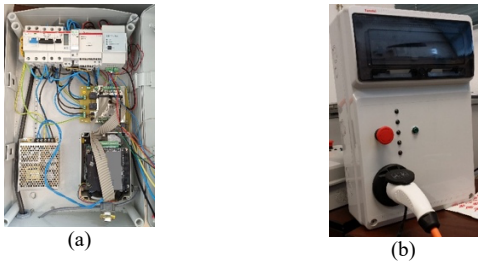
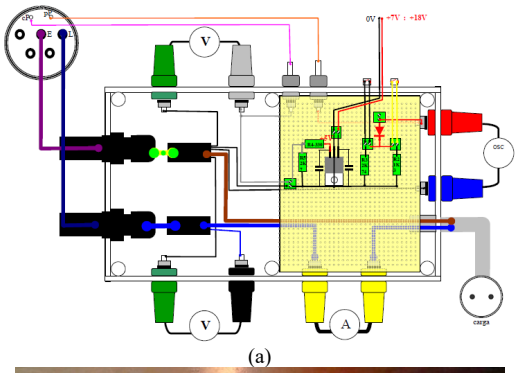
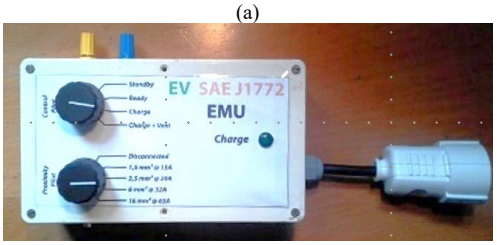

(a) (b)

Fig. 3. PR desarrollado: (a) Fotografía del interior, (b) exterior con el conector de recarga enchufado.


(a)



(b)

Fig. 4. Emulador de VE: (a) Diagrama, (b) fotografía del sistema mostrando los selectores de modo de funcionamiento.

SISTEMA DESARROLLADO

La realización del demostrador de sistema de carga de VE propuesto sigue el esquema general mostrado en la Fig. 2, en la que se aprecia que la interacción entre el VE y el poste de recarga (PR) sigue la norma ISO 15118, en la que se detalla la interfaz de comunicación del VE con la red eléctrica. Por otro lado, el PR puede ser supervisado por un sistema de gestión de la infraestructura de recarga (SG) que puede monitorizar y, en su caso, actuar sobre el proceso de recarga, por ejemplo, para autorización remota de acceso al PR. La comunicación entre PR y SG se realiza mediante el OCPP (del inglés *Open Charge Point Protocol*) que es un conjunto de normas dirigido a la recarga inteligente. El uso de OCPP facilita que los programas para la gestión (residentes en el SG) puedan obtener información actualizada sobre el estado de los procesos que involucran el PR en cada momento. De este modo, el concepto de carga inteligente se puede llevar a cabo planificando el flujo de potencia entre VE y la red.

Por otro lado, el protocolo OCPP es abierto, por lo que se puede utilizar en nuestro demostrador. En este sentido, como parte del demostrador se han realizado diversos elementos que permiten ilustrar el funcionamiento de las partes del conjunto mostrado en la Fig. 2. Estos elementos se detallan a continuación:

1. PR o poste de recarga real, basado en elementos discretos disponibles comercialmente (ver Fig. 3). Permite realizar la recarga siguiendo la norma ISO 15118. Se le ha dotado de un ordenador industrial para facilitar la implantación de OCPP y la depuración de funcionamiento.
2. Sistema de gestión o SG, que consiste en un conjunto de programas que pueden ejecutarse en un ordenador de prestaciones medias y tiene como objeto ilustrar el desarrollo de métodos de carga inteligente.
3. Emulador de VE o circuito con conectores y selectores con la capacidad de engañar al PR emulando la interacción con un VE real, Fig. 4.

Estos elementos se articulan del siguiente modo:

- SI (sistema de información) o entidad externa que proporciona la planificación de la recarga para su uso en la IR y que recaba información de ésta.
- IR (infraestructura de recarga), que incluye un conjunto de elementos geográficamente localizados en una zona concreta y cuya característica definitoria es que proporciona el espacio y los medios para producir la recarga de vehículos y también la toma de información de vehículos.
- CIR o controlador de la IR. Procesador que se encarga de interpretar las órdenes del SI y de vigilar los procesos de carga gestionando medidas, actuaciones y alarmas. Almacena y sirve al SI la información que recoge, incluyendo medidas, estados y estadísticas. Además, sirve de puente para que la información almacenada en el vehículo pueda pasar al SI bajo demanda. Entre sus elementos constituyentes cabe citar el elemento CIR-CSI (comunicaciones con el SI que se encargan de proporcionar un punto de acceso al SI) y el CIR-CL (punto de acceso a las comunicaciones locales dentro de la IR).
- PR o poste de recarga, que permite conectar el vehículo a la red de suministro eléctrico con las protecciones adecuadas, canalizando las comunicaciones entre el VE y la infraestructura por la manguera de carga o mediante comunicaciones inalámbricas. Cuenta con señaladores locales luminosos y una botonera para interactuar con el operario/usuario. Entre sus elementos constituyentes cabe citar PR-CO (comunicaciones con el operario, que dispone de una botonera y un visor sencillos para la interacción local del poste con el operario de la IR, permitiendo indicar al operario acciones a tomar y a éste recabar cierta información o tomar acciones como forzar el fin de la recarga), PR-SE (que contiene los elementos necesarios para proveer al VE de energía eléctrica proveniente de la red), PR-CVE (comunicaciones con el VE, proporcionando los medios para llevar a cabo la comunicación de datos con el VE) y PR-CL (comunicaciones locales que facilitan el acceso a la red local de la IR).
- VE o vehículo eléctrico receptor del servicio de recarga. La interacción con el mismo se realiza mediante una manguera o mediante manguera eléctrica para la carga y conexión de datos inalámbrica. Dicha interacción en realidad va dirigida a dos elementos interiores al vehículo: VE-SCar (sistema de carga que comprende la batería y los elementos para la adecuada conversión de potencia) y VE-Scom (sistema de comunicaciones con la IR, que puede ser un ordenador embarcado para comunicaciones específicas con la IR).
- OIR (operario o persona a cargo de la IR), cuyo concurso es necesario para mover de un sitio a otro los VE dentro de la IR, para realizar la conexión de la manguera y otras tareas de supervisión o maniobra.

El funcionamiento del sistema es el siguiente. El controlador de la IR pone a disposición del SI una serie de capacidades accesibles a través de comunicaciones, capacidades que constituyen la funcionalidad del CIR. Las maniobras ejecutables en el CIR a petición del SI pueden ser una recarga programada desde el SI, un aborto de recarga forzado desde el SI, un recabado de estado/históricos de la IR por parte del SI, una modificación programas/parámetros de la IR ordenado por el SI y el modo retransmisión para comunicaciones directas SI-PR.

El emulador de VE está basado en la conexión de resistencias a los terminales del cable de carga, lo que sirve para indicar al poste la disponibilidad de un vehículo para recarga y su nivel de carga actual. El esquema se muestra en la Fig. 4(a). Las señales en el conector del PR son las salidas V_{BA} (voltaje producido por el generador de pulsos en el PR medido antes de la resistencia de 1KΩ respecto a PE), I_{16} (estado del interruptor de potencia con corriente limitada a 16A; 0=abierto, 1=cerrado), I_{32} (estado del interruptor de potencia con corriente limitada a 32A; 0=abierto, 1=cerrado) e I_{VV} (interruptor que activa la ventilación en la IR a petición del VE) y las entradas V_{CP} (diferencia de potencial CP-PE medida en el zócalo del PR, pasada la resistencia de 1KΩ), V_{PP} (diferencia de potencial PP-PE medida en el zócalo del PR) e I_{MS} (estado del conmutador mecánico que detecta la inserción del conector del VE en el zócalo del PR; 0 equivale a sin conectar y 1 es indicativo de que el cable del VE está conectado al PR).

En las Tablas 1 y 2 se presenta un resumen de estados y sus señales asociadas. Concretamente, la Tabla 2 describe cómo el VE debe interpretar la señal piloto del cargador. En función de ese valor y características el VE toma la decisión de demandar un valor u otro de corriente. En la Tabla 3 se muestran las transiciones en la interacción entre el emulador y el PR.

Tabla 1. Estados y señales del emulador de VE.

Estado / Descripción	**Señal piloto**	**Potencia en cable VE**
O / Espera. El PR no tiene conectado nada.	−12 V sin pulsos	Sin potencia
I / Conectado. El PR detecta que se ha introducido una clavija (cable del VE). El voltaje V_{CP} indica el modo de carga.	−12 V sin pulsos	Sin potencia
A1 / Conectado modo 1 El PR no detecta resistencia en el circuito piloto. Puede tratarse de un VE que utiliza modo 1.	+12 V con pulsos	16 A máx.
A0 / Modo 3 interrumpido Se estaba cargando en modo 3 pero la comunicación piloto con el VE se ha perdido. Se espera.	+12 V con pulsos	Sin potencia
B / Conectado modo 3. El PR detecta VE con modo 3. No comienza la carga.	+9 V con pulsos	Sin potencia
C / Modo 3 cargando El PR detecta VE con modo 3 y usa el circuito de 32A para su carga con potencia variable.	+6 V con pulsos	32 A máx.
D / Modo 3 cargando y ventilando Cargando en modo 3 con la salida de ventilación activada.	+3 V con pulsos	32 A máx.
X / Falta diodo. Hay una conexión, pero sin diodo. Se permite vuelta a estado D.	<0 V con pulsos	Sin potencia

Tabla 2. Entradas y salidas de los estados del emulador de VE.

Estado	Entradas	Salidas
O	$V_{CP} = V_{BA}$ $V_{PP} = x$ $I_{MS} = 0$	$V_{BA} = -12V$ sin pulsos $I_{16} = 0$ $I_{32} = 0$ $I_{VV} = 0$
I	$V_{CP} = x$ $V_{PP} = x$ $I_{MS} = 1$	$V_{BA} = \pm 12V$ con pulsos $I_{16} = 0$ $I_{32} = 0$ $I_{VV} = 0$
A1	$V_{CP} = \pm 12V$ con pulsos $V_{PP} = x$ $I_{MS} = 1$	$V_{BA} = \pm 12V$ con pulsos $I_{16} = 1$ $I_{32} = 0$ $I_{VV} = 0$
A0	$V_{CP} = \pm 12V$ con pulsos $V_{PP} = x$ $I_{MS} = 1$	$V_{BA} = \pm 12V$ con pulsos (el ancho de pulso indica al VE la potencia que puede tomar) $I_{16} = 0$ $I_{32} = 0$ $I_{VV} = 0$
B	$V_{CP} = -12V$ a $+9V$ con pulsos $V_{PP} = x$ $I_{MS} = 1$	$V_{BA} = \pm 12V$ con pulsos $I_{16} = 0$ $I_{32} = 0$ $I_{VV} = 0$
C / D	$V_{CP} = -12V$ a $+6V$ con pulsos $V_{PP} = x$ $I_{MS} = 1$	$V_{BA} = \pm 12V$ con pulsos (el ancho de pulso indica al VE la potencia que puede tomar) $I_{16} = 0$ $I_{32} = 1$ $I_{VV} = 0$
X	V_{CP} / mín(V_{CP}) > $-12V$ $V_{PP} = x$ $I_{MS} = 1$	$V_{BA} = \pm 12V$ con pulsos $I_{16} = 0$ $I_{32} = 0$ $I_{VV} = 0$

Tabla 3. Transiciones en la interacción entre el emulador del VE y el PR.

Estado	Transiciones
O	A estado I si $I_{MS} = 1$
I	A estado A1 si máx(V_{CP}) = +12V, mín(V_{CP}) = −12V (no se detecta resistencia en el lado del VE). A estado B si máx(V_{CP}) = +9V, mín(V_{CP}) = −12V (2K7 Ω + diodo en el lado del VE). A estado C si máx(V_{CP}) = +6V, mín(V_{CP}) = −12V (880 Ω + diodo en el lado del VE). A estado D si máx(V_{CP}) = +3V, mín(V_{CP}) = −12V (240 Ω + diodo en el lado del VE). A estado X si mín(V_{CP}) > −12V (no se detecta diodo en el lado del VE).
A1	A estado B- si máx(V_{CP}) = +9V, mín(V_{CP}) = −12V (2K7 Ω + diodo en el lado del VE). A estado C si máx(V_{CP}) = +6V, mín(V_{CP}) = −12V (880 Ω + diodo en el lado del VE). A estado D si máx(V_{CP}) = +3V, mín(V_{CP}) = −12V (240 Ω + diodo en el lado del VE). A estado O si máx(V_{CP}) = +12V, mín(V_{CP}) = −12V (no se detecta resistencia en el lado del VE por desconexión).
A0	A estado B si máx(V_{CP}) = +9V, mín(V_{CP}) = −12V (2K7 Ω + diodo en el lado del VE). A estado C si máx(V_{CP}) = +6V, mín(V_{CP}) = −12V (880 Ω + diodo en el lado del VE). A estado D si máx(V_{CP}) = +3V, mín(V_{CP}) = −12V (240 Ω + diodo en el lado del VE). A estado O si $I_{MS} = 0$ (desconexión del cable del zócalo del PR). Nota: No se contempla pasar a X y los anclajes de cable pueden prohibir desconexión y paso a O.
B	A estado C si máx(V_{CP}) = +6V, mín(V_{CP}) = −12V (880 Ω + diodo en el lado del VE). A estado D si máx(V_{CP}) = +3V, mín(V_{CP}) = −12V (240 Ω + diodo en el lado del VE). A estado A0 si máx(V_{CP}) = +12V, mín(V_{CP}) = −12V (no se detecta resistencia en el lado del VE por desconexión).
C / D	A estado B si máx(V_{CP}) = +9V, mín(V_{CP}) = −12V (2K7 Ω + diodo en el lado del VE). A estado D si máx(V_{CP}) = +3V, mín(V_{CP}) = −12V (240 Ω + diodo en el lado del VE). A estado A0 si máx(V_{CP}) = +12V, mín(V_{CP}) = −12V (no se detecta resistencia en el lado del VE por desconexión).
X	A estado O si $I_{MS} = 0$ (desconexión del cable del zócalo del PR). A estado D si máx(V_{CP}) = +3V, mín(V_{CP}) = −12V (240 Ω + diodo en el lado del VE).

Se han diseñado numerosas pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de cada elemento en las distintas fases del proceso de carga. En particular, y con ayuda de un VE comercial, se ha analizado el funcionamiento del PR para sustituir, con posterioridad, el VE real por el emulador desarrollado, comprobándose el funcionamiento de las comunicaciones y las distintas opciones funcionales en la interacción entre PR y SG como, por ejemplo, la autorización remota y la planificación de carga de acuerdo con el estado de la red eléctrica en cada momento.

Las pruebas de comunicaciones desarrolladas abarcan desde la comprobación de conexión mediante comando ping para determinar el estado de un host remoto, hasta el análisis exhaustivo de los servicios, contemplándose los siguientes enlaces:

- Comunicaciones SI-CIR, que discurren por un enlace externo a la IR que puede ser cableado o inalámbrico. El proveedor de conexión a Internet debe proporcionar una puerta de enlace y DNS válidos para que la comunicación pueda establecerse. Además, se ha de comprobar que los programas de seguridad instalados, tanto en el equipo del SI como en el del CIR, no bloquean las comunicaciones gSOAP (librería de código abierto para interactuar con servicios web SOAP desde programas en C y C++). Para la realización de las pruebas cabe considerar una fase de conectividad básica que puede resolverse mediante el comando ping, y una fase de comprobación exhaustiva en la que se fuerza el envío de distintos tipos de mensaje. Se ha de tener en cuenta que existen comunicaciones iniciadas en el SI y otras iniciadas por el CIR, por lo que en cada caso se están utilizando servicios de la otra parte.
- Comunicaciones EU-CIR, similares a las anteriores con la diferencia de que el EU ha de estar situado en la red local de la IR para evitar intrusiones. Por tanto, corre a cargo de la gestión de la IR el proporcionar la conectividad básica. Ésta puede lograrse mediante concentradores de red cableados o inalámbricos que permitan la formación de la red local. Igual que en el caso anterior, las pruebas desarrolladas incluyen una fase de conectividad básica que puede resolverse mediante el comando ping y una fase de comprobación exhaustiva, en la que se fuerza el envío de diferentes tipos de mensaje. Se ha de tener en cuenta que existen comunicaciones iniciadas en el EU y otras iniciadas por el CIR, por lo que en cada caso se están utilizando servicios de la otra parte.
- Comunicaciones CIR-PR que, como en el caso anterior, discurren por la red local de la IR. Las pruebas desarrolladas involucran, sin embargo, tres fases. En la primera se comprueba la conectividad básica. En la segunda se prueban los mensajes que no requieren una máquina de estados. En la tercera fase se comprueba que los mensajes asociados a las máquinas de estados se envían y reciben correctamente. Esta tercera fase debe realizarse junto a las pruebas destinadas a verificar la funcionalidad de las propias máquinas de estado, que se describen en los siguientes párrafos. Se ha de tener en cuenta que existen comunicaciones iniciadas en el EU y otras iniciadas por el CIR, por lo que en cada caso se están utilizando servicios de la otra parte.

Las pruebas de funcionamiento de la máquina de estados implican:

- Actores o agentes intervinientes, que en este caso son: PR, CIR, VE, OIR, SI.
- Máquina de estado (ME) o abstracción que representa el comportamiento de un actor. En este caso se contempla una ME para cada maniobra y para cada actor.
- Maniobra. Conjunto de operaciones elementales que persiguen un objetivo definido. Se consideran maniobras, por ejemplo, la carga de un VE en un PR, la pausa de dicha recarga o el apagado de un PR.
- Mensaje. Elemento de comunicación entre actores.
- Protocolo. Reglas para la formación de conversaciones (secuencias de mensajes) entre actores.
- Estado (E). Nodo de la ME. Abstracción que representa la situación actual de la ME y que depende de la historia pasada. Durante la ejecución, la ME evoluciona pasando de un estado a otro, generando acciones en respuesta a estímulos. De este modo se puede simular un comportamiento de autómata finito.
- Transición (TR). Paso de un estado a otro. Se produce comprobando el estado actual y si se verifica cierta condición específica de ese estado y de esa transición. Las condiciones pueden ser funciones lógicas realizadas sobre el valor de variables (del tipo, por ejemplo, ¿x>0 & m<3?), o pueden necesitar la evaluación de otras funciones sobre variables (por ejemplo, ¿sen(x)>0.2?), o pueden implicar la recepción de mensajes o requerir un análisis sobre el contenido de los mismos.
- Estímulo. Valor medible que causa una toma de decisión por parte de un actor como, por ejemplo, la recepción de un mensaje, el contenido del mismo, el valor de variables de un programa, entre otros. Los estímulos son entradas de la ME en sentido sistémico, los cuales nacen de acciones que tienen lugar en el mundo exterior a la máquina y que le afectan de algún modo.
- Actuación. Acción o efecto sobre el mundo exterior producido por una ME como, por ejemplo, el envío de un mensaje o el cambio de valor de una variable visible exteriormente. Las actuaciones son salidas de la ME en sentido sistémico, y pueden estar ligadas a la llegada a un estado, a la salida de un estado y a la transición de un estado a otro; pero en muchos casos es suficiente con uno solo de estos tipos.

Fig. 5. Vehículo comercial empleado en las pruebas.

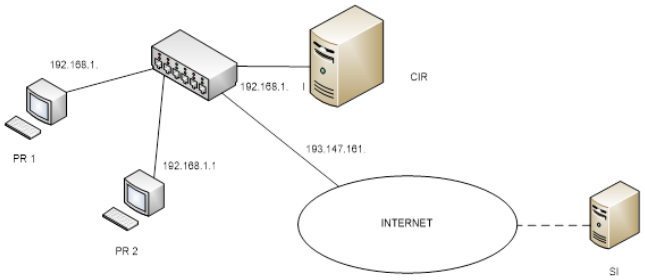


Fig. 6. Esquema de red del demostrador.

PRUEBAS REALIZADAS

Se ha montado una red local tipo A 192.168.1.0/8 en la cual se han conectado los dos PR y el CIR. Las direcciones IP de cada componente de la red local son mostradas en la anterior Fig. 6. Por otro lado, el CIR se ha conectado a Internet mediante una IP estática (193.147.161.xxx), estando accesible desde cualquier dispositivo conectado a Internet y habiendo sido configurado para que actúe como router ya que hub al que están conectados los dispositivos de la red local no permite realizar tareas de encaminamiento. Con esta configuración del CIR se consigue que los PRs tengan también conexión a internet con idea de que si en algún momento los PRs necesitan descargar cualquier información (software) de Internet sea posible realizarlo. Aunque el módulo SI se ha representado en la Fig. 6, el módulo no se encuentra instalado en el demostrador.

A. Acceso al demostrador

El demostrador es accesible mediante conexiones SSH instaladas desde un terminal en una máquina con Linux (Ubuntu/Debian) mediante el comando “sudo apt-get install ssh”. El procedimiento para acceder a los módulos del demostrador requiere un acceso al CIR mediante un comando ssh, seguido del acceso a los PRs (por ejemplo, el comando “ssh –p 2222” permite el acceso al PR1).

B. Punto de carga

El punto de carga tiene tres hilos de ejecución: el primero recibe mensajes OCPP por el puerto 8081, el segundo realiza transiciones en la máquina de estados, y el tercero se encarga de leer la entrada por el teclado. Se implementa con el objeto chargePoint, que está compuesto por una serie de variables, una máquina de estados (denominada stateMachine y descrita en la Fig. 7) y una cola de transiciones (que se utiliza para sincronizar operaciones entre los diferentes hilos de la aplicación).

La máquina “main” describe la operación global del sistema, en la que se hace una espera activa con polling hasta la solicitud de carga. En ese momento, entra en el bloque “charge” cuyo diagrama de flujo está descrito en la parte derecha de la Fig. 7. En ese diagrama, el bloque principal es el de “charging” en el cual permanece durante todo el proceso de carga. Es importante recalcar que en ese bloque se realizan, de forma continua, todas las comprobaciones de tensión, corriente y temperatura de las celdas de la batería. Cualquier anomalía produce el fin de la carga y un menaje de error.

El hilo del servidor agrega transiciones a la cola cuando recibe determinados mensajes, mientras otro hilo de ejecución se encarga de ir retirando y realizando transiciones de esa cola. Esto garantiza el orden de transición correcto, evitando nuevas transiciones cuando se está realizando una transición y permitiendo que los mensajes OCPP se sincronicen de forma correcta.

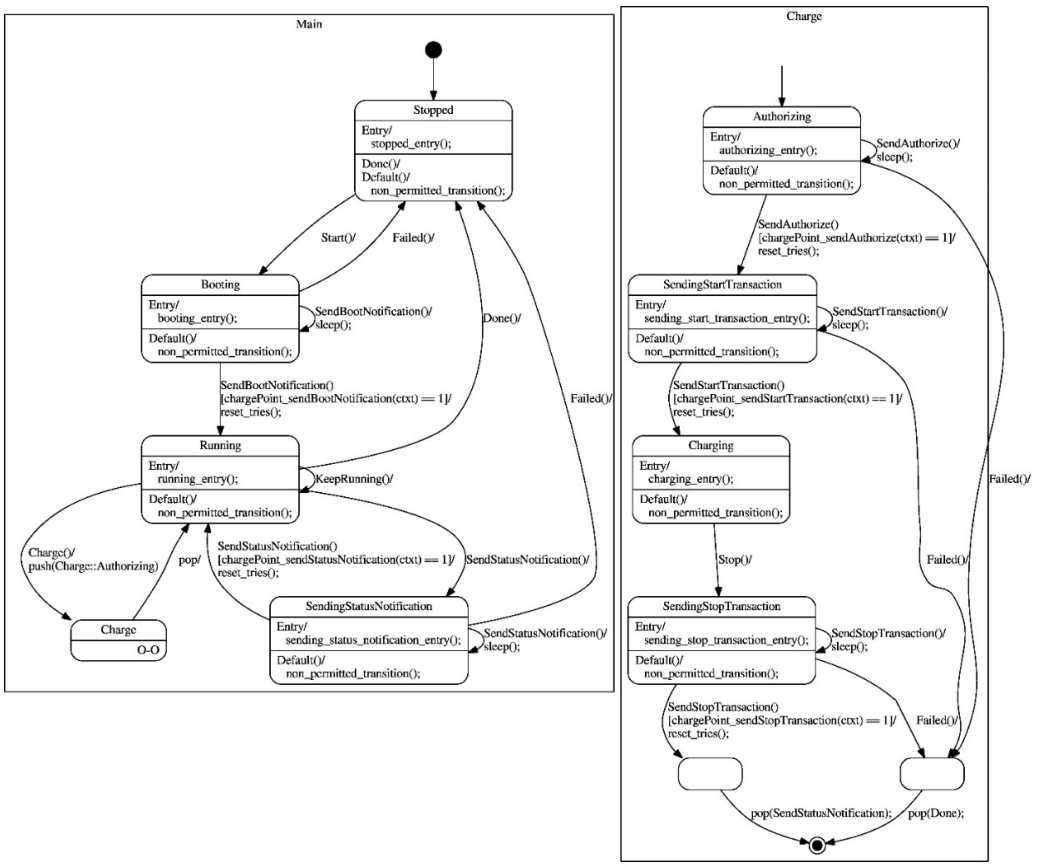


Fig. 7. Máquina de estados que forma parte del objeto chargePoint que implementa el punto de carga.

Las pruebas que se han realizado se basan en el encolamiento de maniobras de diversos tipos en las que se comprueba el correcto funcionamiento mediante la medición de variables físicas en el punto de recarga.

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un sistema completo para ilustrar el funcionamiento e interconexión de los componentes que intervienen en una infraestructura de recarga de VE. Se han usado componentes comerciales para proporcionar una visión de bajo nivel del poste de recarga, empleándose protocolos abiertos para permitir explorar en detalle la estructura de las comunicaciones entre los elementos del sistema. El sistema se complementa con un emulador de VE que permite la realización de pruebas de recarga ficticias, con el consiguiente abaratamiento de costes y facilidad de uso en un entorno educativo para prácticas de laboratorio. El diseño basado en máquinas de estado para configurar el comportamiento del PR y SG permite proporcionar una visión de los procesos adecuada al nivel de estudios.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte de los proyectos TED2021-129558B-C22 (financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación Agencia Estatal de Investigación de España MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y también por Unión Europea NextGenerationEU/PRTR) y PID2021-125189OB-I00 (financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE Ministerio de Ciencia e Innovación, Agencia Estatal de Investigación de España y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional).

REFERENCIAS

[1] Fayez Alanazi, “Electric vehicles: benefits, challenges, and potential solutions for widespread adaptation,” Applied Sciences, Vol. 13, Iss. 10, 2023.

[2] The European Automobile Manufacturers’ Association, ACEA, on-line report: https://www.acea.auto/video/eu-car-sales-on-the-up-in-2023-with-electric-models-increasingly-popular/#:~:text=EU%20car%20sales%20surged%20by,buyers%2C%20overtaking%20diesel%20in%202023.

[3] D. Martinez Chisbert, “Políticas públicas para el impulso de los vehículos eléctricos en España,” http://hdl.handle.net/10251/146762, 2020.

[4] Madhav Kumar, Kaibalya Prasad Panda, Ramasamy T. Naayagi, Ritula Thakur, Gayadhar Panda, “Comprehensive review of electric vehicle technology and its impacts: detailed investigation of charging infrastructure, power management, and control techniques,” Applied Sciences, Vol. 13, Iss. 15, 2023.

[5] Kumar Singh, “Powering the Future: The Evolution of DC Chargers in the Electric Vehicle Revolution,” https://www.linkedin.com/pulse/powering-future-evolution-dc-chargers-electric-vehicle-singh/, 2023.

[6] F. Colodro, J.L. Mora, F. Barrero, M.R. Arahal, J.M. Martinez-Heredia, “Analysis and simulation of a novel speed estimation method based on oversampling and noise shaping techniques,” Results in Engineering, Vol. 21, 2024.

[7] D. Soto-Marchena, F. Barrero, F. Colodro, M.R. Arahal, J.L. Mora, “On-Site Calibration of an Electric Drive: A Case Study Using a Multiphase System,” Sensors, Vol. 23, Iss. 17, 2023.

[8] M.R. Arahal, F. Barrero, M.G. Satué, M. Bermúdez, “Fast Finite-State Predictive Current Control of Electric Drives,” IEEE Access, Vol. 11, pp. 12821-12828, 2023.

[9] M.G. Satue, M.R. Arahal, D.R. Ramirez, F. Barrero, “Multi-phase predictive control using two virtual-voltage-vector Constellations,” Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Vol. 20, Iss. 4, 2023.

[10] M.R. Arahal, F. Barrero, M. Bermúdez, M.G. Satué, “Predictive Stator Current Control of a Five-phase Motor using a Hybrid Control Set,” IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 11, Iss. 2, pp. 1444-1453, 202

Trabajo en equipo dentro de un programa de robótica de competición universitario: retos y dificultades

Julio Pastor-Mendoza
Departamento de Electrónica
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares (Madrid), Spain
ORCID: 0000-0003-0032-4446

Ángel Javier Álvarez Miguel
Departamento de Ciencias de la Comunicación
Unversidad de Alcalá
Alcalá de Henares (Madrid), Spain
ORCID: 0000-0003-0260-3940

Pedro Gil-Jiménez
Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares (Madrid), Spain
ORCID: 0000-0002-6991-0702

Ana Jiménez Martín
Departamento de Electrónica
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares (Madrid), Spain
ORCID: 0000-0003-0713-0054

Noelia Hernández Parra
Departamento de Automática
Unversidad de Alcalá
Alcalá de Henares (Madrid), Spain
ORCID: 0000-0002-6644-9498

Ángel Llamazares Llamazares
Departamento de Electrónica
Unversidad de Alcalá
Alcalá de Henares (Spain)
ORCID: 0000-0001-8273-5163

***Abstract*—Este trabajo presenta la evolución de los equipos de un programa de robótica de competición a nivel universitario organizado como actividad extracurricular en la Escuela de ingeniería de la Universidad de Alcalá. Se analizan las dificultades vividas por los estudiantes y profesores participantes en el programa donde se ha podido comprobar que los factores humanos que aparecen en la relación entre los miembros de los equipos, entre los equipos y entre los equipos y los profesores, tienen casi más importancia en el éxito y en el fracaso de los equipos, que las competencias propiamente técnicas.**

Keywords—robótica educativa, competición de robótica, trabajo en equipo, aprendizaje colaborativo, aprendizaje basado en problemas, soft-skills

I. INTRODUCCION

En los últimos años, la robótica no ha dejado de ganar terreno en la realidad educativa y en la vida escolar como una herramienta que ayuda a expresar la creatividad y la innovación de los alumnos. [1] La robótica educativa promueve el aprendizaje activo y se ha reconocido como una herramienta de aprendizaje innovador que apoya a los estudiantes en muchos contextos de aprendizaje al ser interdisciplinar y, por tanto, se presupone que conduce al desarrollo de diversas habilidades técnicas y sociales. [2] Los equipos de robótica diseñan soluciones para una gran variedad de problemas, asumiendo la responsabilidad de identificar, investigar y aplicar soluciones de entre un gran número de posibles direcciones. Las actividades de aprendizaje basado en proyectos como éstas tienen el potencial de desarrollar no sólo las competencias técnicas, sino también las competencias profesionales que permiten a los alumnos aplicar eficazmente sus conocimientos técnicos en situaciones reales [3-4].

La robótica educativa favorece el desarrollo de habilidades como la resolución de problemas, la autoeficacia, el pensamiento computacional, el pensamiento creativo, el pensamiento crítico, la autorregulación y motivación, aprender a aprender, la toma de decisiones, la cooperación, el trabajo en equipo y la comunicación. Todas estas competencias se incluyen en los múltiples trabajos que abordan los perfiles de los profesionales del siglo XXI, que les ayudarán a superar tareas complejas [5] y, al mismo tiempo, a adaptarse a las cambiantes condiciones de trabajo [6]. Actualmente el nivel de competencias exigido en *hard-skills* por empleadores está disminuyendo, a medida que aumentan los requisitos de formación interna y desarrollo profesional continuo [7], por lo que es importante el desarrollo en estas habilidades transversales o *soft-skills* en la formación y la robótica parece ser una vía para ello [8]. Estas características hacen que la participación en equipos de robótica dentro de la formación universitaria sea un complemento muy valioso para los futuros egresados.

Múltiples trabajos en la literatura abordan el tema de la robótica educativa y competiciones de robótica con diferentes características y en todos se señala a estas competiciones como una motivación extra para los estudiantes que despiertan el interés de los estudiantes por la robótica y las materias STEM, al tiempo que desarrollan habilidades sociales y crean vínculos entre los participantes [9] [10]. Sin embargo, pocos trabajos abordan la complejidad del trabajo dentro del equipo de robótica. Hasta la fecha, relativamente pocos estudios han examinado explícitamente los enfoques pedagógicos de *coaching* eficaces y las estrategias de instrucción para apoyar el aprendizaje de los estudiantes y el desarrollo de habilidades en el desafío que supone una competición de robótica.

El trabajo recopilatorio de Graffin et al. [11] recoge el impacto de la FIRST® LEGO® League Challenge Robotics Competition a nivel global, destacando la influencia del *coaching* y recopilan diferentes estudios extraídos de experiencias. A pesar de que el estudio no es concluyente, sí apunta que es beneficioso cierta formación u orientación para evitar limitar involuntariamente las oportunidades de aprendizaje a los estudiantes más inexpertos del equipo que pueden influir negativamente en la comunicación y la construcción colaborativa de conocimientos del equipo. En este sentido Jadhav et al. [12] proponen un programa de formación online para pregraduados específico para luego participar en una competición nacional. Tras una encuesta a participantes de ediciones previas para evaluar sus necesidades, llega al mismo resultado, ya que los encuestados manifestaron interés en la posibilidad de tener un curso de formación previa, especialmente para principiantes, que aborde distintos temas, aunque los más demandados fueron técnicos como Python, procesamiento de imagen y similares. Sin embargo, los autores enfatizan la necesidad de incluir actividades para la resolución de problemas. Menekse et al. [13] evalúa el equipo desde el punto de vista de la colaboración entre ellos, ligándolo a los resultados en la

competición, concluyendo que los equipos más cohesionados y con mejores habilidades de trabajo en equipo obtuvieron mejores resultados y robots más competitivos.

Este trabajo se orienta en esta línea, aportando una contribución a la búsqueda de esas necesidades y características que requiere un equipo de éxito. Para ello se ha observado el trabajo de diversos equipos de robótica de la Universidad en diferentes ediciones de la competición de Eurobot Spain [14], recopilando las conclusiones. Estas evidencias se complementan con la opinión de los propios estudiantes a través de un cuestionario

II. Programa de Robótica de Competición

Las competiciones de robótica ofrecen oportunidades únicas para que los estudiantes trabajen conjuntamente para alcanzar un objetivo común en un plazo determinado [15]. Son proyectos multidisciplinares de gran complejidad, que requieren un alto nivel de colaboración que incluyen el desarrollo de habilidades académicas y el interés y la concienciación sobre la ciencia, la tecnología, la ingeniería y las matemáticas (STEM); un enfoque en la capacidad de trabajar eficazmente en equipo; y el desarrollo de la cooperación y el respeto hacia los otros equipos que participan en las competiciones.[16][17]

A. Objetivos

En este sentido, se ha diseñado un programa de robótica de competición para fomentar y apoyar a equipos formados en el seno de la Universidad cuyos objetivos son:

- Potenciar el aprendizaje poniendo en práctica de forma conjunta conocimientos técnicos que normalmente se imparten en asignaturas de forma independiente.
- Potenciar el desarrollo de competencias transversales como resiliencia, comunicación y trabajo en equipo.
- Crear un entorno que se asemeje a una experiencia "profesional" en un entorno de trabajo multidisciplinar.

B. Desarrollo

El programa cuenta con unas sesiones formativas, de 30h a final de curso que sirven como punto de inicio del siguiente curso académico y nueva edición de la competición, con un doble objetivo: mejorar la formación técnica de los estudiantes, y proporcionarles herramientas para gestionar la participación en el equipo de robótica como si de un proyecto de ingeniería se tratara. Se abordan todas las fases necesarias para el diseño y fabricación de un robot de forma introductoria:

1. Introducción al curso e introducción a las plataformas hardware de control más utilizadas.
2. Diseño mecánico
3. Sensorización
4. Técnicas de control
5. Elementos mecánicos
6. Fabricación
7. Técnicas de programación
8. Desarrollo software
9. Gestión de proyectos
10. Proyectos software
11. Competencias transversales

En septiembre se realiza la convocatoria para apuntarse al equipo y posteriormente, en función del número de estudiantes interesados, se forman los grupos. A los grupos formados se les presenta la competición de ese año, así como las actividades en las que se participará para promocionar el equipo y la competición, como la Semana de la Ciencia, Mobile Week, Aula, Feria de Madrid es Ciencia, Open Day de la universidad, etc. En estas reuniones iniciales se realizan actividades para que se conozcan entre ellos, se consensuan las normas de convivencia y trabajo, y se fijan hitos en el desarrollo del proyecto: anteproyecto en noviembre, seguimiento en diciembre, etc.

Los equipos cuentan con un profesor implicado en el seguimiento directo de los equipos que actúa como un facilitador, orientándoles a través de preguntas guiadas y abiertas, guiando en la búsqueda de fuentes de formación específicas, y aportando retroalimentación constructiva. El equipo de robótica no se forma en torno a un concurso o evento en particular, sino que evoluciona continuamente de forma autónoma mediante la búsqueda de nuevas oportunidades. El equipo dispone de un espacio como sede dentro de las instalaciones de la Escuela Politécnica de la Universidad.

En los párrafos siguientes, se presenta cronológicamente la evolución de la participación en el Programa de Robótica de Competición con el fin de poner en contexto el posterior análisis de dificultades.

En el curso 2018-19 participan 13 estudiantes. Todos los inscritos son noveles y hay mucha incertidumbre hasta tomar una dirección, aun así constituyen un buen equipo que encuentra las sinergias entre ellos desarrollando un robot ganador en la edición 2019 de EUROBOT Spain, clasificándose así para ir a la final europea en Francia en representación de España. A partir de ese primer trabajo, construyen un nuevo robot para la final europea en tan solo dos semanas.

En el curso 2019-20 hay un efecto llamada tras los buenos resultados del año anterior y crece el equipo ya que se mantienen la mayoría de los miembros del curso previo a los que se les unen nuevos estudiantes llegando a ser más de 30 estudiantes. Lamentablemente el confinamiento debido a la pandemia del COVID-19 tiene un efecto devastador sobre el grupo deteniendo toda la actividad y suspendiendo la competición.

En el curso 2020-21, debido a las restricciones sanitarias el equipo inicia el trabajo en un local, más espacioso y con mejor ventilación que la sede oficial, aunque alejado del edificio politécnico. El equipo sigue siendo muy numeroso, con participantes veteranos y noveles. Tras un año en blanco por la pandemia los resultados no son los esperados y deciden no ir a la final francesa a pesar de ser invitados (no hay final internacional pero sí competiciones nacionales). El trabajo del día a día es complicando por las medidas sanitarias y el elevado número de integrantes, los cuales tienen diferente nivel de conocimiento, experiencia en robótica y grado de implicación en el proyecto. Además, no terminan de complementarse bien y muestran diferencias de opiniones en las decisiones que se van tomando, lo que genera tensiones en el grupo que acaban siendo irreconciliables dividiéndose el grupo en dos para el año siguiente.

En el curso 2021-22 se mantienen en el programa la mayoría de los estudiantes de la edición anterior con algunas

nuevas incorporaciones, por lo que se mantienen dos equipos: uno formado por los más veteranos de la edición del 2019, y otro constituido por los más noveles de esta edición y la anterior. Esto genera mucha competitividad entre los grupos que no mantienen buena relación. Bajo estas circunstancias la convivencia en la sede común se hace complicada y el reparto de recursos es una fuente de discusión constante. Ambos presentan proyectos competitivos y se clasifican para la final europea, pero el equipo más novel abandona el programa participando al año siguiente de forma independiente.

El equipo más veterano continúa en el programa el curso 2022-23, a los que se incorporan nuevos estudiantes que forman otro equipo de noveles. El equipo veterano tiene que abandonar durante la competición por averías, lo que le hizo cuestionarse si seguir en el programa. Sin embargo, el equipo novel, a pesar de haber mostrado limitaciones a lo largo de la edición por falta de experiencia, participa satisfactoriamente. El equipo que abandonó el programa en la edición previa se presenta por libre alzándose con la victoria. En esta edición no se observa rivalidad entre los equipos, como en la edición previa, creándose un ambiente de trabajo más sano. También se observa que los equipos con niveles similares de competencia entre sus miembros tienen un mejor rendimiento.

En la edición 2023-24 el equipo de noveles del año anterior abandona el programa y sólo uno de los miembros repite con otros compañeros con un equipo independiente. El equipo de veteranos continúa un último año, aunque viéndose reducido a solo dos integrantes, ya que el resto estaban plenamente incorporados al mercado laboral. También se crea dentro del programa un nuevo equipo formado por estudiantes de primeros cursos que van abandonando según va avanzando el curso académico hasta quedarse al final con sólo dos miembros que aún así participaron en la competición. Durante el curso académico la sede del equipo retorna al edificio politécnico.

III. Análisis de dificultades

Durante los seis años de vida del programa de robótica de competición, hubo momentos muy buenos, pero también aparecieron muchas dificultades. Algunas fueron técnicas, pero la mayoría fueron debidas a falta de comunicación, problemas personales, malentendidos, que merecen ser identificados para reducir la probabilidad de que vuelvan a suceder.

A. Metodología

Para identificar las diferentes situaciones por las que han pasado los equipos, se propuso un enfoque de investigación cualitativa pasando a los estudiantes a la finalización de cada año unos cuestionarios con cuestiones abiertas preguntando qué es lo que creían que había salido bien, lo que creían que sería bueno mejorar de su trabajo, lo que creían que desde los profesores del programa se había hecho bien y lo que se podía mejorar.

Al finalizar el curso 2021/2022, año donde se produjeron el mayor número de conflictos, se preguntó por las situaciones conflictivas y cómo se podrían haber solucionado (Tabla I). Las respuestas de estos cuestionarios también han dado pie a conversaciones informales donde se ha profundizado en los problemas.

TABLE I. Preguntas abiertas del cuestionario

A. Conflictos generados en relación al trabajo en equipo	
	Conflictos generados indicando si se han solucionado o no y cómo se han resuelto Propuestas de mejora o de solución para otras situaciones similares
B. Conflictos generados en relación a las relaciones personales con los compañeros	
	Conflictos generados indicando si se han solucionado o no y cómo se han resuelto Propuestas de mejora o de solución para otras situaciones similares
C. Conflictos generados en relación con la asignación de recursos	
	Conflictos generados indicando si se han solucionado o no y cómo se han resuelto Propuestas de mejora o de solución para otras situaciones similares
D. Conflictos generados en relación con el grado de compromiso en el equipo: tareas, reuniones, etc.	
	Conflictos generados indicando si se han solucionado o no y cómo se han resuelto Propuestas de mejora o de solución para otras situaciones similares
E. Conflictos generados en relación con la compatibilización con estudios o trabajo: presión, stress, exámenes, etc.	
	Conflictos generados indicando si se han solucionado o no y cómo se han resuelto Propuestas de mejora o de solución para otras situaciones similares
F. Conflictos generados en las relaciones con profesores de la universidad	
	Conflictos generados indicando si se han solucionado o no y cómo se han resuelto Propuestas de mejora o de solución para otras situaciones similares
G. Conflictos generados en relación a la competitividad con el otro equipo	
	Conflictos generados indicando si se han solucionado o no y cómo se han resuelto Propuestas de mejora o de solución para otras situaciones similares
¿Qué tres aspectos positivos enumerarías de tu experiencia participando en el equipo este año?	
¿Qué tres aspectos negativos enumerarías de tu experiencia participando en el equipo este año?	
¿Qué charlas o cursos crees que sería interesante que se dieran durante el curso como formación técnica o no técnica (relacionado con competencias transversales)?	
¿Qué opinas sobre el tamaño máximo que deberían tener los equipos para que funcionen bien? ¿cuál crees que debería ser su tamaño máximo / ideal?	
¿Qué opinas sobre cómo deberían integrarse estudiantes nuevos en el equipo/equipos?	
¿Qué condiciones pondrías para que una persona estuviera en un equipo de tal manera que si no las cumple no pudiera estar?	
¿En relación con la participación de los profesores en el proyecto ¿Cómo crees que sería la participación ideal? ¿Qué has echado de menos? ¿Qué te ha sobrado?	

B. Identificación de dificultades y fuentes de conflicto por parte de los participantes.

Como resultado de los cuestionarios y conversaciones personales, se han identificado las siguientes fuentes de conflicto identificadas por los participantes. Algunas de ellas se fueron resolviendo en ediciones posteriores y otras siguen siendo retos para el futuro.

En relación con el trabajo en equipo:

- Diferencias de opiniones sobre la forma de abordar un problema técnico.
- Desigual rendimiento o dedicación de los miembros del equipo.
- Papel de un líder que oriente al equipo y reparta el trabajo en equipos autoorganizados.
- Convivencia con miembros de fuerte carácter.
- Falta de conocimiento de las obligaciones asociadas al Equipo.
- Dificultad para compatibilizar horarios para reuniones de seguimiento.
- Roturas o retrasos derivados de negligencias.
- Número de miembros muy elevado o demasiado bajo.
- Diferencia de nivel de conocimientos entre los miembros del equipo.
- Falta de resiliencia que se propaga entre los miembros del equipo.

En relación con las relaciones personales entre compañeros:

- Conflictos entre compañeros en situación de estrés.
- Dificultad para comunicar a amigos la necesidad de mayor compromiso.
- Diferentes subgrupos de amigos dentro de un equipo con inquietudes diferentes.

En relación con los recursos

- Limitación de recursos.
- Entorno de trabajo poco adaptado para ello.
- Uso de herramientas compartidas.

En relación con el grado de compromiso del equipo y asignación de tareas:

- Dificultad en la identificación de tareas y asignación entre los miembros.
- Dificultad para afrontar conflictos.
- Dificultad en la asignación de carga de trabajo de las tareas.
- Exceso de trabajo en momentos puntuales.
- Falta de transparencia de la disponibilidad de los distintos miembros.
- Dificultad para compaginar las tareas del equipo con los estudios en determinados periodos.

En relación con las relaciones con el facilitador/ *coach*:

- Demandan mayor seguimiento y apoyo por parte de los profesores a lo largo del proyecto.
- Demandan mayor intervención del *coach* ante situaciones de conflicto.

En relación con la competitividad entre equipos:

- Celos entre equipos.
- Ocultación de información.
- Faltas en normas de convivencia para molestar al resto.

C. Identificación de dificultades y fuentes de conflicto desde la perspectiva del profesorado del programa.

El profesorado involucrado con los equipos del programa de robótica también fue entrevistado e identificó diversas fuentes de conflicto en el desarrollo del trabajo en equipo, coincidiendo en muchos casos con las expuestas por los alumnos. A continuación se enumeran las que se han identificado.

En primer lugar, cabe destacar las diferentes motivaciones que los llevan a formar parte del programa de robótica de competición y formar equipos. Las principales razones son pasar momentos agradables construyendo robots, en muchos casos con grupos de amigos ya estructurados, por deseo de éxito en la competición o por interés de aprender cosas nuevas y poner el conocimiento en práctica. En esta línea también es importante comentar que es fundamental que todos los miembros de un equipo tengan objetivos comunes y que estos sean conocidos y compartidos por los profesores. Dentro de un mismo grupo hay miembros para los que lo más importante es conseguir la máxima puntuación posible en la competición, mientras que para otros lo más importante es pasar un rato agradable con los amigos haciendo robots, lo que deriva en situaciones conflictivas en la toma de decisiones y especialmente en momentos de trabajo bajo presión.

Las relaciones de amistad entre estudiantes que se apuntan en grupo para participar en un equipo tienen ventajas evidentes como es la confianza, el conocimiento mutuo, la cohesión del grupo, o la comunicación fluida entre ellos. Sin embargo, también puede dar lugar a otros problemas como que todos tienen un perfil técnico y nivel de conocimiento similar, cuando la característica fundamental de la robótica es la multidisciplinariedad, o que el exceso de confianza les hace ser excesivamente tolerantes ante faltas de cumplimiento de normas o compromiso. Por otro lado, se ha demostrado que las relaciones laborales entre amigos requieren mucho esfuerzo personal para no deteriorar las relaciones cuando se producen conflictos por diferencia de criterios al enfrentarse a un problema o diferencia de nivel de compromiso [18]. Sin embargo, también pueden dificultar las relaciones cuando el equipo está formado por varios subgrupos de amigos o con personas ajenas al grupo.

La mayor parte de los estudiantes que participan en los equipos están realizando estudios de ingeniería (grado o máster) o ya han finalizado y están trabajando. Esto implica que el tiempo de que disponen para realizar el proyecto es bastante limitado, especialmente en determinados periodos, y esto exige un buen aprovechamiento del mismo, lo que puede no ser fácil en los primeros años de participación.

La casuística personal es muy variada por lo que el tiempo de dedicación al proyecto también lo es. Es fundamental que cada miembro del equipo sea consciente del tiempo de que dispone y en qué periodos, y que esa información sea conocida por el resto de los miembros del equipo para entre todos plantear objetivos que sean realizables y tomar decisiones cuando estos objetivos estén en riesgo.

En un programa universitario como el que se presenta en el artículo, la dedicación es voluntaria, y no existen estímulos extrínsecos que contribuyan a la fidelización, por lo que el compromiso y la dedicación es muy variable entre sus integrantes.

El miedo al fracaso y la responsabilidad de no cumplir con las expectativas que se han autoimpuesto y que se tienen desde fuera puede limitar al equipo. En muchos casos este miedo al fracaso reduce el rendimiento del equipo y limita las expectativas. Es importante transmitir a los equipos que el proyecto es un proyecto educativo donde el principal objetivo es que pongan en práctica lo que están estudiando, y desarrollen competencias profesionales que les harán ser mejores ingenieros sin poner todo el peso en la importancia de los resultados.

Se han detectado otros factores que también pueden ser limitantes o fuentes de conflictos como la falta de experiencia trabajando en proyectos, limitaciones formativas, y el propio desconocimiento de su capacidad de rendimiento. Todo esto les penaliza al establecer objetivos realistas a nivel personal y de equipo, dando lugar a conflictos y desmotivación al no conseguir los objetivos planteados inicialmente.

La competitividad entre equipos es un factor muy importante a tener en cuenta, que hay que comprender y respetar manteniendo la independencia de los equipos, especialmente en las fases iniciales donde ponen sobre la mesa diferentes ideas que pueden dar importantes ventajas competitivas a un equipo. También es necesario establecer normas claras de convivencia y de uso de espacios y materiales comunes aceptadas por todos. Lo que mejor ha funcionado hasta la fecha es dejarles equivocarse y ayudarles a organizarse en ediciones posteriores.

En el programa de robótica universitario hay una elevada rotación de miembros con diversos perfiles, conocimientos y experiencia previa lo que supone cada año nuevos equipos y con ello nuevos conflictos y dificultades. Esta temporalidad es algo que hay que gestionar y no siempre es fácil ya que el ideal sería la formación de grupos en los que haya miembros experimentados junto con miembros noveles que aprendan de los primeros, pero esto no ha dados buenos resultados porque los miembros experimentados normalmente quieren dedicar su escaso tiempo disponible a hacer el robot y no a enseñar a otros, y los miembros noveles quieren poner en práctica sus ideas y no las de otros.

El reconocimiento de la dedicación de los profesores al proyecto es también un factor importante a tener en cuenta. Actualmente este proyecto está reconocido como proyecto de innovación docente de impacto institucional. Sin embargo, no lleva asociado ningún otro reconocimiento para el personal docente, lo que podría poner en peligro la sostenibilidad del proyecto como tal.

IV. Propuesta de futuro

Del análisis anterior se puede extraer como conclusión que la realización de robots para participar en competiciones de robótica es algo complejo y requiere dedicación, pero también es motivante y hace que los participantes repitan año tras año. Es evidente que para ellos es una experiencia enriquecedora que les sirve para su futuro profesional, como se ha podido comprobar en la evolución que han tenido los participantes a lo largo de los años.

Para que el programa se mantenga en el tiempo y mejore la experiencia para todos sus participantes (estudiantes y profesores), es necesario seguir esforzándose en avanzar con los procedimientos, el análisis de los problemas y las dificultades y potenciar aquello que ha funcionado bien.

Con la experiencia se ha podido comprobar que la formación inicial intensiva impartida no cubre las necesidades del equipo por lo que para futuras ediciones se plateará una formación más práctica y extendida en el tiempo.

Se ha podido comprobar a lo largo de los años que las necesidades de seguimiento y apoyo de los equipos por parte de los profesores varía mucho de unos equipos a otros, dependiendo de los conocimientos, de la experiencia y de la personalidad de los miembros. Por lo que se trabajará en definir diferentes metodologías de apoyo o *coaching* adaptadas a las diferentes tipologías de equipos.

Como propuesta para poner solución a muchos de los problemas planteados se propone un recorrido de al menos dos años para participar en la competición con posibilidades de tener un buen resultado. En el primer año se propone organizar una formación a lo largo del primer cuatrimestre utilizando el Kit Alcabot Starting [19] que permita aprender y poner en práctica los fundamentos de la robótica móvil, incluyendo posicionamiento por odometría, control PID, etc. En este curso, además del trabajo técnico, se fomentará el trabajo en equipo y se realizarán actividades orientadas a que los participantes se conozcan entre ellos y se familiaricen con técnicas de gestión de proyectos. En el segundo cuatrimestre se les animará a participar en la competición aunque sea con un robot sencillo y sin grandes aspiraciones, pero se habrán formado y ya tendrán conciencia de lo que implica el trabajo en equipo en un proyecto, para poder desarrollar todo su potencial en la siguiente edición.

Por otro lado, se trabajará la figura del profesor, que actuará como facilitador con especial dedicación a los grupos más noveles.

Tras la experiencia de participación, los estudiantes podrían trabajar durante el verano en mejoras genéricas de los robots ya que es cuando realmente tienen tiempo para trabajar sin responsabilidades académicas. Entre los estudiantes que quieran continuar se formarán equipos desde el inicio del siguiente curso académico, trabajando con una metodología de gestión de proyectos y normas básicas de convivencia y compromiso consensuadas. Además, se ligará la financiación a la consecución de hitos.

V. Agradecimientos

Se agradece el apoyo recibido en estos años por la Universidad y a la Dirección de la Escuela Politécnica Superior y en particular al Vicerrector de Innovación Docente y Transformación Digital Dr. D. Juan Ramón Velasco, que creyó en el proyecto y puso los medios para que pudiera hacerse realidad. También es importante agradecer la participación de estudiantes y profesores buscando continuamente vías de mejora.

REFERENCES

[1] N.A. Uslu, G.O. Yavuz , Y.K. Usluel “A systematic review study on educational robotics and robots, Interactive Learning” Environments, vol.31:9, pp.5874-5898, 2023

[2] M. Menekse, C. Schunn, R. Higashi and E. Baehr, "An investigation of the relationship between K-8 robotics teams' collaborative behaviors and their performance in a robotics tournament," *2015 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, El Paso, TX, USA, 2015, pp. 1-5.

[3] C.F. Joventino, RdA.A. Silva, J.H.M. Pereira, et al. “A Sim-to-real Practical Approach to Teach Robotics into K-12: A Case Study of Simulators, Educational and DIY Robotics in Competition-based Learning”. J Intell Robot Syst vol.107, pp.14. 2023

[4] C. Jiang, Y. Pang. “Enhancing design thinking in engineering students with project-based learning”. Comput. Appl. Eng. Educ. vol. 31, pp. 814–830. 2023

[5] E. Van Laar, A.J.A.M. Van Deursen, J.A. Van Dijk, J, De Haan. “The relation between 21stcentury skills and digital skills: A systematic literature review”. *Computers in Human Behavior, vol.72*, pp.577–588. 2017

[6] A.P. Carnevale, N.M. Smith. “Workplace basics: The skills employees need and employers want”. *Human Resource Development International, vol.16*(5), pp. 491–501. 2013

[7] O. Doherty, S. Stephens “Hard and soft skill needs: higher education and the Fintech sector”, Journal of Education and Work, vol.36:3, pp.186-201. 2023

[8] Coşkun, T.K., Filiz, O. The impact of twenty-first century skills on university students’ robotic achievements. Educ Inf Technol 28, 16255–16283. 2023

[9] S. Evripidou, K. Georgiou, L. Doitsidis, A. Amanatiadis, Z. Zinonos, S.A. Chatzichristofis. ”Educational robotics: Platforms, competitions and expected learning outcomes”. IEEE Access, vol.8, pp.219534–219562. 2020

[10] D. Chatzis, E. Kavallieratou. “Design and Implementation of a Robotic Competition”. 12th Hellenic Conference on Artificial Intelligence (SETN 2022), September 07–09, 2022, Corfu, Greece. 5 pages. ACM, New York, NY, USA,

[11] M. Graffin, R. Sheffield, R. Koul. “More than Robots’: Reviewing the Impact of the FIRST® LEGO® League Challenge Robotics Competition on School Students’ STEM Attitudes, Learning, and Twenty-First Century Skill Development”. *Journal for STEM Educ Re vol.***5**, pp.322–343. 2022.

[12] S. Jadhav, S. Iyera, and K. Arya. “Data driven online training program for education robotics competition”. Proce. 2023, 16th Int. Conf. on Educat. Data Mining, pp. 548–551, Bengaluru, India..

[13] M. Menekse, R. Higashi, C.D. Schunn, E. Baehr. “The Role of Robotics Teams’ Collaboration Quality on Team Performance in a Robotics Tournament”. J. Eng. Educ., vol.106, pp.564-584. 2017.

[14] Competición de robótica Eurobot Spain. https://www.eurobot..es

[15] N.A. Bascou, M. Menekse. ”Robotics in K-12 formal and informal learning environments: A review of literature”. *Proceedings of 2016 American Society for Engineering Education Annual Conference, New Orleans, Louisiana.*

[16] J. Pastor et al., "Acquisition of transversal skills in university studies through participation in robotics competitions," *2020 XIV Technologies Applied to Electronics Teaching Conference (TAEE), Porto, Portugal, 2020, pp. 1-8,*

[17] J. Pastor, I. Gonzalez and F. J. Rodriguez, "Participating in an international robot contest as a way to develop professional skills in engineering students," *2008 38th Annual Frontiers in Education Conference, Saratoga Springs, NY, USA, 2008, pp. S3F-9-S3F-14,*

[18] Hood, A. C., Cruz, K. S., & Bachrach, D. G. (2017). Conflicts with friends: A multiplex view of friendship and conflict and its association with performance in teams. *Journal of Business and Psychology*, *32*, 73-86.

[19] J. Pastor et al., *“Introductory kits to robotics through robot competitions”*. 2024 XVI Technologies Applied to Electronics Teaching Conference (TAEE), Málaga, Spain, 2024

El impacto del *engagement* del profesor, una herramienta para una docencia autoadaptativa

Xavier Solé-Beteta
Smart Society – Cloud and Edge Computing
La Salle Campus Barcelona
(Universitat Ramon Llull)
Barcelona, Spain
xavier.sole@salle.url.edu

Oihane Gómez-Carmona
Deustotech
University of Deusto
Bilbao, Spain
oihane.gomezc@deusto.es

Diego Casado-Mansilla
Faculty of Engineering
University of Deusto
Bilbao, Spain
dcasado@deusto.es

Diego López-de-Ipiña
Faculty of Engineering
University of Deusto
Bilbao, Spain
dipina@deusto.es

Joan Navarro
Smart Society – Cloud and Edge Computing
La Salle Campus Barcelona
Barcelona, Spain
jnavarro@salleurl.edu

***Abstract*—El *engagement* del alumno es crucial para su proceso de aprendizaje. Habitualmente, se ha estudiado la relación del *engagement* con el rendimiento académico, enfocándose en aspectos cognitivos, emocionales y conductuales, relegando al profesor y su desempeño a un rol secundario. Este estudio hipotetiza que el *engagement* del docente también influye en el *engagement* de sus alumnos. Utilizando tecnologías basadas en cloud y *edge computing*, se propone la demo de una herramienta que alerte al docente sobre su propio nivel de *engagement* percibido de forma objetiva y automática. Las pruebas preliminares muestran el potencial de esta herramienta a la hora de capturar la evolución del nivel de *engagement* del profesor en distintas circunstancias.**

Keywords—engagement académico, cloud computing, edge computing, herramienta de soporte a la docencia

I. Introducción

Una de las habilidades más importantes que requiere un docente para impartir una sesión formativa es la capacidad de monitorizar el nivel de *engagement* de sus alumnos [1]. Esta habilidad le puede permitir adaptar el discurso, las actividades, o incluso (el orden de) los propios contenidos para mejorar la eficacia del proceso de aprendizaje [2, 3]. Pero, ¿qué es exactamente el *engagement*?

El *engagement* de los alumnos en el aula es un parámetro multifacético en el que intervienen al menos tres dimensiones [4]: la conductual (asociada a la participación), la cognitiva (asociada al desempeño mental) y la emocional (asociada a las reacciones positivas o negativas ante distintos estímulos) Dado el amplio abanico de parámetros que cubre, el *engagement* puede considerarse un buen indicador de la calidad del proceso de aprendizaje de los alumnos y de su desarrollo personal en el aula [5, 6, 7]. Esto ha motivado la investigación acerca de qué métodos y qué parámetros objetivamente medibles pueden y deben tenerse en cuenta a la hora de cuantificar el nivel de *engagement* de los alumnos [8]. Típicamente, estos trabajos giran alrededor de la observación del alumno y su desempeño natural en el aula [5]: cuántas veces levanta la mano, cuántas veces interactúa con compañeros, qué posición tiene en la silla, qué tiene encima de la mesa, hace bostezos, cuantas interacciones tiene con dispositivos ajenos al contexto docente (e.g., el teléfono móvil), cuantos trabajos ha entregado, qué calificaciones ha obtenido, etc. Tradicionalmente, esta cuantificación del nivel de *engagement* de los alumnos suele hacerse subconscientemente de una forma más o menos informal, y que además depende de la experiencia y capacidades del docente [1].

Así, el *engagement* puede verse como uno de los (múltiples) enlaces de conexión entre docente y alumnos en el proceso de aprendizaje [9]. Paradójicamente, la mayor parte de estudios que se han llevado a cabo hasta la fecha contemplan este enlace en una única dirección: desde los alumnos hacia al docente. Sin embargo, parece que el *engagement* del docente en el aula también puede tener un impacto significativo en el proceso de aprendizaje de los alumnos [10]. En este caso, es evidente que las dimensiones antes mencionadas (conductual, cognitiva y emocional) no pueden ser aplicadas directamente y en su totalidad para cuantificar el *engagement* del docente mientras está impartiendo una sesión en el aula [11].

El propósito de este trabajo es explorar la posibilidad de utilizar una herramienta software que permita cuantificar automáticamente el *engagement* del docente en tiempo real. Concretamente, se propone usar el sistema descrito en [8], el cual está diseñado para cuantificar el nivel de *engagement* de los alumnos en un entorno virtual síncrono utilizando los principios del *cloud* y el *edge computing*. En esta ocasión se propone usar este mismo software para monitorizar al docente (en vez de a los alumnos) dotándolo así de una herramienta que le dará información objetiva y actualizada acerca del nivel de *engagement* que pueden estar percibiendo los alumnos. Esta investigación pretende (1) contribuir a la abstracción y modelado del *engagement* del docente partiendo de las dimensiones que articulan el *engagement* de los alumnos [11] y (2) presentar una herramienta de soporte a la docencia que dé al profesor un nuevo canal de realimentación y le permita mejorar la calidad de su docencia.

El resto del artículo está organizado como sigue. En la Sección II se revisan los trabajos relacionados con esta investigación. En la Sección III se describe brevemente el funcionamiento del software utilizado y se discuten los parámetros que deben modificarse para que se pueda cuantificar el *engagement* del docente. En la Sección IV se describen los dos experimentos demostrativos llevados a cabo. Finalmente, en la Sección V se discuten los hallazgos más importantes de este trabajo y se proponen algunas líneas futuras de investigación.

II. Trabajos Relacionados

La comunidad científica ha dedicado muchos esfuerzos para indagar sobre el impacto de la práctica docente del profesor en el *engagement* de los estudiantes. Son varios los estudios publicados que han permitido dar respuestas a la hipótesis de la importancia del rol que desempeña el profesor, evidenciándose, entre otros, su papel clave para influenciar en la calidad de la experiencia de los estudiantes.

En esta línea, encontramos trabajos de investigación que subrayan la importancia de la relación entre estudiantes y personal docente, así como el potencial que presenta este último para influir en la calidad de la experiencia del proceso enseñanza-aprendizaje. En [13] se examina la teoría del Intercambio Líder-Miembro (LMX) en el contexto de la relación entre estudiantes y docentes en la educación superior. Entendiéndose en este caso el LMX como la relación que tiene lugar entre estudiantes y personal docente (profesores y tutores) mediante interacciones y actividades (las cuales suceden en las clases, tutoriales y fórums en línea). El estudio se vale de encuestas e información relativa al rendimiento académico de los estudiantes para hallar que LMX es un predictor significante del *engagement* de los estudiantes, la satisfacción en relación con las asignaturas, así como de la intención de abandonar los estudios prematuramente. En dicho estudio se enfatiza claramente la importancia del papel del profesor en mejorar los resultados de los alumnos, destacándose también la referencia a 2 líneas de investigación principales de la comunidad científica centradas en el estudio del abandono prematuro: la insuficiencia de preparación de los alumnos que desencadena bajos niveles de *engagement* y los mecanismos institucionales orientados a mejorar el *engagement* y retención de alumnos. También centrado en el trato entre estudiantes y docentes, [15] indaga en sus interacciones, el *engagement* emocional y el rendimiento académico. Para tal propósito, se idea una configuración de dos escenarios con características distintas, propiciando altos y bajos niveles de interacción entre estudiantes y profesores. A partir de una asignación aleatoria de los alumnos en dichos escenarios, se obtienen evidencias a partir de un conjunto de encuestas centradas en las interacciones con el profesor, el sentimiento de emociones durante las sesiones, las percepciones de aprendizaje y el análisis de datos referentes al rendimiento académico. El análisis de los resultados evidencia que los alumnos que presentan interacciones de calidad con el profesor muestran mayores niveles de *engagement* emocional en comparación con aquellos que denotan interacciones pobres. Además, se observan relaciones entre la interacción profesor-alumno y el aprendizaje de los estudiantes, lo que permite poner de relieve la importancia del engagement emocional para mejorar el aprendizaje de los *estudiantes*.

A susodichos hallazgos, alcanzados mediante el estudio y el análisis de la relación entre los actores principales (alumnos y docentes) partícipes en el proceso enseñanza-aprendizaje, se suman contribuciones especializadas en las percepciones del profesor, en su capacidad para modular su comportamiento y a su vez, dejando evidencia de la referenciada influencia que puede generar en el alumno. En esta línea, en [14] se analiza la percepción que tiene el profesorado acerca del *engagement* de los estudiantes en grupos de gran tamaño, y el desempeño de su rol en mantenerlo mediante la motivación de determinadas técnicas de enseñanza. Para conducir dicho análisis los profesores son observados durante la impartición de clases y posteriormente entrevistados. Durante las entrevistas se adopta los entrevistadores adoptan posturas orientadas a tratar características de la práctica docente, como lo son las estrategias pedagógicas y las experiencias docentes de los entrevistados. De entre los resultados alcanzados, se destaca que adoptar un posicionamiento profesional comprometido por parte de los profesores, enfatizar la importancia y aplicabilidad de la materia, tratar experiencias de cercanas a los alumnos y el silencio intencional son estrategias que mejoran el *engagement* de los estudiantes. En conclusión, según [14] la práctica docente en grandes grupos precisa que los profesores utilicen estrategias determinadas para conectar con los estudiantes y mantener su *engagement*. En [16], un trabajo centrado en las percepciones del engagement por parte del profesor y alumnos, se identifican *practicas* docentes como la retroacción para mejorar el aprendizaje, retar a los estudiantes a pensar y promover la creación de escenarios para la aplicación de contenidos que son objeto de estudios. Estrategias orientadas a potenciar la responsabilidad de enseñar más allá de los principios para abarcar el cuestionamiento, la participación y el compromiso. En dicho estudio se señala que las opiniones de los profesores sobre el *engagement* tienden a centrarse en el comportamiento de los estudiantes más que en los propios suyos. La conclusión es que los profesores deben reconocer el *engagement* como una responsabilidad compartida, de modo que la responsabilidad no recaiga únicamente en los estudiantes.

Los mencionados anteriormente son algunos trabajos representativos del campo de investigación, centrados en estudiar la influencia del profesor en el proceso de aprendizaje y/o en el *engagement* de los alumnos. Además, la comunidad científica, de entre otros, ha contribuido también en descubrir qué hace que un profesor sea considerado excelente [17]. Desde el punto de vista de los estudiantes, se ha evidenciado que un buen profesor universitario se caracteriza por una combinación de conocimientos en la materia, la voluntad de ayudar y la aplicación de métodos de enseñanza inspiradores [17]. Dichas características deseables parecen determinarse en relación con el nivel de *engagement* del profesor, y al mismo tiempo presentan potencial para influir en el *engagement* de los alumnos. También se observan contribuciones orientadas a descifrar cómo mejorar la implicación del profesor en el trabajo que desarrolla [18], destacándose en este caso el ambiente de trabajo y el propio desarrollo como elementos claves, igualmente en [19], se observa que de entre los factores que afectan el *engagement* del profesor, destacan el impacto de una gestión eficaz y la cultura de trabajo.

Los resultados alcanzados por la comunidad científica tienen importantes implicaciones para la práctica académica, aun así, se identifican oportunidades de contribución dirigidas a estudiar el *engagement* del profesor, en su cuantificación, así como de las afectaciones que puede originar en el *engagement* y/o satisfacción de la práctica docente por parte de los alumnos.

III. Marco de Trabajo

Esta sección describe las particularidades más relevantes del sistema software para cuantificar el nivel de *engagement* de alumnos presentado en [8], al mismo tiempo que reflexiona sobre su adaptabilidad para la consecución del objetivo del estudio presente: cuantificar el *engagement* del profesor.

A. Herramienta software para cuantificar el engagement de los alumnos

La herramienta propuesta en este trabajo [8] toma como punto de partida la identificación sistemática de un conjunto

de características digitales medibles, que se desprenden del uso de los sensores inherentes (cámara, micrófono y teclado) en entornos de videoconferencia. Sobre dichos datos se apoya el cálculo del nivel de *engagement* de los estudiantes, ideándose un modelo analítico para su cuantificación. En última instancia, un sistema basado en tecnologías web, captura y monitoriza las características digitales, y mediate el cálculo reiterado del modelo analítico es capaz de obtener la evolución del nivel de *engagement* para ponerlo (en exclusiva) a disposición del profesor. Esta información facilita el despliegue de metodologías docentes adaptativas en entornos virtuales síncronos, reduciendo las dificultades que presentan este tipo de entornos en comparación con los modelos tradicionales de docencia presencial. A continuación, se describen las propiedades más relevantes de los elementos clave del sistema (características digitales, modelo analítico y herramienta web) y se argumenta su adecuación al propósito presente.

Respecto al conjunto de características digitales, se consideran un total de 46 [8], cada una de las cuales pertenece a una de las 2 dimensiones propuestas por [12]: conductual (*behavioral engagement*) o emocional (*emotional engagement*). En este punto es de relevancia observar la exclusión intencionada de la dimensión cognitiva (*cognitive engagement*), la cual no es adquirible en tiempo real durante una sesión docente, precisando en este caso la integración con información de otros sistemas como podrían ser los registros de actividad (*log files*) de Learning Content Management Systems (LMS). Adicionalmente, para un fácil manejo e interpretación, el volumen de características es reducido mediante la creación de Categorías Digitales (CD) según el aspecto al cual hacen referencia. Concretamente, las 10 categorías son:

TABLE I. CATEGORIAS Y DIMENSIONES DEL ENGAGEMENT

Categoría Digital (CD)	**(Dimensión *engagement*) Descripción**
Asistencia	(Conductual / Emocional) Características asociadas con el número de participantes en la sesión y sus variaciones.
Uso de cámara	(Conductual / Emocional) Eventos del estado de la cámara y sus variaciones.
Interacciones de voz	(Conductual) Detalles (duración, número) referentes a las intervenciones de voz, así como el nivel de silencio.
Mano levantada	(Conductual) Uso de las opciones del levantamiento de mano y compartición de pantalla respectivamente.
Compartición de pantalla	
Interacciones de chat	(Conductual / Emocional) Uso de chat, como el número de mensajes, numero de preguntas y uso de emoticonos.
Análisis de sonido	(Conductual) Calidad del sonido, ruido, volumen y discontinuidad.
Emoción facial	(Emocional) Identificación de emociones de los participantes.
Movimiento labial	(Conductual/Emocional) Detecciones de bostezo o interacciones con personas ajenas a la sesión de videoconferencia.
Seguimiento ocular	(Emocional) Características que se desprenden de la dirección de visión de los participantes.

Los datos asociados a estas 10 categorías digitales nutren el modelo analítico ENQUA (*ENgagement QUAntification*) descrito en la Ecuación (1):

$$ENQUA(t) = \alpha * \left(e^{-\frac{t}{k}}\right) + \beta * \left(\sum_{i=1}^{10} (W_i * CD_i)\right) \quad (1)$$

Esta expresión matemática presenta 2 términos principales ponderados por α y β respectivamente, que permiten ajustar su comportamiento según las características del grupo de alumnos:

- La tendencia natural al *disengagement* [20] con el paso del tiempo y su particular customización, modelada según la exponencial de superíndice negativo y las variables t (tiempo) y k (grado de la tendencia decreciente del nivel de *engagement*), obsérvese $\alpha * \left(e^{-\frac{t}{k}}\right)$. Con ello es posible adaptar las características del grupo de alumnos, eligiendo valores de *k* según la tendencia natural, más o menos acusada, del *disengagement* de del grupo de alumnos.
- La influencia de las características digitales o eventos capturados según las 10 categorías descritas anteriormente, véase $\sum_{i=1}^{10}(W_i * CD_i)$. La relevancia de cada Categoría Digital es ponderada según W_i, lo que permite la customización (de la influencia de los eventos que cuantifican el nivel de *engagement*) según la actividad docente que tenga lugar en la sesión.

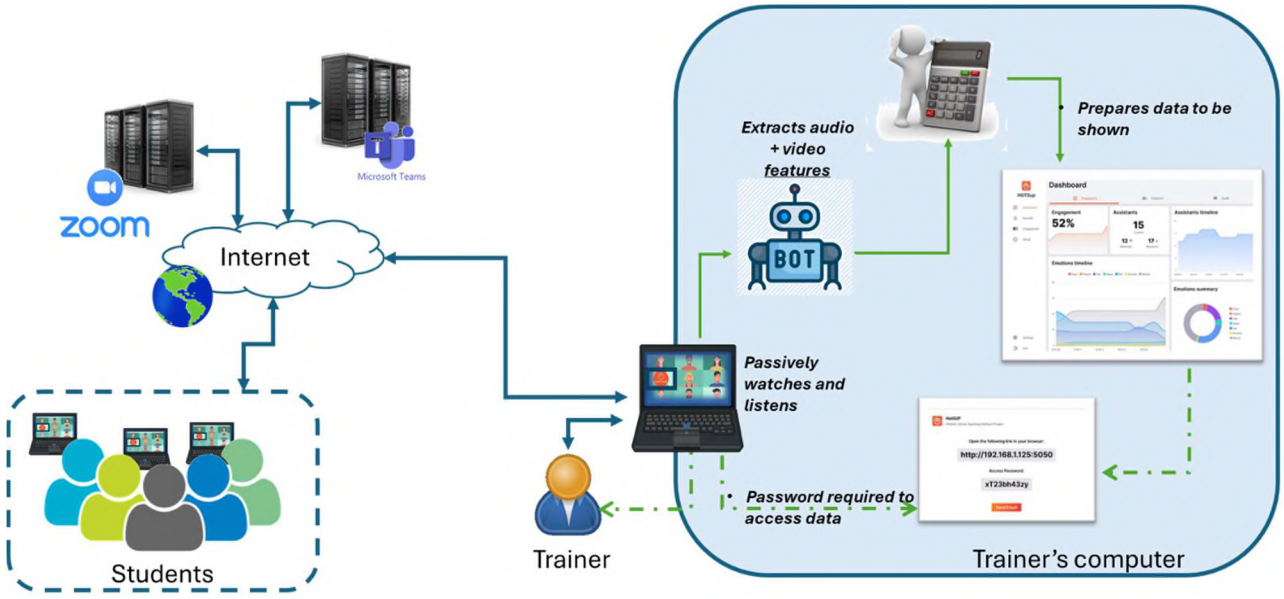
El resultado ENQUA(t) es un valor entero comprendido entre 0 (no se detectan indicios de *engagement* por parte de los alumnos) a 100 (solamente se detectan sucesos propicios de altos niveles de *engagement*) para una fácil interpretación.

Las altas capacidades de customización que presenta el modelo, fieles a las particularidades de la gran variedad de estrategias / metodologías docentes, así como a la naturaleza e incertidumbre presentes en procesos de investigación, podrían ofrecen un grado de adaptabilidad adecuado para hacer frente al trabajo presente:

- La ponderación de las categorías digitales que modelan los sucesos es configurable (W_i), y por lo tanto es posible restringir los datos de entrada a aquellos que se crean convenientes para modelar la impartición de la sesión.
- El profesor también presenta una tendencia natural al *disengagement*, al igual como les sucede a los alumnos.
- La solución con interfaz web, inicialmente concebida para mostrar el nivel de *engagement* de los alumnos al profesor, es adecuada para mostrar, a él mismo y en exclusiva, su nivel inducido de *engagement*.

Tal y como se puede ver en el diagrama de la arquitectura del sistema de la Figura 1, el sistema software se conecta al entorno de videoconferencia (Zoom o Teams) como un usuario más, y (de forma pasiva) captura y monitoriza las características digitales propias de las 10 categorías puntualizadas en la Tabla 1. A partir de esta recolección sistematizada de datos digitales, el modelo analítico es ejecutado reiteradamente, exponiendo así los valores calculados del nivel de *engagement* a disposición exclusiva del profesor en un cuadro de mando (*dashboard*). Nótese que,

FIGURA I. DIAGRAMA DE LA ARQUITECTURA DEL SISTEMA SOFTWARE DESPLEGADO EN EL ORDENADOR DEL DOCENTE (A LA DERECHA, EN AZUL). EL SOFTWARE SE CONECTA A TRAVÉS DE INTERNET A UNA SESIÓN DE VIDEOCONFERENCIA, EXTRAE EN TIEMPO REAL LA INFORMACIÓN DISPONIBLE (VER TABLA 1), Y LA PUBLICA DE FORMA INTELIGIBLE EN UN *DASHBOARD* ACCESIBLE POR CONTRASEÑA.



a nivel de arquitectura, esta aproximación podría verse como un caso particular en el que se combinan principios tanto de *edge computing* (cálculo del nivel de *engagement* en el dispositivo frontera) como de *cloud computing* (extracción de los parámetros asociados a las Categorías Digitales de la nube del proveedor de servicios de videoconferencia).

A pesar de que esta herramienta fue específicamente concebida para monitorizar el *engagement* de los alumnos en entornos virtuales síncronos, también podría usarse para monitorizar el *engagement* del profesor, no solo en entornos virtuales síncronos sino que también en sesiones presenciales (tal y como se persigue en este trabajo). Así, el profesor tendría que (1) crear una sesión de videoconferencia en la que estuviera él solo, (2) configurar el software para que se conectara a esa sesión, y (3) ajustar los parámetros del modelo analítico *ENQUA(t)* para que los datos que se muestren en el *dashboard* se ajusten a la nueva realidad que se está monitorizando (*engagement* del profesor en vez de *engagement* de los alumnos). En el siguiente apartado se describe y justifica el proceso llevado a cabo en este tercer punto.

B. Cuantificación del engagement del profesor

La configuración del modelo analítico *ENQUA(t)* para la cuantificación del *engagement* del profesor ha consistido en valorar la adecuación de cada Categoría Digital, de las 10 disponibles en la Tabla 1, a este nuevo escenario. Tomando en consideración la labor del profesor según la tipología de la sesión (de exposición de contenidos o teórica, de puesta en práctica de conocimientos o práctica), se he decidido:

- No incluir las 5 Categorías Digitales correspondientes a: asistencia, uso de la cámara, mano levantada, compartición de pantalla e interacciones de chat.
- Incluir las restantes 5 Categorías Digitales, centradas en: interacciones de voz, análisis del sonido, emoción facial, movimiento de los labios i seguimiento ocular.

Las Categorías Digitales no incluidas, han sido descartadas según las observaciones siguientes:

- Asistencia: El software computa el número de usuarios conectados a la sesión de videoconferencia. Dado que, en el escenario propuesto en este trabajo, en la sesión de videoconferencia solo estará conectado el profesor, este parámetro no aporta información relevante para el cálculo del *engagement.*
- Uso de la cámara: El software computa el número de usuarios conectados a la sesión de videoconferencia que tienen la cámara encendida. Dado que, en el escenario propuesto en este trabajo, en la sesión de videoconferencia solo estará conectado el profesor, este parámetro no aporta información relevante para el cálculo del *engagement.*
- Mano levantada: El software computa el número de usuarios conectados a la sesión de videoconferencia que han hecho click en la funcionalidad de "levantar la mano". Dado que, en el escenario propuesto en este trabajo, en la sesión de videoconferencia solo estará conectado el profesor, nadie hará click en esta funcionalidad y por lo tanto este parámetro no aporta información relevante para el cálculo del *engagement.*
- Compartición de pantalla: El software computa el número de usuarios conectados a la sesión de videoconferencia que han compartido su pantalla para la exposición de material visual. Dado que, en el escenario propuesto en este trabajo, en la sesión de videoconferencia solo estará conectado el profesor, nadie compartirá su pantalla y por lo tanto este parámetro no aporta información relevante para el cálculo del *engagement.*
- Interacciones de chat: El software computa el número y longitud de los mensajes de chat que hay en la sesión de videoconferencia. Dado que, en el escenario propuesto en este trabajo, en la sesión de videoconferencia solo estará conectado el profesor, no habrán mensajes en el chat, así pues quedan descartadas también aquellas métricas referentes al

número de mensajes, preguntas y uso de otros elementos de texto.

Nótese que algunos de estos cinco parámetros podrían ser medibles mediante otros dispositivos (e.g., cámara en el aula), lo que aumentaría el nivel de intrusividad de la herramienta.

En referencia a las incluidas, destacan los siguientes motivos:

- Interacciones de voz: El software computa eventos como los minutos de silencio y el número de intervenciones, los cuales son indicadores relevantes para describir le grado de actividad de la labor del profesor.
- Análisis del sonido: El software computa información referente a la calidad del sonido y presencia de ruido ambiente, lo que también influye en el nivel de *engagement*.
- Emoción facial (o emoción primaria: felicidad, disgusto, enfado, neutral, miedo, tristeza): El software computa información referente a la emoción percibida en los usuarios de la sesión de videoconferencia. Dado que en la sesión de videoconferencia solo estará conectado el profesor, este parámetro será un factor relevante en la cuantificación del nivel de *engagement* durante la sesión.
- Movimiento de los labios, detección de bostezos e interacciones con personas ajenas a la videoconferencia.): El software computa información referente a estos eventos detectados en los usuarios conectados a la sesión de videoconferencia. Dado que en la sesión de videoconferencia solo estará conectado el profesor, este parámetro será un factor clave en la cuantificación del nivel de *engagement* durante la sesión.
- Seguimiento ocular, cuantificación del grado de focalización durante la sesión. El software computa información referente a estos eventos detectados en los usuarios conectados a la sesión de videoconferencia. Dado que en la sesión de videoconferencia solo estará conectado el profesor, este parámetro será un factor clave en la cuantificación del nivel de *engagement* durante la sesión.

La Tabla 2 resume las Categorías Digitales que se han incluido/excluido para el objeto de este trabajo así como a la dimensión del *engagement* [4, 12] a la que pertenecen.

TABLE II. CATEGORIAS DIGITALES Y SU CUSTOMIZACIÓN

Categoría Digital	Dimensión	Incluida
Asistencia	Conductual / Emocional	No
Uso de cámara	Conductual / Emocional	No
Interacciones de voz	Conductual	Sí
Mano levantada	Conductual	No
Compartición de pantalla	Conductual	No
Interacciones de chat	Conductual / Emocional	No
Análisis de sonido	Conductual	Sí
Emoción facial	Emocional	Sí
Movimiento de los labios	Conductual / Emocional	Sí
Seguimiento ocular	Emocional	Sí

IV. EXPERIMENTOS

Para explorar hasta qué punto se puede usar el sistema para monitorear el nivel de *engagement* del profesor, se han seguido los pasos siguientes: (1) configurar del modelo analítico ENQUA, (2) diseñar sesiones de prueba, (3) conducir y monitorizar las sesiones de prueba diseñadas y (4) recopilar retroalimentación mediante los resultados obtenidos y percepciones / comentarios de los participantes en los experimentos.

Respecto al diseño de los experimentos, siguiendo la línea de trabajo de [15], se han llevado a cabo 2 sesiones con las características siguientes:

- Experimento 1. Este experimento está centrado en observar si hay influencias relevantes en el nivel de *engagement* del profesor asociadas a distintos comportamientos corporales y oculares. Con este objetivo, el profesor alterna, deliberadamente, varias posturas corporales, dentro y fuera del marco de captura de la cámara, así como la fijación o retirada de la mirada dirigida a los materiales que son objeto de explicación. Este experimento pretende evaluar si el software es capaz de medir el nivel de *engagemenet* cuando el profesor se mueve de forma natural o, por lo contrario, éste debe estar mirando a la cámara de su ordenador portátil en todo momento.
- Experimento 2. Este experimento está centrado en observar la capacidad que tiene el software de medir el nivel de *engagement* del profesor. Con este objetivo, el profesor imparte la misma sesión dos veces y, de forma deliberada, cambia su estilo, estado anímico y emocional (alegre o contento) de una sesión a otra para tratar de presentar distintos niveles de *engagement*. Este experimento pretende evaluar la viabilidad de usar el software para medir el *engagenent* del profesor, con el objetivo de poderle dar una herramienta más de soporte a la docencia.

Ambos experimentos han sido realizados mediante el uso de un ordenador portátil, conectado a una sesión Zoom, que ha sido monitorizada por el sistema [8] a tiempo real. Los resultados del nivel de *engagement* del profesor han sido accesibles mediante la interfaz web desde otro ordenador para no influir en el comportamiento del profesor.

A. Experimento 1

Para realizar este experimento, se han seleccionado dos docentes que imparten la misma asignatura, los cuales han sido apoyados por un tercero que se encargaba de conducir la sesión. Para realizarlo, se les pidió que prepararan una explicación de un fragmento de aproximadamente 5 minutos sobre un tema específico que ambos dominaban, apoyándose en los materiales de la asignatura. De esta forma, se utilizaron las mismas diapositivas para garantizar que cualquier diferencia observada no se debiera a variaciones en el contenido o en el conocimiento del tema. Esta estandarización ha permitido enfocarse exclusivamente en el efecto de las

FIGURA II. EVOLUCIÓN DEL NIVEL *ENGAGEMENT* EN EL EXPERIMENTO 1. (A) PROFESOR 1 EN CONDICIONES IDEALES, (B) PROFESOR 2 EN CONDICIONES IDEALES, (C) PROFESOR 1 EN CONDICIONES NO IDEALES, (D) PROFESOR 2 EN CONDICIONES NO IDEALES.

(A)

(B)

(C)

(D)

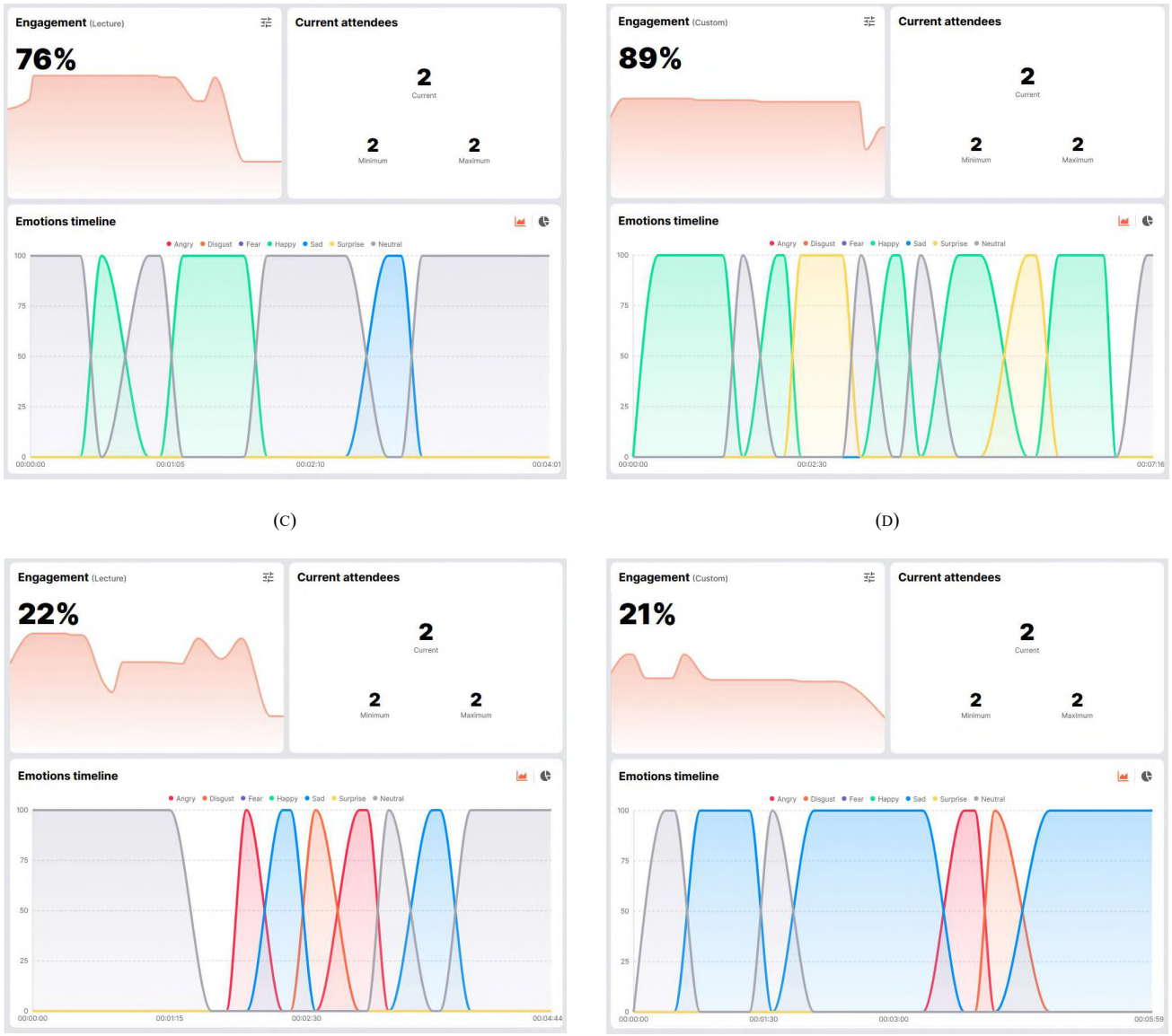
dinámicas de presentación. Las explicaciones se han realizado en dos condiciones diferentes: (1) condiciones ideales, es decir, con los docentes sentados, mirando directamente a la cámara y manteniendo un contacto visual constante, y (2) condiciones no ideales, donde los docentes se sitúan de pie y a veces fuera del foco principal de la cámara, realizando movimientos voluntarios y naturales, como girar la cabeza, y sin mantener contacto visual directo con la cámara. El objetivo de éste último escenario es el de simular situaciones más dinámicas y menos controladas de la enseñanza, comparándolo con el primero. En ambas situaciones, se ha puesto especial atención en mantener la uniformidad de la explicación, asegurando que cada repetición por parte de los docentes fuera lo más similar posible, para que las variaciones en los resultados se debieran exclusivamente a las diferencias en las dinámicas corporales y oculares.

La Figura 2 muestra la evolución del nivel de *engagement* de cada profesor en cada una de las pruebas. Tal y como puede verse, el Profesor 1 (Figura 2-A y Figura 2-C) tiene un estilo más neutro a la hora de impartir la sesión, cosa que provoca cambios abruptos y recurrentes en la evolución del nivel de *engagement*. En cambio, el Profesor 2 (Figura 2-B y Figura 2-D) tiene un estilo más dinámico a la hora de impartir la sesión (puede verse también en el hecho de que la mayoría de las emociones detectadas son positivas), cosa que provoca que el nivel de *engagement* evolucione de una forma más estable. Sin embargo, en ambos casos puede observarse cualitativamente que la diferencia entre las dos situaciones (condiciones ideales en la Figura 2-A y Figura 2-B y condiciones no ideales en la Figura 2-C y Figura 2-D) a pesar de percibirse (e.g., se detecta un ligero número inferior de emociones), no afecta significativamente a la evolución del nivel de *engagement*.

Esto sugiere que, al menos en el contexto de este experimento, las variaciones en la postura corporal, el contacto visual con la cámara, y la ubicación dentro o fuera del marco de la cámara no tienen un impacto notable en la

FIGURA III. EVOLUCIÓN DEL NIVEL *ENGAGEMENT* EN EL EXPERIMENTO 2. (A) PROFESOR 3 EN CONDICIONES IDEALES, (B) PROFESOR 4 EN CONDICIONES IDEALES, (C) PROFESOR 3 EN CONDICIONES NO IDEALES, (D) PROFESOR 4 EN CONDICIONES NO IDEALES.

(A) (B)



(C) (D)

efectividad del software de cuantificación del *engagement* para el profesor. Los resultados de este primer experimento invitan a aprovechar la flexibilidad del sistema propuesto en [8] para el reconocimiento del *engagement* del docente en entornos presenciales. Se ha mostrado como el *software* puede adaptarse a diferentes condiciones de captura de video y de comportamientos en la impartición de una sesión sin afectar negativamente y de forma significativa la cuantificación del nivel de *engagement*.

B. Experimento 2

Para realizar este segundo experimento, se han seleccionado otros dos docentes y se les pidió que prepararan la misma explicación de un fragmento de aproximadamente 5 minutos sobre un tema específico que ambos dominaban. Las explicaciones se han realizado en dos condiciones diferentes: (1) condiciones ideales, es decir, con los docentes deliberadamente motivados tratando de explicar los contenidos de la forma más amena y atractiva posible: gesticulando, moviéndose, haciéndose preguntas retóricas, entre otras, y (2) condiciones no ideales, donde los docentes han explicado los contenidos limitándose a mirar fijamente en la pantalla leyendo los contenidos, sin añadir ningún cambio deliberado para tratar de hacer más amena la sesión. El objetivo de éste último escenario es el de simular situaciones que reflejen una situación de cansancio o desgaste (inconsciente) del docente mientras imparte la sesión. En ambas situaciones, se ha puesto especial atención en explicar los mismos contenidos, asegurando que cada repetición por parte de los docentes fuera lo más similar posible, para que las variaciones en los resultados se debieran exclusivamente a las diferencias en la forma de impartir la sesión.

La Figura 3 muestra la evolución del nivel de *engagement* de cada profesor en cada una de las pruebas. Tal y como puede verse en la Figura 3-A, el Profesor 3 es capaz de mantener un nivel de *engagement* alto a pesar de que puntualmente muestra una emoción de tristeza (*Sad*), lo que, combinado a los valores capturados en las otras Categorías Digitales, hace decrecer rápidamente el nivel de *engagement*. En cambio, el Profesor 4 en condiciones ideales (Figura 3-B) utiliza un estilo de impartir la sesión que combina dos emociones positivas

(*Happy*, *Surprise*), lo que también le permite mantener el nivel de *engagement* alto. En este último caso, merece la pena resaltar el pequeño "socavón" final en la evolución del *engagement* de la Figura 3-B: este es debido a que en una de las gesticulaciones del docente, este se ha salido del enfoque de la cámara y, por lo tanto, el sistema al ver que no había ninguna cara presente ha hecho bajar el nivel de *engagement.*

En cuanto a los resultados obtenidos en condiciones ideales (Figura 3-C y Figura 3-D) puede verse la correlación entre la detección de emociones negativas enfado, tristeza, aversión (*Angry, Sad, Disgust*) hacen que el nivel de *engagement* se mantenga bajo.

Esto sugiere que, al menos en el contexto de este experimento, se confirma que el sistema es capaz de detectar cambios en el estilo del docente a la hora de impartir una sesión presencial. Los resultados de este segundo experimento demostrativo invitan a utilizar este sistema como un recurso docente más que permite al profesor autoevaluar su nivel de *engagement* mientras está impartiendo una sesión.

V. Discusión y Conclusiones

Tradicionalmente, el análisis del *engagement* de los usuarios en un entorno educativo ha sido predominantemente unidireccional. Es decir, con un punto de vista de los estudiantes hacia el docente, siendo la implicación y desempeño de los primeros un indicador de la calidad del proceso de aprendizaje. Sin embargo, parece que no se ha considerado suficientemente la influencia recíproca del *engagement* del docente a la hora de potenciar el aprendizaje y la implicación de sus alumnos. En este trabajo se ha presentado a modo de demostrador una herramienta software que pretende monitorizar a tiempo real el nivel de *engagement* del profesor mientras está impartiendo una sesión—lo que representaría un primer paso hacia una visión más holística del *engagement* en entornos educativos.

En las pruebas experimentales que se han llevado a cabo, se ha podido ver cómo la herramienta que estaba diseñada para medir la evolución del nivel de *engagement* de los alumnos en entornos virtuales síncronos, se puede modificar y ajustar para medir la evolución del nivel de *engagement* del profesor en entornos presenciales. Como no podría ser de otra forma, estos experimentos presentan algunas limitaciones. Por un lado, hay que tener en cuenta que las pruebas no exhaustivas que se han llevado a cabo están orientadas únicamente a estudiar la viabilidad de la herramienta y demostrar su potencial, por lo que los comportamientos de los profesores que han participado en los experimentos han podido ser algo exagerados (o incluso caricaturizadas) en algún momento puntual. Esto ha permitido explorar los límites de la herramienta, al mismo tiempo que obtener resultados de realismo limitado. Por otro lado, para poder entender la evolución del nivel de *engagement* en todo momento y su correlación con los datos que se iban capturando de la Categorías Digitales durante los experimentos, las sesiones experimentales han tenido una duración relativamente corta (algo más de 7 minutos como máximo). Esta duración es poco realista si se compara con sesiones lectivas reales las cuales suelen durar 50 minutos o más. Esto hace que los valores absolutos del nivel de *engagement* calculados por la herramienta (53%, 54%, 55% , 52% en la Figura 2 y 76%, 89%, 22% y 21% en la Figura 3) tengan poca relevancia más allá de la tendencia o patrón histórico de comportamiento de este parámetro.

De hecho, el valor absoluto del porcentaje de nivel de *engagement* calculado según el modelo analítico descrito en la Sección 3 no debería considerarse de forma puntual y aislada (e.g., cuando el nivel de *engagement* está por debajo del 25% hay una situación de alarma), sino que debería considerarse de forma macroscópica y relativa (e.g., cuando el nivel de *engagement* en los últimos 10 minutos no ha superado el 25% hay una situación de alarma). Además, obsérvese que en el transcurso de una sesión lectiva real pueden pasar algunos eventos para los cuales un sistema automático como el presentado en este trabajo no está preparado para entender: por ejemplo, si se deja a los alumnos un tiempo para resolver un ejercicio, durante este tiempo el profesor probablemente va a estar en silencio y va a adoptar un semblante serio, por lo que inevitablemente el nivel de *engagement* va a decaer rápidamente. De hecho, tal y como se ha podido ver en los dos experimentos, la forma inherente de expresarse del profesor también influye en la cuantificación del nivel de *engagement* (pero no en su patrón de comportamiento). Es por estas razones que la métrica del nivel de *engagement* siempre debe ser interpretada teniendo en cuenta el profesor y su contexto docente—los cuales son (o deberían ser) siempre conocidos por el principal usuario de la herramienta: el profesor.

A pesar de estas limitaciones, los autores de este trabajo creen humildemente que esta herramienta tiene mucho potencial para actuar como herramienta de soporte a la docencia. Además del *dashboard* web que puede ser consultado desde cualquier dispositivo, también podría integrarse la herramienta con una pulsera inteligente y cuando el sistema detectara que el patrón del nivel de *engagement* del profesor no es adecuado, mandarle una notificación—similar a los recordatorios de sedentarismo. También podría usarse esta herramienta, una vez finalizada la sesión, para hacer un análisis retrospectivo y basado en datos del desarrollo de la clase. Comparando los datos de varias sesiones, se podrían encontrar patrones o tendencias (e.g., el nivel de *engagement* del profesor decae a los 33 minutos) que podrían ayudar a diseñar medidas y/o actividades preventivas que mejoraran el desempeño del docente. Por último, sería muy interesante estudiar la correlación (si la hay) del nivel de *engagement* de los alumnos con el nivel de *engagement* del profesor. Esto permitiría descubrir y cuantificar nuevas dinámicas docente-alumnos (e.g., cuando el nivel de *engagement* de los alumnos está en situación anómala, el *engagement* del profesor decrece significativamente al cabo de X minutos) que darían lugar a nuevos mecanismos para la mejora de la calidad docente (e.g., cuando el nivel de *engagement* del docente está en situación anómala se cambiará la actividad formativa).

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen la financiación recibida del programa Aristos Campus Mundus (ACM2023_15), del Departamento de Educación del Gobierno Vasco por el grupo de investigación reconocido DEUSTEK5 (IT1582-22) y del programa Erasmus+ (HOlistic online Teaching SUPport (HOTSUP) Ref. 2020-1-PL01-KA226-HE-096456).

Bibliografía

[1] Lee, Woogul, and Johnmarshall Reeve. "Teachers' estimates of their students' motivation and engagement: Being in synch with students." *Educational Psychology* 32.6 (2012): 727-747.

[2] Pons, Dirk, et al. "Evaluation of student engagement with a lecture capture system." (2012).

[3] Elphick, Liam. "Adapting law lectures to maximise student engagement: Is it time to'transform'?." *Legal Educ. Rev.* 28 (2018): 1.

[4] Charland, Patrick, et al. "Assessing the multiple dimensions of engagement to characterize learning: A neurophysiological perspective." *JoVE (Journal of Visualized Experiments)* 101 (2015): e52627.

[5] Subramainan, Latha, and Moamin A. Mahmoud. "A systematic review on students' engagement in classroom: Indicators, challenges and computational techniques." *International Journal of Advanced Computer Science and Applications* 11.1 (2020): 105-115.

[6] Cleary, Jim, and Ivan Skaines. "Student engagement as a quality indicator at the University of Newcastle." *Proceedings of the 2005 Australian Universities Quality Forum*. Melbourne, Victoria, Australia: Australian Universities Quality Agency, 2005.

[7] Coates, Hamish. "The value of student engagement for higher education quality assurance." *Quality in higher education* 11.1 (2005): 25-36.

[8] Solé-Beteta, Xavier, et al. "A data-driven approach to quantify and measure students' engagement in synchronous virtual learning environments." *Sensors* 22.9 (2022): 3294.

[9] Axelson, Rick D., and Arend Flick. "Defining student engagement." *Change: The magazine of higher learning* 43.1 (2010): 38-43.

[10] Hagenauer, Gerda, Tina Hascher, and Simone E. Volet. "Teacher emotions in the classroom: associations with students' engagement, classroom discipline and the interpersonal teacher-student relationship." *European journal of psychology of education* 30 (2015): 385-403.

[11] Klassen, Robert M., Sündüs Yerdelen, and Tracy L. Durksen. "Measuring teacher engagement: development of the engaged teachers scale (ETS)." *Frontline Learning Research* 1.2 (2013): 33-52.

[12] Jennifer A. Fredricks, Michael Filsecker, Michael A. Lawson, Student engagement, context, and adjustment: Addressing definitional, measurement, and methodological issues, Learning and Instruction, Volume 43, 2016, Pages 1-4, ISSN 0959-4752, https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2016.02.002.

[13] Farr-Wharton, Ben & Charles, Michael & Keast, Robyn & Woolcott, Geoff & Chamberlain, Daniel. (2018). Why lecturers still matter: the impact of lecturer-student exchange on student engagement and intention to leave university prematurely. Higher Education. 75. 10.1007/s10734-017-0190-5.

[14] Montenegro, Aida. (2022). Lecturers' Perceptions of Student Engagement and Their Role in Supporting It. 9. 134-152. 10.46827/ejes.v9i4.4243.

[15] Sagayadevan, Vathsala & Jeyaraj, Senthu. (2012). The Role of Emotional Engagement in Lecturer-Student Interaction and the Impact on Academic Outcomes of Student Achievement and Learning. J Scholarship Teach Learn. 12. 1-30.

[16] Dismore, Harriet & Turner, Rebecca & Huang, Rong. (2018). Let me edutain you! Practices of student engagement employed by new lecturers. Higher Education Research & Development. 38. 1-15. 10.1080/07294360.2018.1532984.

[17] Su, Feng & Wood, Margaret. (2012). What makes a good university lecturer? Students' perceptions of teaching excellence. Journal of Applied Research in Higher Education. 4. 142-155. 10.1108/17581181211273110.

[18] PRANITASARI, Diah, et al. Key Success Factors of Lecturer's Work Engagement at College of Economics. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2019, vol. 14, no 11, p. 3615-3619

[19] Rizki, Mochamad & Saefudin, Yetti & Akbar, Maruf. (2020). Factors Affecting Lecturer Engagement in E-Learning Teaching Method. 10.2991/aebmr.k.200205.038.

[20] Li, Haoting. "Classroom enjoyment: relations with EFL students' disengagement and burnout." *Frontiers in psychology* 12 (2022): 824443.

Enseñanza de la materia "Gestión de datos a bordo" en el grado de "Física e Instrumentación Espacial". Un ejemplo de caso de uso y coordinación vertical entre asignaturas

Antonio da Silva
Departamento de Automática
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares, Spain
antonio.dasilva@uah.es

Óscar R. Polo
Departamento de Automática
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares, Spain
o.rodriguez@uah.es

Pablo Parra
Departamento de Automática
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares, Spain
pablo.parra@uah.es

Agustín Martínez
Departamento de Automática
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares, Spain
agustin.martinez@uah.es

Ignacio García
Departamento de Automática
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares, Spain
ignacio.garcia@uah.es

Manuel Prieto
Departamento de Automática
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares, Spain
manuel.prieto@uah.es

Sebastián Sánchez
Departamento de Automática
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares, Spain
sebastian.sanchez@uah.es

***Abstract*—La investigación y la docencia son los dos pilares sobre los que se asienta la Universidad. Por ello, los grupos de investigación deben participar activamente en la transmisión de este conocimiento a la sociedad. En este trabajo se presenta el grado de "Física e Instrumentación Espacial" de la Universidad de Alcalá (UAH), que ha sido promovido por el Grupo de Investigación Espacial (SRG-UAH) de la misma institución. Este nuevo grado, único en el espacio educativo español, pretende formar a una nueva generación de futuros científicos y tecnólogos en el campo de la exploración espacial. Además, combina los elementos de Ciencia, Tecnología, Electrónica y Matemáticas (STEM) de una forma que no estaba contemplada en las titulaciones clásicas de ciencia y tecnología. En este trabajo se presenta el caso de uso común usado en las diferentes asignaturas que componen la materia "Gestión de datos a bordo", la coordinación vertical de los contenidos entre las mismas y los entornos de laboratorio usados.**

***Index Terms*—Sistemas espaciales, Software empotrado, Tolerancia a fallos, Coordinación vertical**

I. Introducción

El 27/06/2022 se publicó en el BOE el real decreto por el cual el Ejército del Aire pasó a denominarse Ejército del Aire y del Espacio. Es solo una muestra más de cómo la tecnología aeroespacial y las infraestructuras relacionadas son una realidad que debe ser abordada por las instituciones educativas.

Este campo requiere nuevos profesionales que hayan recibido una formación completa en ciencia y tecnología aplicadas al sector espacial. Así pues, las instituciones de educación superior que ofrecen cursos relacionados con el sector aeroespacial deberían explorar nuevas áreas de transferencia de conocimientos para conectar la educación aeroespacial y la práctica profesional [1].

Corresponding author: antonio.dasilva@uah.es

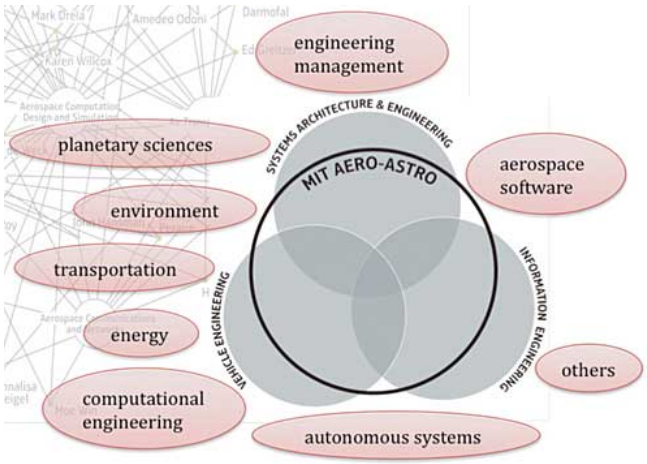


Fig. 1. Cambios en los títulos del área Aeroespacial, Figura tomada de [2]

Existen iniciativas para adaptar los programas de las ingenierías aeroespaciales clásicas [2], [3] que no pueden dar respuesta a los nuevos requisitos demandados actualmente por la industria aeronáutica. De hecho, en la actualidad esta industria demanda personal formado en desarrollo hardware con FPGAs, software empotrado, ingeniería de sistemas y expertos en tecnologías de la información como se muestra en la figura 1.

A. Estructura del artículo

El artículo se estructura en cuatro secciones. La primera sirve de introducción y plantea la necesidad de actualizar, en lo relativo al diseño de sistemas electrónicos, las actuales titulaciones de técnica aeroespacial. La segunda sección presenta el nuevo grado en "Física e Instrumentación Espacial" y se hace énfasis en la materia "Gestión de datos a bordo" en la que se enmarcan las principales competencias relacionados con el desarrollo de sistemas electrónicos embarcados. La tercera describe los métodos y materiales usados para lograr una correcta coordinación vertical en la impartición de dicha materia. Finalmente la cuarta sección presenta las conclusiones del trabajo.

II. Descripción del grado en "Física e Instrumentación Espacial"

El grado de "Física e Instrumentación Espacial" [4] es el primero de estas características que se propone en el ámbito universitario español y tiene una alta componente interdisciplinar que integra en un título modos de trabajo y conocimientos propios de la Física y la Tecnología, tal y como sucede hoy en día en los proyectos dirigidos a la investigación y exploración espacial, y a su desarrollo tecnológico asociado. Para ello combina los elementos de Ciencia, Tecnología, Electrónica y Matemáticas (STEM) de una forma que hasta ahora no estaba contemplada en las titulaciones clásicas de ciencia y tecnologıa. Esto lo hace fundamentalmente distinto tanto de los grados de Física al uso como de las Ingenierías Aeroespaciales que se imparten en el sistema universitario español.

TABLA I
Materias básicas

Asignatura	Materia	Créditos
Álgebra Lineal	Matemáticas	6
Cálculo I		6
Cálculo II		6
Estadística		6
Mecánica	Física básica	6
Campos y ondas		6
Termodinámica		6
Electromagnetismo		6
Introducción a la física cuántica		6
Óptica y técnicas de observación		6
Fundamentos de computadores	Tecnología de computadores a bordo	6
Fundamentos de la programación	Gestión de datos a bordo	6

Este nuevo grado no cubre competencias que tengan relación alguna con la capacidad de vuelo, sustentación, aerodinámica, o propulsión de vehículos para su navegación a través del espacio, sino que capacita para comprender, integrar y validar plataformas, cargas útiles científicas e instrumentación de medida embarcables en satélite, integrando los conocimientos de la física que se puede desarrollar en y desde el espacio, y los relativos al desarrollo de sistemas embarcados, sobre los que se aplican los estándares de desarrollo propios del sector espacial [5].

El Grado en "Física e Instrumentación Espacial" de la Universidad de Alcalá, comenzó a impartirse en el curso 2021/2022 y actualmente se encuentra en su tercer curso. Se trata de un título presencial de 240 créditos ECTS, que fue acreditado inicialmente el 18 de mayo de 2020 por la Comisión Española de Verificación y Acreditación de Planes de Estudio. Este grado se estructura en cuatro cursos académicos, con dos semestres de 30 créditos ECTS cada uno. El grado se estructura en una parte común, que deben cursar todos los estudiantes y a la que se asignan 204 ECTS. Las tablas I y II muestran las asignaturas básicas y obligatorias del grado, así como las materias a las que pertenece cada asignatura.

TABLA II
Materias obligatorias

Asignatura	Materia	Créditos
Cálculo numérico	Matemáticas	6
Métodos matemáticos de la física		6
Fundamentos de electrónica	Tecnología de computadores a bordo	6
Estructura de computadores a bordo		6
Programación de dispositivos e interfaces	Gestión de datos a bordo	6
Sistemas operativos		6
Arquitecturas tolerantes a fallo		6
Sistemas de gestión de datos a bordo		6
Física cuántica	Física de la materia y del espacio	6
Mecánica estadística		6
Ciencia de los materiales		6
Astrofísica		6
Fluidos en ambientes planetarios y espaciales		6
Análisis de circuitos	Señales, sistemas y comunicaciones	6
Señales y sistemas		6
Comunicaciones con el segmento de tierra		6
Dinámica espacial	Dinámica y control de satélites	6
Sistemas de control de actitud y orbitas		6
Sistemas espaciales	Sistemas espaciales	6
Estructura y sistema térmico de un satélite		6
Sistemas de potencia en el espacio		6
Gestión de proyectos espaciales		6

Además, los alumnos deben cursar una serie de créditos optativos, en los que pueden, si lo desean, realizar prácticas en empresas y centros de investigación. La estructura también incluye un proyecto final de carrera de 12 créditos.

A. *Materia "Gestión de datos a bordo"*

La materia "Gestión de datos a bordo" está formada por un conjunto de asignaturas que permiten a los estudiantes adquirir los conocimientos técnicos necesarios para la especificación, diseño y validación de los componentes hardware/software del sistema de gestión de datos a bordo de un satélite. De esta forma los estudiantes adquieren, entre otras, la siguiente competencia específica:

- Demostración de conocimiento del proceso de especificación, diseño y validación del sistema de gestión de datos a bordo de un satélite.

Esta competencia se adquiere al superar las siguientes asignaturas del plan de Estudios del grado de "Física e Instrumentación Espacial":

- Fundamentos de la programación
- Programación de dispositivos e interfaces
- Sistemas operativos
- Arquitecturas tolerantes a fallo
- Sistemas de gestión de datos a bordo

En dichas asignaturas son necesarios entornos hardware/software de los que, en general, el alumno no puede disponer fuera de la universidad, debido a su especificidad y alto coste. Para fomentar el trabajo autónomo del alumno fuera del aula se propone el uso simuladores de los diferentes entornos que permitan al alumno, sino realizar el trabajo completo, si poder avanzar en el mismo fuera del aula. De esta forma los desarrollos podrán ser después cargados, ejecutados y depurados en el entorno real sin tener que realizar modificaciones en los proyectos. Esto hace que el proceso de aprendizaje sea más efectivo.

Se propone como segundo objetivo dotar al alumno de un entornos de aprendizaje integrados en forma de máquina virtual con una distribución de Ubuntu, que incluyan las herramientas esenciales de cada entorno de laboratorio y que permita el trabajo autónomo del alumno fuera del aula y que puede ser reutilizada por las diferentes asignaturas en diferentes cuatrimestres.

Además se propone la definición de un caso práctico único, desde sus aspectos más básicos a los más avanzados, que permita una correcta coordinación vertical entre las diferentes asignaturas que forman la materia "Gestión de datos a bordo" [6].

III. Coordinación Vertical de la Materia "Gestión de Datos a Bordo"

De forma general, los esfuerzos de coordinación se realizan en el marco de todos los cursos de un semestre, pero pocas veces en el marco de toda la titulación. Los primeros han sido principalmente trabajos de coordinación horizontal, que son realizados por comisiones diferentes (una por semestre), con el objetivo principal de coordinar temporalmente las actividades docentes, visitas, los exámenes y las entregas de trabajos prácticos. Sin embargo, se han realizado pocos esfuerzos en sentido temático o vertical [7] [8].

La coordinación vertical, por el contrario, se encarga fundamentalmente de asegurar la correcta distribución y consecución de las competencias específicas y transversales del título, así como de planificar de forma adecuada la utilización de los recursos demandados de forma horizontal por los diferentes equipos docentes. De forma complementaria exite otra forma de coordinación vertical y es aquella relacionada con las asignaturas que forman parte de una misma materia. Generalmente una materia se descompone en varias asignaturas que no tienen por qué pertenecer a un mismo semestre y/o curso académico. La memoria de grado asigna a cada materia las competencias específicas y transversales que deben adquirirse y resulta muy útil una coordinación entre los profesores que imparten asignaturas de una misma materia que permita delimitar claramente qué competencias aborda cada una de ellas y con qué profundidad. En el caso de asignaturas del mismo curso, no sería necesario establecer mecanismos de coordinación horizontal específicos ya que de forma implícita se incluyen en la coordinación horizontal general antes comentada [9].

A. *Descripción del caso de uso práctico*

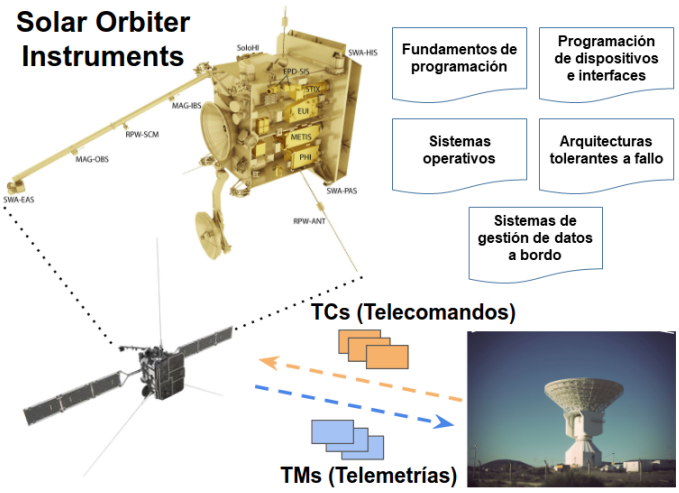


Fig. 2. Caso de uso práctico y asignaturas relacionadas

El contenido específico de la transferencia de conocimientos de investigación que se describe en este trabajo está relacionado con las actividades internacionales más relevantes del grupo de investigación SRG en los últimos años. Principalmente el desarrollo del instrumento Energetic Particle Detector (EPD) de la misión Solar Orbiter, que es una colaboración entre la Agencia Espacial Europea (ESA) y la National Aeronautics and Space Administration (NASA). La sonda Solar Orbiter fue lanzada el 10 de febrero de 2020 y ahora se encuentra en la fase científica, en la que está enviando valiosos datos para la comprensión de la física solar [10].

La figura 2 muestra de forma global el caso de uso planteado. En ella la nave Solar Orbiter se comunica con el segmento de tierra mediante el intercambio de paquetes de datos de acuerdo al estándar ECSS-E-ST-70-41C (PUS: Packet Utilization Standard) [11]. En las diferentes asignaturas de la materia "Gestión de datos a bordo" se aborda el procesamiento de estos paquetes de datos desde diferentes puntos de vista. Desde el desarrollo de software empotrado hasta los aspectos de tolerancia a fallos implicados en el desarrollo del sistema en su conjunto.

El grupo de profesores que imparte la materia está formado por siete personas, seis profesores titulares y un catedrático. Todos ellos pertenecientes al grupo de investigación SRG y adscritos al Departamento de Automática de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá.

B. Contenidos de cada asignatura

1) Fundamentos de la programación (2 cuatrimestre): Esta asignatura aborda los fundamentos de la programación en lenguaje C con una fuerte orientación al uso de operadores binarios y los problemas de "endianess" relativos al orden en el que se almacenan y procesan los datos de tamaño superior a un octeto. Como ejemplos de estructuras de datos se manejarán las definidas en el estándar PUS y la entrada/salida de dichos paquetes se realiza sobre ficheros. Todo el código desarrollado en las prácticas es independiente de la plataforma por lo que puede usarse cualquier entorno de edición/compilación C. Los contenidos prácticos fundamentales serían:

- Estructura de datos PUS
- Operadores a nivel de bit
- Serialización, deserialización de datos (Endianess)

2) Programación de dispositivos e interfaces (3 cuatrimestre): Esta asignatura introduce al estudiante en el desarrollo de software empotrado sobre una máquina desnuda. El código desarrollado ya es dependiente de la plataforma y se aborda el estudio y programación de la periferia básica y de comunicaciones presente en los sistemas empotrados para aplicaciones espaciales. También se abordan los diferentes esquemas de gestión de la entrada/salida, el concepto de manejador de dispositivo y los patrones básicos de codificación de manejadores de interrupción. En este ámbito se simula la recepción de telecomandos y la respuesta con telemetrías mediante líneas de comunicación serie.

- Programación de la máquina desnuda, interfaz de registros y drivers de dispositivo
- Uso de entornos de simulación para el desarrollo de software empotrado
- Interfaces serie UART, transmisión/recepción de TM/TC mediante monitores de línea serie
- Gestión del tiempo, temporizadores

3) Sistemas operativos (4 cuatrimestre): En esta asignatura se introduce al estudiante en la necesidad de utilizar sistemas de software que ayuden a proporcionar niveles de abstracción lo suficientemente altos como para acometer el desarrollo de sistemas aún más complejos. En general, los sistemas operativos se encargan de poner a disposición de los usuarios los recursos hardware de la plataforma de forma sencilla y segura. Además, facilitan el desarrollo y permiten la ejecución concurrente de programas o tareas que implementan diferentes funcionalidades del sistema.

- Sistemas operativos de tiempo real
- Programación multitarea, gestión de la concurrencia
- Transmisión/recepción de TM/TC mediante herramientas específicas de GSE (Ground Support Equipment)

4) Arquitecturas tolerantes a fallo (5 cuatrimestre): Esta asignatura tiene como objetivo proporcionar los conocimientos sobre los métodos y las técnicas de diseño más empleadas en sistemas procesadores para la detección y tolerancia a fallos, con el objetivo final de que el sistema siga operativo aún en presencia de fallos. Los contenidos de la asignatura abarcan el hardware y el software de las arquitecturas de sistemas procesadores empleadas en instrumentación espacial.

- Aspectos de fiabilidad relacionado el diseño de sistemas espaciales
- Técnicas de tolerancia de fallos y recuperación
- Concepto de redundancia. Técnicas de redundancia hardware/software
- Técnicas de redundancia de la información.

5) Sistema de gestión de datos a bordo (6 cuatrimestre): En esta asignatura se describen los principios de la gestión de datos a bordo de un sistema satélite. Para ello se centra principalmente, en el papel del software ODBH (On Board Data Handling), detallando los servicios estándar que debe implementar, detallando los elementos de la arquitectura software que intervienen, y de forma específica, los que habilitan la detección, aislamiento y recuperación de fallos.

- Servicios TM/TC Standard de la gestión de datos a bordo.
- Extensión de TM/TC específicos para una misión
- Patrones de procesamiento TM/TC
- Modelado de sistemas y generación de código para OBDH (On Board Data Handling)

C. Entornos de laboratorio

Además de que los contenidos prácticos giren alrededor de un caso común usado en los diferentes escenarios prácticos de laboratorio, el uso de entornos de laboratorio basados en una máquina virtual común que incluya todas las herramientas necesarias para el desarrollo de las prácticas en las diferentes asignaturas, facilita en gran medida la curva de aprendizaje de los estudiantes.

Por otro lado, para la distribución de la información, ejercicios, ejemplos de clase y enunciados de prácticas se ha optado por documentos online formateados con Markdown [12]. Los enlaces a estos documentos son fácilmente distribuidos y compartidos de una forma muy ágil a través de los entornos de gestión de aprendizaje tipo Moodle o Blackboard. Todo ello con una apariencia que es común a todos los contenidos como se muestra en la figura 3.

En el caso de las asignaturas de desarrollo de software empotrado se ha usado un entorno de edición y compilación para C/C++ basado en Eclipse.

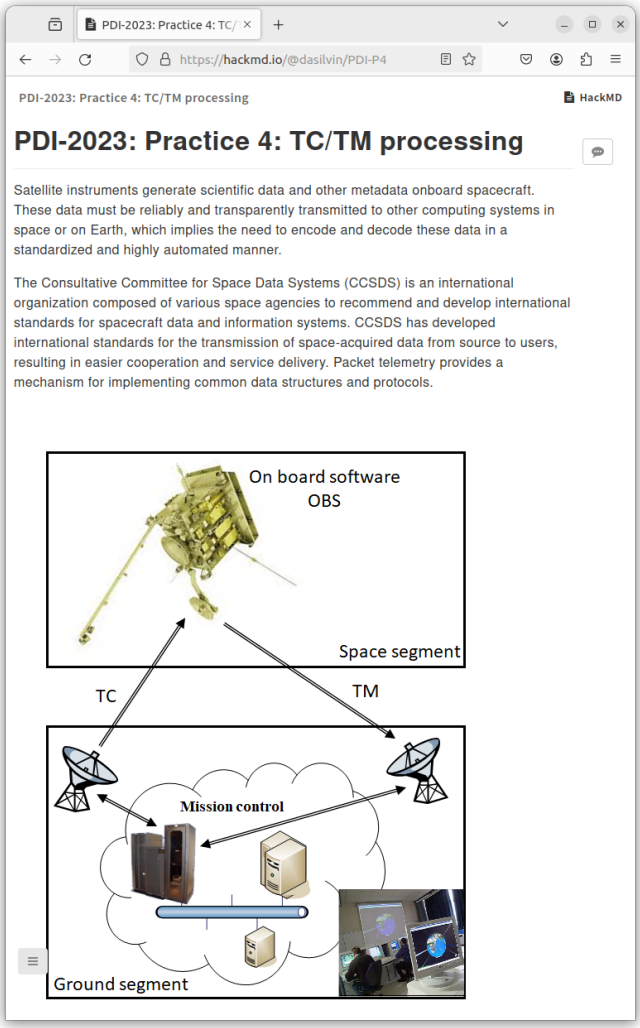


Fig. 3. Ejemplo de enunciado online con HackMD-Collaborative Markdown Knowledge Base

Los proyectos que se desarrollan en este entorno usarán en cada asignatura las herramientas de desarrollo GNU específicas (toolchain) para su entorno de ejecución. Por defecto se incluye un proyecto Eclipse completamente configurado como ejemplo de cada entorno. Para la asignatura Arquitecturas tolerantes a fallo se ha incluido Matlab en la máquina virtual. A continuación se describen brevemente cada uno de los entornos de laboratorio:

1) Fundamentos de la programación: Los programas desarrollados en este laboratorio son independientes de la plataforma por lo que usan el compilador GNU gcc para arquitecturas Intel cuyos binarios pueden ejecutarse directamente en la máquina virtual.

2) Programación de dispositivos e interfaces: En este laboratorio se desarrolla software empotrado para una máquina desnuda con un procesador RISC-V por lo que se debe usar una toolchain GNU RISC-V para realizar la compilación cruzada.

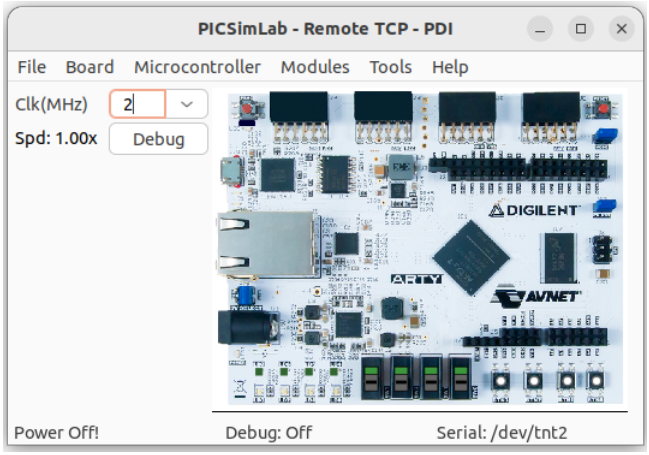


Fig. 4. Simulador de la placa Arty-A7 con un SOC RISC-V

Los programas realizados son ejecutados sobre un entorno simulado que se muestra en la figura 4 que reproduce el comportamiento de una placa Arty-A7 basada en la FPGA Arty A7-100T de Xilinx sobre la que se ha sintetizado un SoC que integra un procesador RISC-V y diversos controladores de interfaces de comunicaciones como son líneas serie UART e interfaces SPI. Este entorno de simulación está basado en [13]

3) Sistemas operativos: En esta asignatura se usa la placa Arty-A7 real mostrada en la figura 5, con la configuración descrita anteriormente. El objetivo es introducir al alumno en la necesidad de utilizar sistemas de software que ayuden a proporcionar niveles de abstracción lo suficientemente altos como para acometer el desarrollo de sistemas aún más complejos mediante el uso de sistemas operativos de tiempo real. En este laboratorio se usa RTEMS [14] como sistema operativo de tiempo real con su toolchain para RISC-V.

4) Arquitecturas tolerantes a fallo: En esta asignatura se ejercitan los mecanismos más típicos para lograr tolerancia a fallos en la transmisión y procesamiento de la información. Los TM/TC incluyen campos con códigos detectores y correctores de error. Mediante ejercicios de programación en Matlab se consolidarán los conceptos presentados en teoría. Los programas se ejecutarán directamente desde el entorno de desarrollo Matlab en la máquina virtual sin necesidad de ningún equipamiento adicional.

5) Sistemas de gestión de datos a bordo: En este laboratorio se aborda el estudio del ODBH, su especificación técnica, el diseño de su arquitectura desde una perspectiva de alto nivel y los aspectos de diseño detallado e implementación en un hardware real. Para ello se utilizará una placa Nexys A7, mostrada en la figura 6 y que también está basada en la FPGA Arty A7-100T de Xilinx sobre la que se ha sintetizado un SoC que integra un procesador LEON3, muy utilizado en misiones de la agencia Espacial Europea (ESA), y diversos controladores de comunicaciones ya mencionados anteriormente. En este laboratorio se usa también RTEMS como sistema operativo de tiempo real con la toolchain para la familia de procesadores LEON [15].

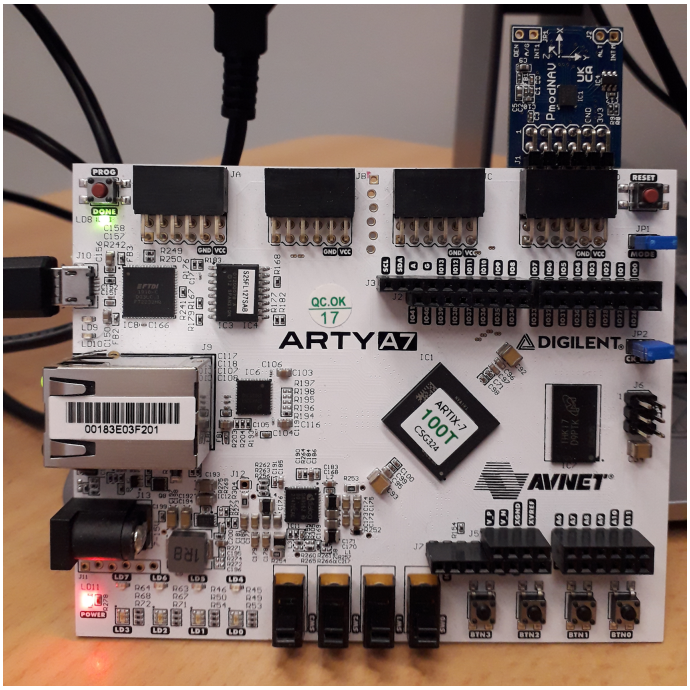


Fig. 5. Placa Arty-A7 real con SOC RISC-V y sensor SPI

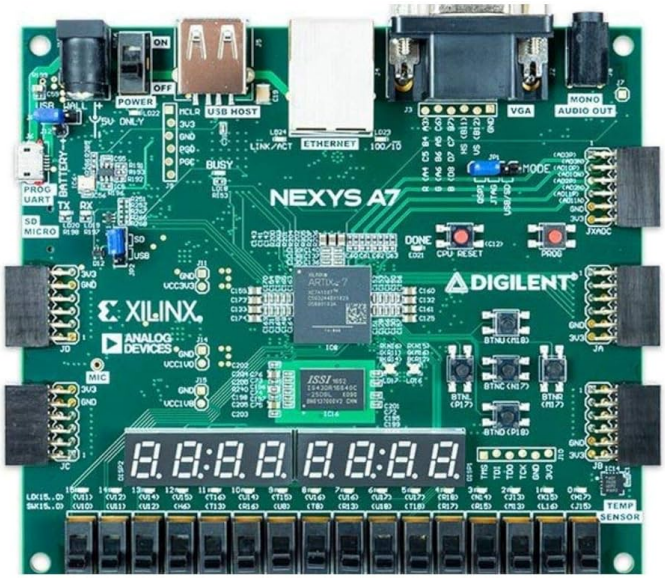


Fig. 6. Placa Nexys-A7 con un SOC LEON3

IV. Conclusiones

Este artículo presenta las líneas generales del grado de "Física e Instrumentación Espacial", diseñado para responder a las demandas de la industria espacial actual y cómo adecuar la formación y la transferencia de conocimientos a las nuevas realidades. Este grado cubre las áreas de conocimiento necesarias para el desarrollo de sistemas espaciales que no están cubiertas por las titulaciones aeroespaciales clásicas. Desde un punto de vista multidisciplinar, esto incluye no sólo aspectos físicos como la dinámica espacial sino también aspectos tecnológicos relacionados con el software de vuelo y la ingeniería de sistemas.

También se ha descrito el caso de uso usado para lograr un correcta coordinación vertical en la impartición de la materia "Gestión de datos a bordo" y el uso de una única máquina virtual con todas las herramientas necesarias para las prácticas de las diferentes asignaturas.

Los resultados de esta metodología, en comparación con una aproximación tradicional basada en prácticas y entornos independientes, muestran una mejora en las capacidades formativas trabajadas en las asignaturas, incluyendo una mejora de la calidad de la programación, mejor organización del trabajo y cumplimiento de plazos y una visión mucho más práctica. Esta percepción del grupo de profesores se deriva de la experiencia previa en la impartición de contenidos tecnológicos semejantes en grados de Ingeniería de Telecomunicación e Informática en los que no se ha usado esta metodología.

Desde la experiencia del grupo de investigación, la participación activa tanto en proyectos de investigación espacial como en la propuesta de nuevas titulaciones, aunque supone un reto, también es muy gratificante profesionalmente, así como muy apreciada por los estudiantes.

Actualmente la titulación se encuentra en su tercer año y ha tenido muy buena acogida. Se ha ofertado un cupo anual de 50 plazas y la nota de corte ha sido superior a 12,4 puntos sobre 14 en los tres cursos. Desde una perspectiva de género, la distribución de alumnos y alumnas es en torno al 50%.

References

[1] S. Roy, Y. Dong, L. Baber, and B. Ahn, "Classroom to Workplace: Knowledge and Skills Learned by Recently Hired Aerospace Engineers," *Journal of Aerospace Information Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 317–329, 2022.

[2] L. N. Long, "On the need for significant reform in University Education, especially in Aerospace Engineering," in *2015 IEEE Aerospace Conference*, 2015, pp. 1–7.

[3] E. M. Atkins, "Education in the crosscutting sciences of Aerospace and Computing," *Journal of Aerospace Information Systems*, vol. 11, no. 10, pp. 726–737, 2014.

[4] Universidad de Alcalá, "Grado en Física e Instrumentación Espacial," https://www.uah.es/es/estudios/Grado-en-Fisica-e-Instrumentacion-Espacial/, 2024, [Online; accessed 1-Mar-2024].

[5] S. Dalledonne, M. V. Prest, M. Hermes, and L. Pohl, "Space education in Europe: status and prospects," *4th Symposium on Space Educational Activities*, 2022. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:251121207

[6] R. Asenjo, S. González, F. Corbera, Á. Navarro, A. Rodríguez, J. Villalba, E. Hendrix *et al.*, "La plataforma Raspberry Pi como base para la coordinación vertical," *Enseñanza y Aprendizaje de Ingeniería de Computadores*, 2017.

[7] C. Carbonell, S. Cardona, I. Domínguez-Candela, V. Fombuena, M. F. López-Pérez, J. Lora, and R. Sanchis, "Project-based learning as a coordination methodology between subjects in a Chemical Engineering degree," in *INTED2021 Proceedings*. IATED, 2021, pp. 5965–5974.

[8] J. Linares-Pellicer, J. Orta-López, J. Salavert-Torres, M. J. Segura Flor, J. A. Silvestre Cerdà, and R. Sanchis, "Towards inter-subject project-based learning in programming-related courses at computer science studies," *EDULEARN Proceedings (Internet)*, pp. 3973–3978, 2020.

[9] M. Ferré, C. García-Barroso, M. García-Famoso, D. Sánchez, and A. Valls, "Comprehensive simulation of a software project throughout several subjects," *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologias del Aprendizaje*, vol. 15, no. 4, pp. 262–271, 2020.

[10] S. Sánchez, M. Prieto, Óscar R. Polo, P. Parra, A. da Silva, Óscar Gutiérrez, R. Castillo, J. Fernández, and J. Rodríguez-Pacheco, "HW/SW co-design of the Instrument Control Unit for the Energetic Particle Detector on-board Solar Orbiter," *Advances in Space Research*, vol. 52, no. 6, pp. 989–1007, 2013.

[11] European Coorperation for Space Standardization, "ECSS-E-ST-70-41C–Telemetry and Telecommand Packet Utilization," https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-70-41c-space-engineering-telemetry-and-telecommand-packet-utilization-15-april-2016/, 2016, [Online; accessed 20-Mar-2024].

[12] Matt Cone, "Markdown Guide," https://www.markdownguide.org/, 2024, [Online; accessed 20-Mar-2024].

[13] Fernando Gamboa, "PICSimLab - Programmable IC Simulator Laboratory," https://github.com/lcgamboa/picsimlab/, 2024, [Online; accessed 20-Mar-2024].

[14] The RTEMS Project, "Real-Time Executive for Multiprocessor Systems," https://www.rtems.org/, 2024, [Online; accessed 20-Mar-2024].

[15] The Euroean Space Agency, "Microprocessors," https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering/Onboard_Computers_and_Data_Handling/Microprocessors, 2024, [Online; accessed 20-Mar-2024].

El autoaprendizaje como competencia central en la enseñanza de fundamentos de computadores

Javier Hormigo
Dpto. Arquitecturas de computadores
Universidad de Málaga
Málaga, España
0000-0002-5454-6821

***Abstract*—En este trabajo presentamos la experiencia de abordar el estudio de los fundamentos del computador con una metodología centrada en el alumno. Para ello, las clases magistrales son sustituidas por material didáctico variado, el estudio colaborativo y la implementación de un computador básico en un simulador. El estudiantado debe tomar las riendas de su aprendizaje y se ve forzado a trabajar semanalmente en la asignatura. Aunque la adaptación del alumnado al cambio de paradigma les obliga a un esfuerzo inicial extra, al terminar, la mayoría del estudiantado tiene una actitud positiva ante esta metodología y reconoce un mayor nivel de aprendizaje.**

***Index Terms*—Autoaprendizaje, aprendizaje activo, aprendizaje colaborativo, motivación, computadores.**

I. Introducción

En un mundo en el que el conocimiento y la tecnología avanzan a una velocidad extrema, la capacidad de aprender de forma autónoma [1], el autoaprendizaje, debe ser una de las competencias centrales en la educación superior. De hecho, entre las ocho competencias que figuran en los planes de estudio para la asignatura cuya experiencia vamos a presentar, dos, están directamente relacionadas con el aprendizaje autónomo, básicamente dicen ”Poseer las habilidades de aprendizaje que permitan continuar estudiando de un modo autodirigido o autónomo”. Las otras seis competencias lo están de forma indirecta, al estar relacionadas con la autonomía, la aplicación en otros contextos y la evaluación. Es muy importante aclarar que aprender de forma autónoma no significa que deba hacerse de forma aislada. Todo lo contrario, la verdadera autonomía se consigue cuando los alumnos son interdependientes y se ayudan unos a otros [1]. Por ello, el trabajo en equipo suele ser otro de los pilares de este tipo de metodologías [2] [3]. Este estilo de enseñanza está ampliamente estudiado y se ha aplicado en numerosos contextos [4] [5] [6] [7].

En este trabajo presentamos la experiencia de primar la autonomía del alumno a la hora de abordar la enseñanza en la asignatura ”Fundamentos de computadores”. En esta asignatura se aborda desde cero el estudio de los conceptos básicos relacionados con el funcionamiento y la arquitectura de los computadores. Esto incluye aspectos teóricos como la representación de la información, circuitos lógicos, la estructura básica de un computador y el ciclo de instrucción. También se estudian temas prácticos como la programación a nivel de ensamblador, los dispositivos de entrada/salida, y los sistemas operativos. Todo ello debe hacerse de forma suficientemente profunda para que se entienda, en un nivel básico, cómo funciona y cuales son los componentes fundamentales del computador, pero sin extenderse demasiado para poder hacerlo en los créditos asignados a la asignatura y suponiendo un desconocimiento total del área de estudio.

En el caso concreto de este trabajo, se trata de una asignatura de nivelación de un título de máster en Ingeniería Industrial. Es decir, es una asignatura que solo deben cursar los alumnos del máster que no tengan el grado de ingeniería industrial ya que es una asignatura obligatoria en este grado. Esto hace que los alumnos no sean muy numerosos, unos 15 alumnos, y que provengan de titulaciones de ingenierías tan dispares como mecánica, diseño industrial, eléctrica, química, energía, electrónica industrial y otras. Además es una asignatura que se aleja mucho, tanto de la temática del propio máster, como de las titulaciones de origen. Esto hace que, en general, los alumnos no conozcan prácticamente nada de esta área, y además, que tampoco estén muy interesados en estos temas a priori, e incluso duden que deba estar en el plan de estudios.

La asignatura tiene 6 créditos ECTS, es decir, unas 150 horas. De éstas, sólo 45 horas son en clase y 105 horas son fuera de clase. Se imparten 4,5 horas semanales durante 10 semanas, por lo que el curso está bastante comprimido. A esta misma asignatura en el grado de ingeniería industrial le corresponden 60 horas de clase y 90 fuera de clase. Esto hace que el alumnado de máster tenga que dedicar más horas fuera de clase, lo que no suele ser bien aceptado. Este trabajo resume la experiencia en los cursos 22/23 y 23/24. En el primero, la asignatura se impartía en dos sesiones a la semana de 3 y 1,5 horas, respectivamente, pero en este último se impartió en una sola sesión de 4,5 horas. Este último formato es más adecuado para la metodología que se va a emplear.

II. Metodología empleada durante el curso

La metodología empleada en la asignatura está basada principalmente en el aprendizaje activo y colaborativo y sigue las directivas dadas en [8]. Las clases magistrales son sustituidas por material didáctico escrito y audiovisual. En clase, los alumnos realizan diferentes actividades, con un guión y una temporización muy detallados. Cada actividad suele tener

parte individual, y parte en pareja o grupos. La parte más teórica se aborda sobre todo mediante el método del puzle [9]. Sin embargo, la mayor parte del trabajo se realiza en el laboratorio en actividades de diseño e implementación en un simulador lógico, concretamente Logisim [10]. A continuación detallamos las principales actividades realizadas durante el curso.

A. Actividad introductoria al autoaprendizaje

Siguiendo la sugerencia de uno de los alumnos del curso 22/23, al comienzo de este curso se introdujo una actividad para presentar y justificar la importancia de desarrollar la capacidad del autoaprendizaje en la educación superior. Esta actividad se realizó en parejas. Aprovechamos también para explicar la importancia de la escucha activa en el trabajo en grupo y cómo ponerla en práctica en esta misma actividad.

Primero se le presenta un documento donde individualmente leen diferentes ventajas del desarrollo del autoaprendizaje en el contexto laboral actual. De estas ventajas eligen las cinco que mas les convencerían para trabajar esta competencia y las usan por turnos para convencer a su compañero de hacerlo. Tras escuchar ambos argumentos se les pide que indiquen en el documento si van a tratar de desarrollar esta competencia. Todos contestaron que sí.

Posteriormente, se les presentan algunas estrategias claves para desarrollar esta competencia de manera efectiva. Se les indica también, que no todas las estrategias son válidas para todo el mundo y que es importante adaptarlas a sus necesidades a lo largo del proceso de aprendizaje. De entre todas estas estrategias, deben elegir cinco de ellas y explicar al compañero de qué forma van a ponerlas en práctica. Para completar la actividad, se le presenta una lista que enumera cuál debe ser la actitud del profesor para fomentar el autoaprendizaje en clases y se les pide que elijan las cinco que consideren más importantes. Finalmente, cada pareja debe consensuar con la pareja de al lado las 4 más importantes.

Esta actividad permite que conozcan los motivos por los que es importante que se hagan autónomos en el aprendizaje y les da estrategias para poder conseguirlo. Además, comienza a cambiar sus expectativas sobre lo que pueden esperar del profesor, y ayuda al profesor a conocer cómo prefieren ellos que se les apoye en el proceso de aprendizaje. No menos importante es el hecho de que se han comprometido explícitamente a trabajar esta competencia.

B. Actividades "teóricas"

Para estudiar los contenidos de cada tema, tienen disponible en el campus virtual diferentes tipos de material, desde apuntes y presentaciones, hasta vídeos cortos específicos o clases magistrales completas grabadas. Además se les anima a consultar la bibliografía recomendada o buscar otros recursos en la web. Es importante destacar que el material proporcionado no se ajusta completamente a los contenidos requeridos, siendo en general más amplio o con una terminología variada. Siendo alumnos de máster es importante que se enfrenten a situaciones más reales.

Antes de clase, se les pide que estudien ciertos contenidos concretos usando el material disponible y los foros para consultar dudas. Para algunos temas se le ofrecen también ejercicios resueltos, o con la solución, para poder auto-evaluarse. En clase, se realizan actividades para que discutan lo aprendido y los ejercicios con los compañeros.

Como se ha mencionado antes, los contenidos más teóricos se abordan principalmente usando el método del puzle [9]. En este método los estudiantes se dividen en grupos. A cada miembro del grupo, se le asigna una parte del tema que deben preparar individualmente para hacerse "expertos" en ese tema. En una segunda fase, se realiza una reunión de "expertos" en el mismo tema para resolver dudas y aclarar conceptos. Posteriormente, se reúnen los grupos iniciales para compartir lo que han aprendido con el resto del grupo. Finalmente se realiza una prueba para evaluar la comprensión de todas las partes del tema. Este método se usa para introducir los contenidos más teóricos de los últimos temas, cuando ya están formados los grupos definitivos. Estos temas son concretamente: dispositivos de entrada/salida, sistema de memoria y sistemas operativos.

C. Proyecto con el simulador

El hilo conductor de la asignatura es el diseño de un computador en el simulador lógico Logisim [10] que ya había sido usado en contextos muy parecidos [11]. Este trabajo lo realizan en grupos estables a lo largo de todo el cuatrimestre. Para dar una mayor variabilidad, las especificaciones del diseño no están cerradas completamente e incluso se les pone alguna condición diferente a cada grupo. Primero, realizaran el diseño completo de un procesador simple, posteriormente lo conectarán a algunos dispositivos básico de entrada/salida, y finalizarán probando diferentes configuraciones de cache.

Partiendo de unas especificaciones básicas sobre los tamaños de datos, memorias e instrucciones mínimas, diseñan el repertorio de instrucciones (ISA) de un procesador monociclo y su codificación. Además el número de operandos explícitos en la instrucción se indica en particular para cada grupo. Deben entregar un informe incluyendo la definición de las instrucciones y su formato. Además un programa usando las instrucciones definidas que sirva para comprobar que las instrucciones funcionan correctamente. Este informe es evaluado formativamente por coevaluación.

Una vez validado el ISA reducido, pasan a implementar el camino de datos monociclo y la unidad de control cableada para las instrucciones incluidas en la definición del ISA. Estas instrucciones, al principio un número muy reducido, se irán ampliando a lo largo del curso para poder completar la funcionalidad del procesador. Como soporte a esta actividad, además del material típico incluido en cada tema, disponen de unos vídeos donde se implementa un procesador completo en logisim [12]. Además se les facilita una guía de los pasos y puntos claves que deben seguir para realizar la implementación.

Una vez el procesador es funcional, comienzan a trabajar con la simulación a más alto nivel (RTL), donde pueden es-

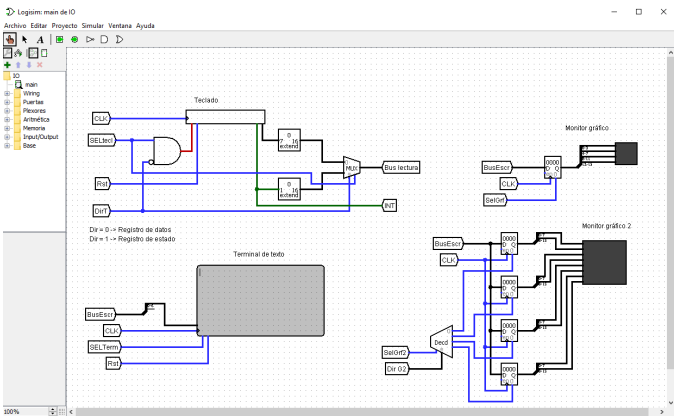


Fig. 1. Dispositivos de entrada/salida en Logisim

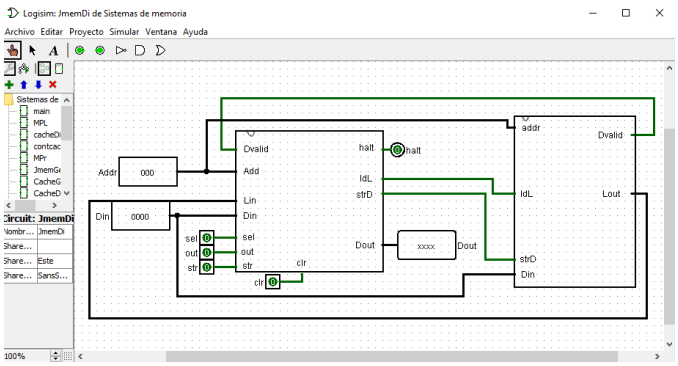


Fig. 2. Sistema de memoria en Logisim

pecificar los elementos de memoria que quieren ver y realizan la simulación mediante una traza de un número elevado de ciclos de reloj. Se les pide que codifiquen y usen el programa de test para realizar un testeo más intensivo. Además de esto, se les pide la implementación de alguna función sencilla en ensamblador, por ejemplo, la multiplicación mediante suma y desplazamiento, y su simulación en el procesador. Para ello, deberán añadir alguna instrucción adicional en el procesador. También se les pide la implementación de instrucciones que permitan llamadas a subrutinas. En esta fase, aprenden elementos claves de programación en ensamblador así como la importancia de tener un ISA bien diseñado. Una vez terminada la fase anterior se les pide una entrega completa del procesador incluyendo la documentación completa sobre el ISA, cómo se ha realizado la implementación, los programas de testeo, etc. Esta entrega se usará para la evaluación sumativa.

En una siguiente fase, se les entrega una serie de dispositivos básicos de entrada/salida implementados en Logisim para que los conecten a su procesador. Deberán entregar un informe describiendo los trabajos realizados que contará para la evaluación sumativa. Al menos, deben conectar un dispositivo de entrada y otro de salida usando mapeo en memoria y *polling* como técnica de acceso. Además, deben diseñar también un programa que muestre cómo funcionan los dispositivos conectados, valorándose la complejidad y extensión de la demostración. Como posibles ampliaciones se les propone también mapear los dispositivos de forma aislada para lo que tienen que añadir instrucciones especiales de entrada/salida, y además, usar el sistema de interrupciones del teclado. Esto último implicaría hacer algunos cambios importantes en el procesador para tener un pin de entrada de interrupción. No obstante, sería un sistema de interrupciones básico porque pueden suponer que solo hay un dispositivo con señal de interrupción.

Los dispositivos que tienen disponibles se pueden ver en la Fig. 1 y son:

- El teclado, que permite introducir caracteres en ASCII y tiene un buffer de hasta 4 caracteres. Se ha diseñado para tener dos puertos, uno de lectura del estado, para saber si hay algún dato disponible, y otro para leer el dato propiamente dicho. Además el dispositivo cuenta con una línea de interrupción que indica cuándo hay caracteres para leer.
- El terminal de texto, que permite representar caracteres ASCII en una pantalla. Para ello, tiene un puerto de escritura, en el que se escribe el siguiente carácter que se quiere mostrar por pantalla.
- El monitor gráfico pequeño, que permite representar un gráfico de 4x4 píxeles. Cada bit de la entrada representa un píxel, por lo que tiene un puerto de escritura de 16 bits.
- El monitor gráfico grande, que permite representar un gráfico de 8x8 píxeles. Para ello, contiene 4 registros de entrada de forma que cada uno controla dos líneas de 4 píxeles cada una.

Hasta este momento no se han considerado los retardos de ningún elemento, ya que no esto no está soportado por Logisim. Sin embargo para entender el concepto de memoria cache es importante que experimenten el coste temporal de leer de la memoria principal. Por ello, se propone sustituir la memoria RAM de su diseño, por una memoria RAM diseñada de forma que tarda varios ciclos en realizar los accesos. Usando la simulación RTL de logisim se les pide simular la ejecución de un programa con múltiples accesos a la memoria de datos y fijarse en la traza y el número de ciclos que necesita para ejecutarse cuando se usa la memoria normal y la que tiene retraso. Inicialmente se les pide un breve informe comentando ambos casos.

Para finalizar el trabajo con el simulador, se les facilitan dos sistemas de memoria como el representado en la Fig. 2 que además de la memoria principal incluyen una memoria cache. Los dos sistemas de memoria incluyen diferentes memorias cache como la que se muestra en la Fig. 3. Una es directa y la otra asociativa por conjuntos, aunque esto no se les dice a los estudiantes.

En este caso, se les pide utilizar programas con diferentes patrones de acceso para comparar el funcionamiento entre los tres diferentes sistemas de memoria (sin cache , con cache directa, con cache por conjuntos). Se pretende que experimenten con Logisim y observen el funcionamiento de

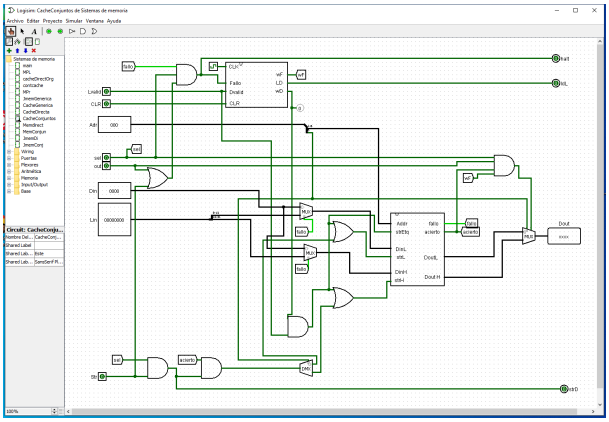


Fig. 3. Memoria cache en Logisim

los diferentes circuitos para profundizar en sus conocimientos sobre sistemas de memoria. Para esta actividad se les pide un informe de lo que hayan aprendido que también cuenta para la evaluación sumativa. Para ayudarlos a enfocar la tarea, manteniendo la flexibilidad, se les dan algunas ideas para realizar este informe:

- Caracteriza los diferentes sistemas de memoria: tamaño de bloque, tipo y tamaño de cache, vías, políticas de remplazo y escritura,...
- Estadísticas con las diferentes memorias: dado un programa, frecuencia de acierto y fallo, tiempo medio de acceso, penalización por fallo,...
- Diferentes patrones de acceso (programas): que minimicen o maximicen el índice de fallos en cada tipo de cache, o que funcionen claramente mejor en un tipo que en otro.
- Cambios en el HW para crear diferentes sistemas de memoria y estudiar su comportamiento: cambios en el tamaño de líneas, tamaño total de la cache, política de remplazo o escritura, unificar la memoria principal...

III. Sistema de evaluación

La mayoría de las actividades realizadas por los alumnos incluyen un proceso de evaluación diseñada con el propósito de apoyar su formación pero no de obtener una calificación. Es decir, se centran en destacar qué está bien hecho, qué se podría mejorar, y cuáles son los principales errores, pero no se le asigna ninguna calificación. Entre otros aspectos, esto ayuda a que el alumno se sienta en un entorno más seguro y vaya perdiendo el miedo a equivocarse, que suele estar siempre presente al inicio del curso. Además, esta evaluación ”formativa” no la realiza siempre el profesor, sino que se realiza también mediante evaluación por pares o autoevaluación. Esto es fundamental para conseguir una verdadera autonomía en el aprendizaje. En general , nos encontramos con unos estudiantes acostumbrados a tener siempre como referencia la figura del docente como poseedor de la ”verdad”. Sin embargo, el autoaprendizaje se apoya en la autoevaluación o la evaluación entre iguales.

Para la evaluación sumativa de la asignatura se utilizan varios componentes que se distribuyen a lo largo de todo el curso. Concretamente la nota final se calcula utilizando la siguiente distribución:

- 10% por realizar todas las entregas (individuales y en grupo) en la fecha y forma que se establezcan. Si esto no ocurre en al menos el 80% de los casos la asignatura se califica como ”No presentado”. La calificación de esta componente se decrementa en función del número de entregas no realizadas en el tiempo y/o formato especificado. De esta forma, resaltamos la importancia de realizar todas las actividades cuando están planificadas y al mismo tiempo que equivocarse es una parte fundamental del aprendizaje.
- 40% por las entregas finales que se solicitan en el proyecto. Concretamente, el procesador final, su conexión con los dispositivos de entrada salida y el análisis de los sistemas de memoria. Para cada entrega se tienen en cuenta los diseños realizados y la documentación aportada. La calificación de este apartado será la misma para todos los integrantes del grupo.
- 40% por las pruebas individuales de conocimientos básicos de cada tema. Estas pruebas permiten constatar que individualmente se han adquirido una serie de conocimientos mínimos correspondientes a cada tema. Salvo para el tema del diseño del procesador, se trata de una prueba tipo test realizadas en el CV. Para el caso del tema del procesador, la prueba consiste en añadir una nueva instrucción simple a su propio procesador. En caso de que alguna de las pruebas no se supere, se ofrece la posibilidad de realizar otro test del tema correspondiente.
- 10% por actitud y participación en clase y dentro de los grupos de trabajo. La primera parte se determina según lo observado por el profesor en la clase, mientras que para la segunda parte se usa una encuesta realizada a cada alumno donde tienen que evaluar el desempeño de varios aspectos tanto de sus compañeros como de si mismo dentro del grupo de trabajo.

Como medida de evaluación adicional, al final del curso, se les pide a los alumnos entregar una reflexión sobre qué ha aprendido en la asignatura, y que debería haber aprendido mejor, así como qué calificación numérica creen que se merecen. Esta entrega no forma parte de la evaluación sumativa, pero sirve para ver hasta que punto son capaces de autoevaluarse, capacidad fundamental en el autoaprendizaje. Se puede ver, en general, que existe una gran correlación entre la nota que ellos perciben y la que realmente obtienen. Esto refleja en gran medida el grado de madurez alcanzado por estos alumnos. No obstante también aparecen casos puntuales de alumnos demasiado optimista o pesimistas.

IV. Resultados obtenidos y discusión

Para analizar los resultados de la experiencia vamos a empezar fijándonos en algunos parámetros más objetivos. Primero, podemos destacar que la tasa de éxito (aprobados frente a presentados) en ambos cursos fue del 100%. Gracias

a la evaluación continua y al reducido número de alumnos es fácil aplicar medidas correctoras cuando se ve que algún alumno no va del todo bien. De forma similar la tasa de rendimiento (aprobados frente al total de matriculados) es también bastante elevada, situándose en el 93% en el curso de 22/23 y en el 87% en el curso 23/24. La propia dinámica de trabajo hace que los estudiantes que decidan seguir la asignatura desde un principio ya no la dejen. De hecho, la asistencia a clase se mantuvo en el 100% en casi todas las sesiones, salvo algunas faltas puntuales por causas justificadas. La tasa de rendimiento no es del 100% porque algunos estudiantes no llegan a venir a clase o abandonan en las dos primeras semanas.

En concordancia con los otros parámetros, las calificaciones obtenidas son también elevadas. La nota media entre todos los alumnos fue de 7,7 en el primer curso y de un 8,2 en el segundo, con una desviación estándar de 1,1 en ambos casos. El trabajo continuo en las diferentes actividades fuerza a los estudiantes a aprender y esto hace que tengan éxito en las diferentes pruebas de evaluación. Además, si esto no es así tienen la oportunidad de resolverlo antes de que acabe el curso.

Además de los indicadores objetivos mencionados anteriormente, contamos con una serie de encuestas realizadas al alumnado en distintos momentos del curso para ayudarnos a entender la percepción que tienen estos sobre la asignatura. Además, contamos con el diario de aprendizaje de los alumnos que, entre otras cosas, nos da una medida bastante objetiva del tiempo que le han dedicado a cada actividad durante el curso. También disponemos de la autoevaluación de los grupos que nos ayuda a entender cómo han funcionados estos.

El primer día de la asignatura los estudiantes hicieron dos encuestas anónimas, antes y después de la presentación de la asignatura, para poder establecer sus conocimientos de partida y entender sus expectativas respecto a la asignatura. En general, son preguntas abiertas sobre sus conocimientos previos, lo que esperan aprender, su grado de compromiso con la asignatura y la nota a la que aspiran. En mitad del curso, cuando llevamos un tercio y dos tercios del curso, se les hace otra encuesta anónima para censar como es la evolución de este. Son sólo dos preguntas abiertas que deben contestar en 2 minutos, ”¿qué ha sido lo mejor del curso hasta ahora?” y ”¿qué ha sido lo peor y debe cambiarse lo antes posible?”. Los resultados de esta encuesta se presentan en la clase siguiente y se comentan, justifican y se toman medidas si es necesario.

Finalmente, el último día de clase, junto con otras evaluaciones, se hace otra encuesta anónima con tres preguntas abiertas para que escriban su opinión sobre cualquier aspecto de la asignatura, cómo la mejorarían y la labor del profesor. De la primera de estas preguntas se puede extraer fácilmente la valoración general que los alumnos hacen de la asignatura y qué aspecto es el que más les llama la atención. En la gran mayoría de los casos los comentarios de esta pregunta hacen referencia a la metodología o aspectos directamente relacionados con esta, como la carga de trabajo en casa. De acuerdo a las respuesta de esta pregunta, en ambos cursos, la mayoría de los alumnos tienen una percepción positiva ante la asignatura siendo más positivas en el segundo curso. En este segundo curso el 84% de los alumnos están contentos con la asignatura y un 50% de estos están muy contentos, con comentarios del tipo ”Me ha gustado la asignatura aunque no tenía muchas expectativas” o ”Lo aplicaría a otras asignaturas” refiriéndose al método. Un 15% en el primer curso y un 8% en el segundo tienen respuestas contradictorias en el sentido de que les ha gustado aprender de esa forma pero que le parece radical que el profesor no de clases magistrales o que la carga de trabajo ha sido demasiada. Un 23% en el primer curso y solo un 8% en el segundo tiene una percepción negativa de la asignatura. Las opiniones negativas son provocadas, sobre todo, por la dificultad inicial de enfrentarse al nuevo paradigma y una carga de trabajo a la que no están acostumbrados. Todos estos problemas no son nuevos y suelen aparecer siempre que se usa este tipo de metodología [13] [14]. Añadir también que, en nuestro caso particular, entre algunos alumnos existe la creencia de que esta asignatura es ”de segunda categoría” y trata temas que no están relacionados con el máster, por lo que, para ellos, tener que dedicarle tanto esfuerzo no tiene sentido.

TABLE I
RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS ENCUESTAS INTERMEDIAS

Lo más positivo del curso	**22-1**	**22-2**	**23-1**	**23-2**
Ver que estoy aprendiendo	36%	31%	18%	60%
El trabajo en equipo	14%	15%	36%	20%
El autoaprendizaje, dinamismo, práctico	50%	46%	36%	10%
Otros	0%	8%	9%	10%
¿Qué habría que cambiar?	**22-1**	**22-2**	**23-1**	**23-2**
La carga de trabajo en casa	57%	31%	36%	40%
Ajustes para reducir el autoaprendizaje	36%	46%	55%	20%
Otros	7%	15%	9%	10%
Nada	0%	8%	0%	30%

En general, muchos alumnos se sienten algo perdidos y frustrados al principio, pero conforme van adquiriendo el hábito de trabajar semanalmente y descubriendo que realmente van aprendiendo, van apreciando cada vez más la asignatura y su metodología. Esto se observa mejor usando los resultados de las encuestas rápidas realizadas durante el curso. En la Tabla I hemos hecho un resumen de las respuestas obtenidas en estas encuestas realizadas en los dos cursos descritos en esta experiencia. Las respuestas son libres pero las hemos agrupado en las diferentes categorías representativas que aparecen en la tabla. Para que sea más fácil comparar entre cursos, los resultados se indican en porcentaje en lugar de los valores absolutos. En la parte positiva, es interesante ver cómo, en el primer tercio del curso, una mayoría de alumnos ve la metodología seguida, incluyendo el trabajo en equipo, como lo mejor de la asignatura. Sin embargo, en el segundo tercio del curso 2023, es el hecho en sí de estar aprendiendo lo que consideran lo mejor. Esto indica que aprecian el hecho de aprender por sí mismo y también se alinea con la idea de que el autoaprendizaje fomenta su motivación intrínseca.

En la parte negativa o mejor dicho de lo que ellos consideran que debería cambiarse, la cantidad excesiva de trabajo en casa es una constante que preocupa a un número considerable de

alumnos. Esto es más acusado en la primera parte del curso 2022, donde realmente hubo una exigencia mayor que en el curso siguiente. Si miramos los datos de horas dedicadas a la asignatura en casa del diario de aprendizaje, efectivamente se puede comprobar que de media en ese curso emplearon 94 horas en total en casa, mientras que en el curso 2023, este valor bajó a 78 horas. Esta diferencia de horas se debe sobre todo a los ajustes realizados en la planificación en base a la experiencia del primer año. Hay que destacar que en ambos casos, el número de horas está por debajo de las 105 horas que teóricamente les corresponden por los créditos asignados, pero es cierto que en el curso 22/23 algunos alumnos se situaron por encima de este valor.

La otra categoría más contestada es la que engloba diferentes medias propuestas para reducir el grado de autoaprendizaje, del tipo "que el profesor explique más". En el curso 23/24 se puede observar cómo en la primera encuesta más del 50% de los estudiantes prefieren que se reduzca el nivel de autoaprendizaje. Sin embargo, este número se reduce hasta el 20% en la segunda encuesta. Esto, unido al hecho de que en esta segunda encuesta un 30% de estudiantes contesta que no se debería cambiar nada en la asignatura, nos confirma que al principio muchos estudiantes tiene cierta resistencia a la nueva metodología pero conforme avanza el curso se vencen estas resistencias y ven los beneficios de hacer las cosas de otra forma. Esto, sin embargo, no se observa en el curso 22/23 donde incluso, donde el número de alumnos que desea reducir el nivel de auto aprendizaje crece en la segunda respuesta. Nos gustaría poder decir que esta mejor percepción de la metodología en el segundo curso se debe únicamente a la incorporación de la actividad de introducción al autoaprendizaje descrita anteriormente (ver II-A). Sin embargo, no puede atribuirse únicamente a esta actividad, ya que no ha sido el único cambio del curso. En particular la experiencia del curso anterior ha permitido una mejora importante en la planificación y el diseño de las actividades de este. Además, este curso se realizó un taller de trabajo en grupo que ha ayudado a mejorar el funcionamiento de los grupos de trabajo. También destacar que en un grupo de alumnos tan reducido, la influencia de las características personales individuales y de las interacciones que se generan, no pueden eliminarse del estudio. No obstante creemos que esta actividad, que recordemos fue sugerida por un alumno del curso anterior, ha ayudado a los alumnos a afrontar el reto con una actitud más positiva desde el principio. Esto sin duda ha contribuido a que la experiencia de aprendizaje sea, en general, más satisfactoria.

V. CONCLUSIÓN

El cambio de paradigma no está exento de problemas. Los alumnos se resisten, principalmente al principio, a que el profesor no explique, y se limite a ponerles actividades, resolver algunas dudas, y evaluar formativamente algunas de estas actividades. Su percepción de una elevada carga de trabajo también suele ser un problema, aunque esta se debe, sobre todo, a una mala distribución del trabajo en los grupos y a la adaptación al cambio de paradigma. Sin embargo, el nivel de motivación en clase es muy elevado y, la mayoría, terminan apreciando la metodología. Al final de curso una gran mayoría de los estudiantes reconoce que han aprendido mucho y algunos opinan que esta metodología debería aplicarse en otras asignaturas. La tasa de éxito de la asignatura es del 100% y la mayoría obtienen buenas calificaciones. Valorando todos los aspectos negativos y positivos creemos que la apuesta por una enseñanza centrada en el autoaprendizaje ha merecido la pena.

REFERENCES

[1] D. Boud, *Developing student autonomy in learning: 2. ed*, 2nd ed. London u.a: Kogan Page u.a, 1988.

[2] C. Chang-Tik, G. Kidman, and M. Y. Tee, *Collaborative active learning : practical activity-based approaches to learning, assessment and feedback*. Singapore: Palgrave Macmillan, 2022.

[3] J. Molleda, R. Usamentiaga, and J. Entrialgo, "Wikiquiz: Estrategia colaborativa para fomentar el aprendizaje autónomo del alumno," in *Jornadas de intercambio de experiencias en docencia universitaria en la Universidad de Oviedo*. Instituto Universitario de Ciencias de la Educacion de la Universidad de Oviedo, 2007, pp. 383–394.

[4] R. Rengel, M. J. Martin, and B. G. Vasallo, "Supervised coursework as a way of improving motivation in the learning of digital electronics," *IEEE Transactions on Education*, vol. 55, no. 4, pp. 525–528, Nov 2012.

[5] F. Shahnia and H. H. Yengejeh, "Various interactive and self-learning focused tutorial activities in the power electronic course," *IEEE Transactions on Education*, vol. 62, no. 4, pp. 246–255, 2019.

[6] F. Campos, J. Chato-Astrain, D. Sánchez, O. García-García, C. Blanco, D. Durand, M. Martín-Piedra, and M. Sánchez-Quevedo, "Implementación de un modelo de aula invertida para el autoaprendizaje de la ingeniería tisular en el grado de farmacia," *Educación médica*, vol. 24, no. 3, pp. 121–, 2021.

[7] A. Pérez de Albéniz Iturriaga, E. Escolano Pérez, M. T. Pascual Sufrate, B. Lucas Molina, and S. Sastre i Riba, "Metacognición en un proceso de aprendizaje autónomo y cooperativo en el aula universitaria," 2015.

[8] M. Valero and J. Domingo, *Técnicas de Aprendizaje Cooperativo y Aprendizaje Basado en Proyectos*, 2017.

[9] E. Aronson, N. Blaney, C. Stephin, J. Sikes, and M. Snapp, *The Jigsaw Classroom*. Beverly Hills, CA: Sage Publishing Company, 1978.

[10] C. Burch, "Logisim," 2014, http://www.cburch.com/logisim/ [Accedido:18/03/2024].

[11] D. Bañeres, I. Bermejo, R. Clarisó Viladrosa, J. Jorba, M. Serra, F. Santanach, and A. Rodríguez, "Entorno de soporte para el autoaprendizaje en el diseño de circuitos digitales," in *Actas de las XVII Jornadas de Enseñanza Universitaria de la Informática, JENUI 2011*, Sevilla, jul 2011.

[12] F. Corbera, "Procesador simple," 2020, https://www.ac.uma.es/corbera/procesadorsimple/web/index.html [Accedido:18/03/2024].

[13] M. Valero, "Challenges, difficulties and barriers for engineering higher education," *Journal of Technology and Science Education*, vol. 12, no. 3, pp. 551–566, 2022. [Online]. Available: https://www.jotse.org/index.php/jotse/article/view/1696

[14] A. Font Ribas, L. Caballol Angelats, M. Gual Dalmau, R. Guasch Martorell, S. Gómez Trinidad, J. Morales Barceló, C. Pont Viladomiu, and A. Enzler Fandós, "Las dificultades del aprendizaje autónomo en un contexto de ABP," *Revista de Educación y Derecho*, no. 01, jun. 2011. [Online]. Available: https://revistes.ub.edu/index.php/RED/article/view/2222

Aproximación al aprendizaje-servicio en asignaturas de grado de ingeniería

Manuel A. Perales Esteve
Dept. Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
mperales@us.es

Alfredo Pérez Vega-Leal
Dept. Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
alperez@us.es

Federico J. Barrero García
Dept. Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
fbarrero@us.es

***Abstract*— Se presenta una experiencia basada en aprendizaje-servicio aplicada en una asignatura del grado de ingeniería electrónica, robótica y mecatrónica. Se les propuso a los alumnos que orientaran el trabajo de la asignatura a alguna realidad social a la que pudiesen ayudar con dicho trabajo. La gran mayoría, aunque no era obligatorio, eligieron esta temática. Se exponen los resultados preliminares de estos primeros cursos.**

Keywords— Evaluación por proyecto, aprendizaje-servicio, sistemas digitales.

I. INTRODUCCIÓN

Entre la variedad de técnicas pedagógicas que florecen en los últimos años para renovar la docencia universitaria, resulta de interés especial el concepto de Apredizaje-Servicio (ApS) [1][2]. Este paradigma formativo une el desarrollo técnico del alumnado con el despliegue de una conciencia social que sitúe a las personas en su entorno, haciéndolos conscientes de las necesidades a las que pueden hacer frente como profesionales de la ingeniería, en este caso concreto. Esto puede ser de gran importancia, teniendo en mente que el perfil del alumno de carreras técnicas tiende a estar un poco separado de la realidad social circundante, por la mayor dificultad de los estudios, lo abstracto de muchas materias y otros factores que convendría analizar de manera más objetiva, sin dejarse guiar por los tópicos. Por otro lado, la metodología implica un uso de recursos más apropiado para trabajos fin de grado [3] que para asignaturas con carga teórica

En la experiencia que se presenta en este trabajo se ha hecho una aproximación tangencial al concepto de ApS, en una asignatura de la titulación de Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica (GIERM). Se expone el planteamiento realizado durante tres cursos a los alumnos, y la respuesta que ha tenido entre ellos, sacando finalmente alguna conclusión sobre cómo avanzar en este camino, y qué se puede aprovechar de la experiencia para otras materias.

En la siguiente sección se hace una presentación de la técnica pedagógica del Aprendizaje-Servicio, sus motivaciones y objetivos. Posteriormente, se expone el contexto docente de la asignatura donde se ha realizado esta experiencia, cuyo desarrollo se explica a continuación. Tras esto, en las secciones finales se exponen los resultados obtenidos y se extraen algunas conclusiones preliminares del trabajo, proponiendo algunas acciones para el futuro.

II. APRENDIZAJE-SERVICIO

La definición que hacen en [4] de Aprendizaje Servicio es: "Aprendizaje Servicio es una propuesta educativa que combina procesos de aprendizaje y de servicio a la comunidad en un solo proyecto bien articulado donde los participantes aprenden a trabajar en necesidades reales del entorno con el objetivo de mejorarlo". En ApS por tanto se desea hacer un desarrollo multidimensional, en el que no se realice únicamente un crecimiento en lo académico, en los conocimientos, sino que se produzca también un desarrollo personal y tenga un impacto real en el entorno. Las tres dimensiones, como aparecen en la Fig. 1, son importantes.

El ApS se ha venido usando en todos los niveles educativos, desde Educación Infantil[5]-[7] hasta en docencia universitaria [8][9]. Como muestra de la aplicación en el ámbito universitario, la Escuela de Ingeniería Informática de Sevilla realizó recientemente un proyecto de innovación docente en el que se estudió la viabilidad de aplicarlo en diferentes asignaturas de sus grados y masters y se implementó en algunas de ellas [10] .

Fig. 1. Dimensiones que se desarrollan en ApS

Las etapas que generalmente se consideran en la realización de ApS son:

A. *Identificar.*

En esta primera fase se hace una exploración del contexto social, se busca dónde se puede actuar de manera real, se contacta con asociaciones que ya estén trabajando en el terreno, y se hace un primer esbozo de la actuación

B. *Diseñar*

Como fruto de la primera parte, se hace el diseño del plan de acción concreto: qué aprendizajes son necesarios para llevar el proyecto pensado, qué actividades de campo son convenientes, qué dinámicas de trabajo se ven útiles.

C. *Actuar*

En la fase de realización del proyecto habrá que trabajar por un lado las *soft skills* del grupo, la sensibilización con la realidad en la que trabajar, la capacidad de trabajo en equipo,

etc. Además, habrá que acompañar al grupo de trabajo en la consecución del proyecto pensado, guiando la realización del mismo pero dejando autonomía. Será el grupo el que implante o desarrolle la acción de servicio diseñada.

D. Evaluar

Tras el cierre del proyecto, habrá que evaluar todos los aspectos del mismo: aprendizajes incorporados, desarrollo del proyecto, interacción de los miembros, etc. También es conveniente evaluar la experiencia en sí, para proponer acciones de mejora para siguientes ediciones.

E. Celebrar

Es importante cerrar el proyecto de una manera positiva, reconociendo el trabajo hecho y agradeciendo a los receptores de la acción que nos brinden la oportunidad de ser útiles.

En el ámbito de la docencia universitaria de ingeniería, puede resultar de especial interés desarrollar esta conciencia social y abrir a los estudiantes a la realidad de su entorno, dada la tendencia que pueden tener a vivir muy centrados en su propia circunstancia. Hay que reconocer, no obstante, que la inversión de tiempo y recursos necesarios para esto hace que sea difícil de implementar en asignaturas de grado, con muchos alumnos y objetivos docentes normalmente extensos.

La experiencia que se presenta aquí toma algunas características de ApS y la lleva a la práctica real en una asignatura que, como se verá, no está especialmente adaptada para ello.

III. Contexto Docente

La asignatura Sistemas Electrónicos para Automatización, de 4º curso de la titulación de GIERM tiene como objetivos docentes:

- Desarrollar la capacidad para analizar, diseñar y realizar un sistema electrónico destinado a un sistema automatizado.
- Adquisición de conocimientos básicos sobre sensores, sistemas de adaptación, transmisión de datos en entornos industriales, sistemas electrónicos para control avanzado y actuadores.
- Programación de sistemas embebidos basados en microcontroladores o microprocesador

Es una asignatura obligatoria de mención para los alumnos que cursan la especialidad de Robótica y Automática. El número de alumnos que la cursa oscila normalmente entre 30 y 50, que previamente han cursado más asignaturas en las que se ponen las bases del uso de sistemas digitales programables, y ya tienen un cierto bagaje en el diseño de sistemas completos.

Cuenta con 4.5 créditos, distribuidos en 15 clases teóricas de 1h40min y 10 prácticas de 2h. A su vez, la asignatura se compone de dos partes bien diferenciadas: en la primera de ellas se trabaja con un microcontrolador de gama alta (el TIVA TM4C1294 de Texas Instruments), con 1MB de flash y velocidad de 120MHz, entre otras características; En la segunda parte se usa como base una FPGA de altas prestaciones en la que se ensayan sistemas de soft-processors. En la primera parte de la asignatura, además de ver el manejo del microcontrolador, se estudian también el resto de elementos electrónicos que forman un sistema para automatización, como son los sensores, actuadores, sistemas de comunicación e interfaces (HMI). Esto hace que en apenas 7 clases se deban estudiar todas las partes del sistema, lo que lleva a un temario realmente comprimido en el tiempo.

Es en esta primera parte de la asignatura en la que se plantea la experiencia, como se detalla en el siguiente apartado. Resulta evidentemente imposible desarrollar una docencia basada en ApS, teniendo en cuenta la limitación temporal (7 semanas) y la gran carga de objetivos docentes a cubrir.

IV. Experiencia desarrollada

Dado el reducido número de alumnos y el contenido eminentemente práctico de la materia, desde el principio se ha realizado una evaluación basada en trabajos que los alumnos desarrollan. En concreto, en la primera parte de la asignatura los alumnos desarrollan un trabajo de tema libre en el que diseñan un sistema electrónico con las características de un sistema para automatización, usando para ello los elementos que se presentan en la asignatura (pantalla táctil, sensores, actuadores diversos, sistemas de comunicación y control a distancia…)

En este contexto, en el curso 2021-22 y siguientes, se ha ofrecido a los alumnos la posibilidad de orientar el tema del trabajo a algún fin social. Siendo conscientes de la imposibilidad de plantear una propuesta de ApS completa, en la que los alumnos contactaran con entidades de tercer sector, comprendiesen sus necesidades y tratasen de buscar algún caso en el que pudieran realizar algún proyecto de colaboración, se ha optado por esta mínima aproximación al concepto. En concreto, se les propone que se planteen si conocen alguna realidad (familiar o por conocimiento directo) en la que los dispositivos que se usan en la asignatura pudiesen mejorar la vida en el día a día de esas personas. Por ejemplo: personas mayores, con alguna diversidad funcional, niños en edad escolar con dificultades de aprendizaje, etc. Para ello, se usa el siguiente lema:

"¿Cómo podría un Sistema Electrónico para Automatización con los elementos que tenemos disponibles mejorar la vida de alguien de mi entorno?"

Se les ofrece también como orientación las siguientes propuestas: personas mayores, diversidad funcional, cuidado de la infancia, alfabetización digital, despertar el interés por las áreas STEM (Ciencias, tecnología, ingeniería y matemáticas, por sus siglas en inglés)…Aun así, se les insiste en que la temática del trabajo es voluntaria y no influye en la nota, para dejar libertad a la hora de seleccionar el proyecto concreto, que realizan normalmente por parejas.

Con esto se persigue un doble objetivo: por un lado despertar una cierta mirada hacia el entorno más cercano, haciéndoles caer en la cuenta de que la ingeniería puede orientarse hacia el desarrollo de soluciones a dichas necesidades, y que tienen el potencial de ayudar a mejorar las condiciones de vida de muchas personas; por otro, tratar de mejorar el grado de implicación de los estudiantes con los trabajos, en la medida en la que vean que lo que están haciendo no es meramente un ejercicio académico. Para evaluar el resultado de la experiencia, se pasó una encuesta a final del curso para intentar extraer alguna información sobre el grado de consecución de estos objetivos

Se comenzó con esta experiencia en el curso 2021-22, habiéndose repetido en los dos cursos siguientes, con resultados similares. En las tres ediciones la gran mayoría de alumnos se decantó por trabajos basados en el tema propuesto, aunque siempre ha habido al menos uno o dos trabajos de temática totalmente libre. Los trabajos presentados que responden al concepto de ApS se pueden clasificar según el área en que se desarrollan, dividiéndolos en las siguientes categorías:

- Ayuda a personas con discapacidad, ya sea motora o sensorial
- Problemas relacionados con personas de la tercera edad
- Ayuda para tratamiento de enfermedades diversas
- Ayuda específica para enfermedades degenerativas (Alzheimer, Parkinson…)
- Sistemas de apoyo a la enseñanza para niveles de primaria y secundaria

En la Fig. 2 se puede observar la distribución de trabajos estos años. Se puede ver que la gran mayoría de los trabajos estuvieron relacionados con la temática propuesta, y dentro de ésta se ha movido mayoritariamente en el sector sanitario, englobando los trabajos relacionados con mayores, enfermos y específicamente enfermedades neurodegenerativas. Viendo los resultados de la encuesta final se podrá identificar alguna causa de esta distribución.

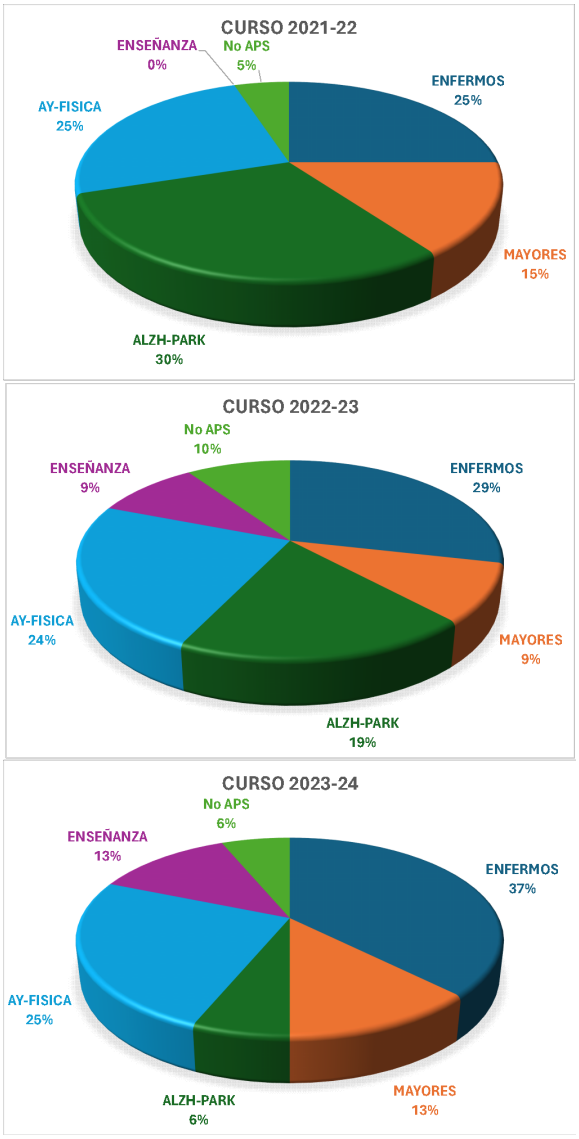


Fig. 2. Evolución de la distribución de trabajos a lo largo de los cursos 2021-22 y siguientes.

Como ejemplo de los trabajos presentados a lo largo de estos años podemos destacar:

- Finger Tracking: con un acelerómetro de 3 ejes acoplado a la mano, se genera un sistema de comunicación por palabras y con frases hechas. El movimiento se podría acoplar a cualquier miembro que se pudiese mover (mano, pie, cabeza…)
- Entrenador de escritura: programa que sirve para ejercitar la escritura, al estilo de los *cuadernillos Rubio*. Se escribe sobre la plantilla que aparece en la pantalla táctil y se generan puntuaciones según se haya hecho

La Fig. 3(a) muestra el manejo del *Finger tracking* en el que una persona, con los movimientos de la mano (o de cualquier extremidad con movilidad) puede ir eligiendo letra a letra o frases ya construidas, para comunicarse con su entorno. La Fig 3(b) por su parte muestra lo que se vería en la pantalla al entrenar la escritura, y la valoración que se consigue en cada caso, haciendo un buen seguimiento de la figura o no tanto.

V. Evaluación de la Experiencia

Tras estos años de realizar esta propuesta, se deseaba conocer el grado de aceptación por parte del alumnado, así como el nivel de implicación conseguido, para lo que se

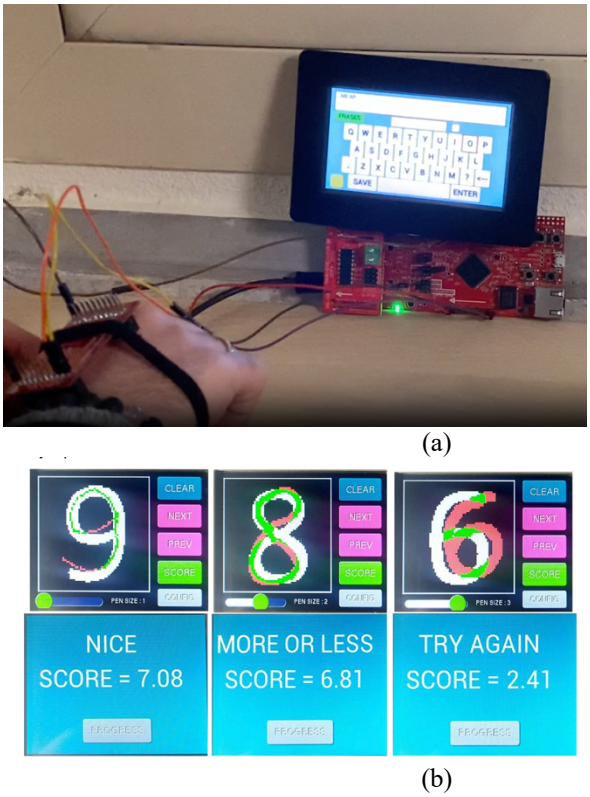


Fig. 3. Imágenes de trabajos presentados: (a) Finger tracking. (b) Entrenador de escritura (se muestran 6 pantallas, 3 de funcionamiento y las 3 de resultado correspondiente)

desarrolló una encuesta anónima a través de Google Forms [11] a los alumnos del curso 2023-24, en la que se indagó sobre estos aspectos.

La encuesta la respondieron 18 alumnos, algo más de la mitad de la clase. El número por tanto es poco representativo para sacar una información estadística fiable, pero puede mostrar tendencias generales, que pueden ser de interés.

En el propio cuestionario se les comenta a los alumnos cuál ha sido la idea al tratar de orientar los trabajos hacia el ApS, y se les explica detalladamente cómo sería una docencia realmente basada en ApS, para que sean conscientes también de lo lejos que se ha estado de la teoría.

Las dos primeras preguntas muestran una muy curiosa correlación. En la primera de ellas se les pide que indiquen si la idea del trabajo parte de una situación real que conocen (algún familiar o amigo cercano) o es totalmente arbitraria. El 72% contestó que se trataba de una situación real, conocida. La segunda pregunta incidía sobre si el hecho de orientar el proyecto a una necesidad social había influido en generar un mayor interés. En este caso, un 66% dijo que sí. En concreto, el 70% de los que reconocían que se basaba en un caso real contestaron que les había influido para poner mayor interés, mientras que entre los que contestaron que la situación era imaginaria, el interés bajó a un 60%.

Ante la pregunta de cuánto esfuerzo le habían dedicado, de 1 a 10, no resulta sorprendente que la totalidad de las respuestas se agrupen por encima del 7, siendo la mitad de ellas entre el 9 y el 10. Cuando se pregunta sobre la influencia que haya podido tener la orientación social del trabajo en el esfuerzo realizado, las respuestas se reparten más. La gran mayoría siguen estando en valores de 7 o más, pero aparecen varias respuestas que otorgan un 6, un 5 o incluso un 1 (una respuesta, en realidad).

Por otro lado, se les preguntó si les hubiera gustado contactar con alguna asociación para conocer de primera mano las necesidades que tuvieran y de qué manera pudiesen ellos colaborar. Aquí la respuesta fue abrumadoramente a favor, con casi el 90% de respuestas favorables.

Por último, se les planteó si les gustaría que en alguna asignatura, o en el trabajo fin de grado, se adoptara esta estrategia educativa, aunque eso conllevase un aumento del esfuerzo o de las horas dedicadas. El 77% de los alumnos respondieron favorablemente, con mayor interés por realizarlo en asignaturas que en el trabajo fin de grado. No obstante, hubo alguna discrepancia y alguna matización sobre la necesidad de reducir materia en ese caso.

En la Fig. 4 se presentan gráficamente algunos de estos resultados, aunque se muestran de manera agregada. Accediendo a las respuestas individuales y comparando los valores se obtienen los otros datos antes reseñados.

VI. Análisis de los resultados

Como se ha comentado anteriormente, es complicado intentar extraer algún resultado a partir de un conjunto de datos tan exiguo en el tiempo y tan reducido en la muestra. No obstante, se propone el siguiente análisis de los resultados obtenidos:

A. Selección de temáticas de trabajos

Parece que los alumnos muestran un interés algo mayor en caso de que el trabajo esté relacionado con alguna situación que conozcan personalmente. Esto se ve en la tendencia a

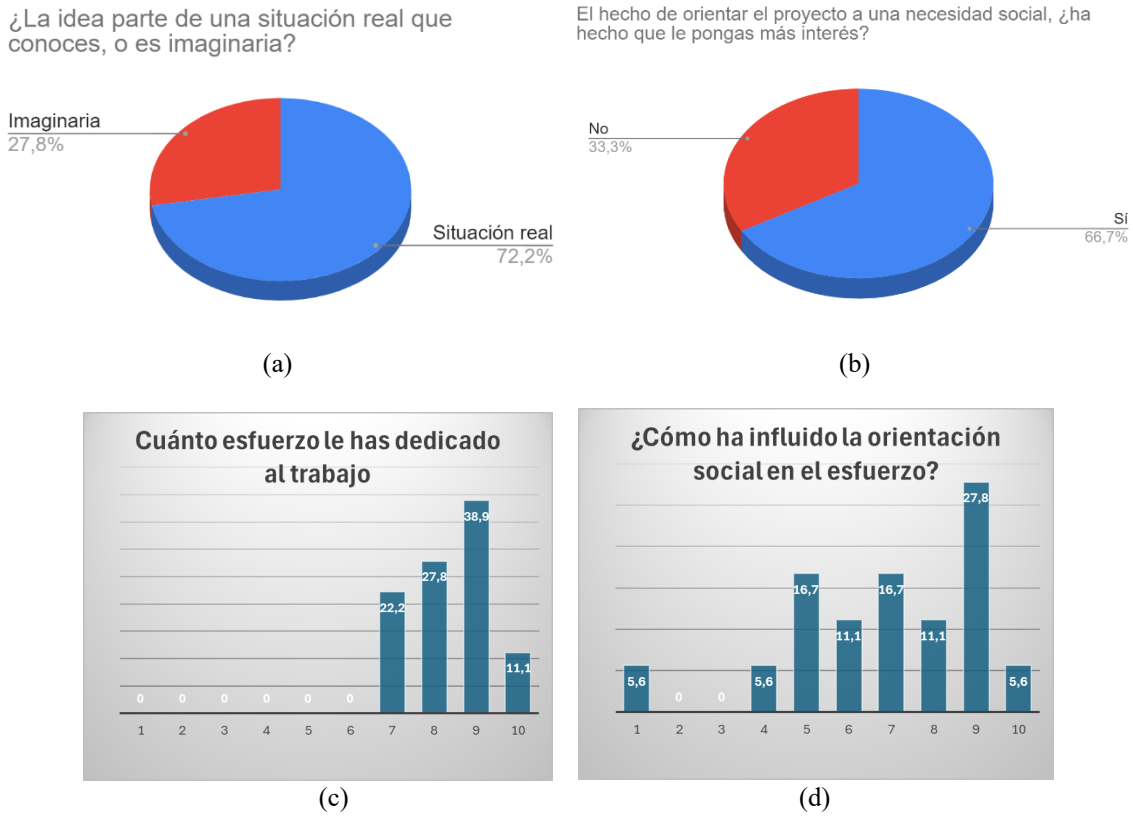


Fig. 4. Resultados obtenidos en la encuesta: (a) Situación real o imaginaria. (b)Interés mejorado por necesidad social (c) distribución porcentual de alumnos según el esfuerzo dedicado (d) distribución porcentual de alumnos según la influencia de la orientación social en el esfuerzo

elegir trabajos relacionados con la tercera edad o la enfermedad, que son escenarios que pueden tener cerca con relativa frecuencia. Sin embargo no se ha visto un interés similar por la posibilidad de desarrollar trabajos que pudieran tener que ver con otras realidades (pobreza, exclusión social, violencia de cualquier tipo…)

B. Mejora de la implicación

Uno de los objetivos perseguidos con ApS es conseguir una mayor implicación de los alumnos con su aprendizaje, poniéndoles en la situación de ayudar a alguien con el fruto de su trabajo. En este sentido, dado lo sintético de la experiencia, este objetivo sería poco realista pensar que se pueda conseguir, pero parece que al menos han ganado un poco de motivación gracias a esto. El hecho de ponerle "nombre y apellidos" al trabajo, al hacerlo pensando en alguien cercano (un abuelo, un pariente o conocido) parece que, según la percepción de los alumnos, les ha podido influir positivamente a la hora de implicarse.

C. Valoración de la experiencia

A la vista de los resultados, parece que los alumnos están en general contentos con el desarrollo de la experiencia, y valoran de forma positiva el enfoque de los trabajos en algo relacionado con el servicio. También parecen dispuestos a aplicar ApS en otras asignaturas, si bien les preocupa un tanto el incremento de trabajo que piensan que puede acarrear.

VII. Conclusiones y futuras líneas

El ApS como dinámica de trabajo parece especialmente adecuado para asignaturas con carga práctica, de últimos cursos y con capacidad de realizar proyectos reales. En este sentido, la asignatura en la que se está aplicando sería idónea, pero la organización docente que actualmente se tiene, en la que la asignatura se divide a su vez en dos mitades bastante estancas, dificulta mucho su implementación real, por el margen de tiempo tan estrecho que se maneja.

No obstante, aun a pesar de no poder desarrollar un ApS en toda su dimensión, el mero hecho de hacerles pensar a la hora de plantear un trabajo de tema libre en que ese trabajo podría ser de utilidad para personas con alguna necesidad específica, puede tener un efecto beneficioso en el desarrollo de una cierta conciencia ciudadana y de ayuda ante la necesidad, que es una de las dimensiones que se intentan desarrollar en el ApS.

Sería viable, y se intentará implementar próximamente, que al menos se tuviese una sesión (utilizando una hora de prácticas) con representantes de algunas organizaciones que pudieran venir e interactuar con ellos, planteándoles posibles necesidades a cubrir, de manera que no parta únicamente de sus conocimientos sino que estén abiertos a otras posibilidades.

Agradecimientos

Este trabajo es parte de los proyectos TED2021-129558B-C22 (financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación Agencia Estatal de Investigación de España MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y también por Unión Europea NextGenerationEU/PRTR) y PID2021-125189OB-I00 (financiado por el proyecto MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE Ministerio de Ciencia e Innovación, Agencia Estatal de Investigación de España y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional).

Referencias

[1] Puig, J.M, Palos, J. (2006) "Rasgos pedagógicos del aprendizaje-servicio". Cuadernos de Pedagogía, 357, 60-63

[2] Rodríguez Gallego, M.R. (2014). "El Aprendizaje-Servicio como estrategia metodológica en la Universidad". Revista Complutense de Educación, 25 (1), 95-113

[3] Plaza, I, Medrano, C, et al (2018) "Aprendizaje-servicio como innovación estratégica en la enseñanza de la electrónica" Actas del Congreso TAEE 2018, Tenerife. 542-547

[4] Puig, J.M., Batlle, R., Bosch, C. Palos, J. (2007) "Aprendizaje servicio.: Educar para la ciudadanía. Ed. Octaedro. ISBN: 8480639016

[5] Oliva, S. "Incluyéndo-T" Revista CONVIVES, Nº36, 29-32

[6] https://eeijuliocesar.com/aps/ consultado a 22/03/24

[7] Paredes, Domingo Mayor. "Aprendiendo a Cuidar-nos, una experiencia de Aprendizaje-Servicio virtual en educación infantil." EDUTEC. Revista electrónica de tecnología educativa 78 (2021): 71-84.

[8] Redondo Corcobado, Paloma, and Juan Luis Fuentes Gómez-Calcerrada. "La investigación sobre el Aprendizaje-Servicio en la producción científica española: una revisión sistemática." Revista complutense de educación (2020).

[9] Rodríguez Gallego, Margarita R. "El Aprendizaje-Servicio como estrategia metodológica en la Universidad." Revista Complutense de Educación, 25 (1), 95-113. (2014).

[10] https://www.informatica.us.es/index.php/noticias/43-anuncios/3558-exposicion-una-experiencia-de-aprendizaje-servicio-aps-en-la-etsii, consultado a 22/03/24

[11] https://docs.google.com/spreadsheets/d/1QzMXGWqmtTRLgxyPEf8seEmSUEbraom2Mx-bLAbHxOA/edit?usp=sharing Resultados de las encuestas realizadas.

Incorporación de una Línea de Ensamblaje de PCBs en la Educación de Ingeniería Electrónica

1st Jorge Herrera Santos
Dpto. de Física Aplicada.
ETS de Ingeniería Industrial de Béjar
Universidad de Salamanca
Béjar (Salamanca), Spain
jorgehsmp@usal.es

2nd Esteban Sánchez Hernández
Dpto. de Física Aplicada. Área de Tecnología Electrónica
ETS de Ingeniería Industrial de Béjar
Universidad de Salamanca
Béjar (Salamanca), Spain
esh@usal.es

***Abstract*—Este trabajo detalla la integración de una línea de ensamblaje de componentes electrónicos en la asignatura "Tecnología de Producción y Fabricación" del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática. Se describe el proceso de incorporación de los equipos clave: serigrafía semiautomática, pick & place, y horno de soldadura por reflujo. Se analiza el impacto de esta integración en el aprendizaje práctico de los estudiantes, resaltando cómo la experiencia directa con tecnología avanzada enriquece su comprensión teórica y habilidades prácticas en fabricación electrónica.**

***Index Terms*—Ensamblaje Electrónico, Educación en Ingeniería, Tecnología de Producción, Serigrafía, Pick & Place, Soldadura.**

I. Introducción

La educación moderna en ingeniería debe lograr un equilibrio entre los enfoques teóricos y prácticos, que permitan a los estudiantes aplicar conceptos teóricos a situaciones del mundo real [1]. Este enfoque práctico no sólo mejora la comprensión de los estudiantes sino que también desarrolla habilidades cruciales como el pensamiento crítico, la resolución de problemas y la capacidad de trabajar en proyectos complejos, que son esenciales en el campo profesional de la ingeniería.

La integración de tecnología de ensamblaje de componentes electrónicos en la educación de ingeniería representa un desafío y una oportunidad [2]. El fácil acceso a software de diseño de circuitos electrónicos (PCB) tanto open-source (como KiCAD) como profesional en sus versiones educativas (Altium Designer, Eagle...), junto con el bajo coste de los servicios de fabricación de PCB online (servicios como PCBWAY, JLCPCB, pcbwhiz, Eurocircuits...) y la cada vez más asequible (y menos voluminosa) maquinaria de ensamblaje de PCB para producciones de pequeños lotes, representa un cambio revolucionario en el campo de la enseñanza de ingeniería electrónica.

Esta combinación de recursos hace que la fabricación de productos electrónicos sea más accesible que nunca para estudiantes y educadores, permitiendo la implementación de una educación práctica actualizada con la realidad profesional. Ahora los estudiantes pueden llevar sus diseños desde el concepto a la realidad física con una inversión y tiempo mínimos, experimentando directamente con el proceso de diseño, fabricación y ensamblaje de circuitos electrónicos. Esto no solo enriquece el aprendizaje técnico, brindando una valiosa experiencia práctica, sino que también prepara a los futuros ingenieros para los desafíos del mundo real, promoviendo una educación integral alineada con las necesidades de la industria contemporánea.

El presente artículo propone un caso de estudio en el que se introduce una línea de ensamblaje moderna en el currículo de la asignatura "Tecnología de Producción y Fabricación", que se imparte en el 4º semestre del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática en la ETS de Ingeniería Industrial de Béjar (Universidad de Salamanca) [3]. Este trabajo contrasta la metodología actual con la metodología propuesta (secciones II y IV), se presentan los materiales utilizados (sección III) y se extraen conclusiones y futuras líneas de trabajo (sección V).

II. Metodología original

La asignatura "Tecnología de Producción y Fabricación" actualmente se estructura en una combinación de contenidos teóricos y prácticos diseñados para proporcionar a los estudiantes una comprensión profunda de los componentes, técnicas de fabricación y consideraciones de calidad y fiabilidad en los equipos electrónicos. [4]

El marco teórico se divide en cuatro bloques principales.

- El primer bloque abarca los componentes pasivos, detallando la fabricación y aplicaciones de resistores fijos, variables y dependientes, así como de condensadores e inductores, fundamentales en cualquier dispositivo electrónico.
- El segundo bloque se enfoca en las técnicas de fabricación de circuitos electrónicos, explorando los procesos involucrados en la creación de circuitos impresos, híbridos e integrados.
- En el tercer bloque, se extiende el estudio a otros componentes electrónicos y se introduce el diseño térmico de componentes, aspecto crítico para el rendimiento y la fiabilidad de los dispositivos electrónicos.
- El cuarto y último bloque se dedica a la calidad y fiabilidad en los dispositivos electrónicos, ofreciendo una visión completa sobre los estándares y prácticas para asegurar dispositivos duraderos y eficaces.

En el ámbito práctico, la asignatura está diseñada para complementar y consolidar los conocimientos teóricos mediante una serie de actividades prácticas secuenciales. Comienza con una práctica inicial que introduce a los estudiantes en los fundamentos del programa de diseño de circuitos electrónicos OrCAD y sus herramientas, preparándolos para las sesiones prácticas más complejas. Las prácticas subsiguientes se dividen en dos categorías principales: creación y simulación de circuitos. Estas actividades permiten a los estudiantes aplicar directamente los conceptos aprendidos en la teoría, diseñando y simulando circuitos electrónicos en un entorno controlado. La secuencia culmina con una práctica dirigida de contenido libre, donde los estudiantes tienen la oportunidad de desarrollar un proyecto propio, poniendo a prueba su creatividad, conocimientos y habilidades técnicas en un contexto que simula desafíos reales de la ingeniería electrónica.

III. Materiales utilizados

En esta sección se describe el software, los componentes y la maquinaria que ha sido utilizada en la metodología propuesta:

A. Software

- Altium Designer (versión estudiantes) [5]: Altium Designer es un software de diseño de circuitos impresos (PCB) y sistemas electrónicos integrados. Destaca por su amplia gama de herramientas, su interfaz intuitiva y la facilidad de uso. Este software facilita la creación de diseños complejos mediante recursos avanzados, como la verificación de reglas de diseño en tiempo real, el control de impedancias y la simulación de circuitos. Dispone de un entorno de trabajo colaborativo en la nube, clave para realizar tareas de revisión y seguimiento del trabajo realizado por los alumnos.

B. Componentes

- Placas de Circuito Impreso: las PCBs se adquieren con el servicio online PCBWay [6] con las siguientes características, que se incluyen dentro de la opción económica de fabricación:
  - Grosor: 1.6 mm
  - Capas: 2 capas
  - Material: FR4-TG 150-160
  - Dimensiones: 43.2 mm x 18 mm
  - Cantidad: 10 ud
  - Min pista/espacio: 6/6 mil
  - Min tamaño agujero: 0.3 mm
  - Máscara de soldadura / serigrafía: a gusto del alumno
- Stencil: el stencil se adquiere con el servicio online PCBWay con las siguientes características:
  - Plantilla SMD con marco
  - Lado de la plantilla: superior + inferior (en una única plantilla)
  - Grosor: 0.10 mm
- Pasta de soldadura: para la soldadura de los componentes electrónicos a la PCB se ha hecho uso de la pasta de soldadura SMD291SNL250T3, de 250g, adquirida en Mouser Electronics [7]. Esta pasta de soldadura no contiene plomo, lo que la hace una opción segura y conforme a las regulaciones ambientales actuales que promueven la reducción del uso de materiales tóxicos en la electrónica. Debido a la poca cantidad de pasta utilizada durante el proceso de ensamblaje, esta puede ser utilizada en cursos posteriores.
- Componentes electrónicos: los componentes electrónicos son adquiridos en Mouser Electronics. En la Tabla I se muestran los componentes utilizados, su valor; e información relacionada con el esquema y el diseño de la PCB (Referencia, posición X e Y, rotación y cara de montaje).

TABLE I
Tabla de componentes electrónicos

Componente	Valor	Ref.	Pos.X*	Pos.Y*	Rot.	Cara
Condensador CL10B104JO8NNN	100 nF	C1	7,23	3,02	180º	BOT
		C4	18.41	5.58	180º	BOT
		C6	5.08	9	90º	BOT
		C9	31.24	14.09	0º	BOT
Condensador GRM188R61E105K	1 uF	C3	21.08	5.58	180º	BOT
		C7	29.5	9.2	0º	BOT
		C8	29	3.5	0º	BOT
Condensador T491A475K016AT	4.7 uF 16V	C2	2.79	9	90º	BOT
		C5	32.51	11.5	0º	BOT
Pulsador EVP-AWED2A	-	SW1	26	9	270º	TOP
Array resistencias CAY16-102J4LF	1 K	RP1	25.2	6	180º	BOT
		RP2	25.2	12	0º	BOT
Conector Mini USB 651305142821	-	J3	4.6	9	270º	TOP
Oscilador CSTCE16M0V53-R0	16 MHz	Y1	20.23	13.04	315º	TOP
Hilera de pines "a diseñar"	1x15 2.54mm	J1	39.38	16.73	270º	TOP
		J2	39.38	1.27	270º	TOP
Conector ISCP TSW-103-08-L-D	2x3 2.54mm	J4	40.5	9	90º	TOP
LED SML-LXT0805IW-TR	LED Rojo	RX	31	10.5	0º	TOP
LED APT2012MGC	LED Verde	TX	31	13.5	180º	TOP
LED APT2012MGC	LED Verde	TX	31	13.5	180º	TOP
		PWR	31	7.5	0º	TOP
FT232RL	USB-UART	IC1	11.86	9	90º	BOT
Fusible MF-FSMF050X-2	6 V, 1 A	F1	3.93	4.44	0º	BOT
LED LTST-C170YKT	LED Amarillo	L	31	4.5	180º	TOP
LM1117IMPX-5.0	Reg. 5 V	IC2	33	6.5	180º	BOT
ATmega328P-AU	uC	IC3	17.72	9	225º	TOP
MBR0520LT1G	Diodo	D1	28.45	12.45	90º	BOT

*Posición del componente en la PCB en milímetros.

C. Maquinaria

El montaje de los componentes se lleva a cabo utilizando la línea de ensamblaje de PCBs de la ETSII de Béjar:

- Máquina de serigrafía TWS Automation SR 2700 [8]: esta máquina aplica de forma semi-automática de pasta

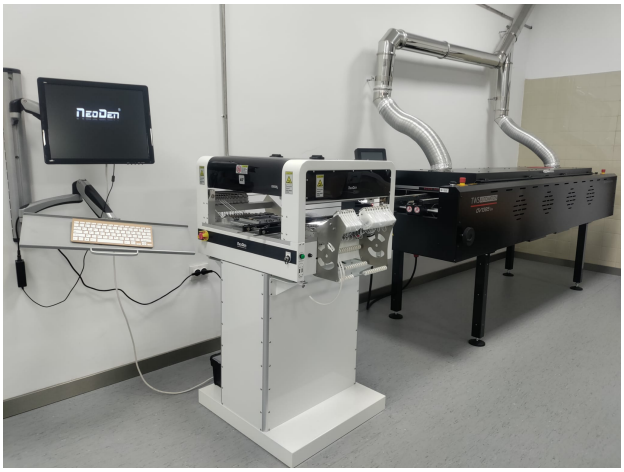


Fig. 1. Línea de ensamblaje de PCBs de la ETSII de Béjar

de soldadura en la PCB y es ideal para la producción de placas de pequeños lotes. Este equipo, caracterizado por su precisión, se integra adecuadamente en líneas de ensamblaje para facilitar la colocación uniforme y precisa de la pasta de soldadura, una tarea crítica que influye directamente en la calidad y fiabilidad de las conexiones soldadas.

- Máquina Pick&Place NEODEN 4 [9]: esta máquna está especialmente diseñada para pequeñas y medianas series de producción. Se caracteriza por su capacidad para colocar con alta precisión una amplia variedad de componentes electrónicos sobre placas de circuito impreso (PCB), desde componentes de tamaño estándar hasta microcomponentes y BGA, gracias a su sistema de visión artificial que asegura una colocación precisa y rápida. Su diseño compacto y eficiente la hace ideal para entornos de producción con espacio limitado, ofreciendo una solución costo-efectiva para startups y laboratorios de I+D que buscan optimizar sus procesos de prototipado y producción de series cortas.
- Horno de soldadura por reflujo TWS 1385 EVO [8]: adecuado para entornos de producción de pequeña y mediana escala. Este horno se distingue por su capacidad para garantizar una soldadura uniforme y de alta calidad al disponer de 4 zonas de calentamiento configurables. Su intuitiva interfaz de usuario hace que el horno sea fácil de integrar en líneas de producción y sencillo de operar.

IV. Innovación Metodológica

La innovación metodológica consiste en enfocar la asignatura de forma particular en el diseño, desarrollo, fabricación y ensamblaje de una placa de desarrollo del microcontrolador ATMEGA328P, basada en la placa Arduino Nano [10], de código y hardware abierto. Esta placa podrá ser utilizada por el estudiante en posteriores asignaturas orientadas a la enseñanza de microcontroladores y proyectos electrónicos; así como en trabajos de fin de grado.

Este trabajo se articula alrededor de tres pilares fundamentales, tal y como se muestra en “Fig. 2”, que constituyen el núcleo del currículo de la asignatura: Diseño de Placas de Circuito Impreso, Fabricación y Ensamblaje de Placas de Circuito Impreso y Procesos para el Control de Calidad.

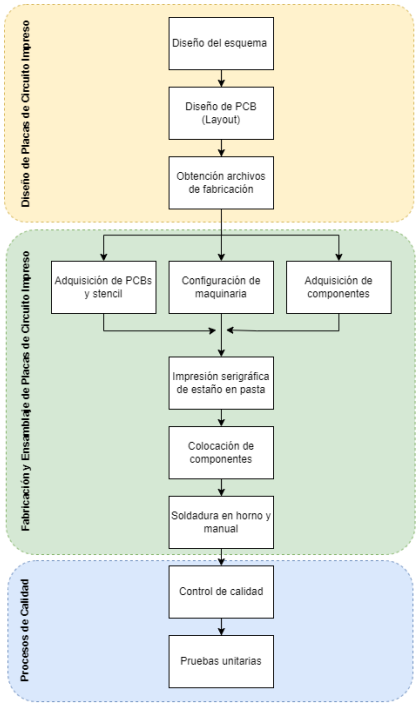


Fig. 2. Fases del proceso de diseño, desarrollo y fabricación de una PCB

Los contenidos prácticos de la asignatura se enriquecen y contextualizan a través de breves segmentos teóricos que facilitan la comprensión y asimilación del proceso de aprendizaje por parte del estudiante. Estas píldoras teóricas son introducidas antes de cada componente práctico. A continuación, se detallan las fases que constituyen cada pilar, así como los objetivos que se persiguen con esta innovación metodológica:

A. *Objetivos*

En el desarrollo de la asignatura ”Tecnología de Producción y Fabricación”, el objetivo principal es proporcionar a los estudiantes un conocimiento completo y aplicable de los procesos de diseño y fabricación de placas de circuito impreso, a través de una experiencia educativa práctica y directa. Este aprendizaje práctico tiene múltiples metas específicas, que incluyen:

- Desarrollo de habilidades de diseño electrónico: asegurar que los estudiantes dominen el uso de software de diseño electrónico avanzado y comprendan los principios fundamentales del diseño de esquemas y layouts de PCB.
- Comprensión de procesos de fabricación: proporcionar conocimiento profundo sobre las etapas de fabricación de una PCB, desde la adquisición de componentes y materiales hasta las técnicas de ensamblaje y soldadura, promoviendo la familiarización con herramientas y maquinaria industrial actual.

- Experiencia práctica en ensamblaje: ofrecer a los estudiantes la oportunidad de participar activamente en el ensamblaje de una PCB, poniendo en práctica los conceptos aprendidos y desarrollando competencias prácticas que son cruciales en la industria de la ingeniería electrónica.
- Aplicación de control de calidad: enseñar a los estudiantes los estándares de calidad y las pruebas unitarias necesarias para garantizar la creación de productos electrónicos fiables y funcionales.
- Innovación y creatividad: fomentar la innovación y la creatividad, permitiendo a los estudiantes experimentar con el diseño y la personalización de PCBs.
- Estimulación de la curiosidad y la innovación continua: el objetivo final es que al concluir la asignatura, los estudiantes no solo hayan adquirido conocimiento y experiencia, sino que también se encuentren inspirados y estimulados a continuar aprendiendo y explorando. Al proporcionarles una placa compatible con la plataforma Arduino, se les invita a sumergirse en la vasta comunidad de desarrollo de Arduino con proyectos propios.

B. Diseño de Placas de Circuito Impreso

El primer pilar, Diseño de Placas de Circuito Impreso, aborda la creación del esquema eléctrico y el diseño físico de la PCB utilizando el software Altium Designer. Esta fase es crítica para asegurar que todas las conexiones eléctricas se representen con precisión y que el diseño final sea óptimo tanto en términos de funcionalidad como de fabricabilidad. Se enfatiza en la importancia de una planificación meticulosa y la selección de componentes, culminando con la preparación de archivos de fabricación precisos que servirán de guía para la producción de la PCB.

- **Diseño del esquema**: el diseño del esquema está basado en el esquema proporcionado por la plataforma Arduino para su placa Arduino Nano. Se introduce cada uno de los componentes gracias a sus datasheets, su función dentro del circuito y las representaciones gráficas de estos: partes, pines, conexiones eléctricas, símbolos de alimentación, etiquetas, pares diferenciales...
  Durante esta fase el estudiante aprende a añadir al proyecto las librerías de componentes, tanto de esquemas como de huellas, creando sus propios componentes. También se usan componentes prediseñados, tanto de la librería de fabricantes que proporciona Altium, como de repositorios de uso gratuito (Ultra Librarian, SamacSys...).
  En el circuito se identifican 4 partes principales:
  - Circuito del microcontrolador: el componente principal de la PCB es el microcontrolador de 8 bits ATMega328P-MUR, del fabricante Microchip. Además, el circuito del microcontrolador incorpora los componentes necesarios para su correcto funcionamiento (oscilador de cristal, condensadores de desacoplo) y botón de reset.
  - Circuito para la comunicación USB: se compone de un controlador USB a UART (FT232RL) y conector USB Mini. Permiten una comunicación USB del microcontrolador con un equipo externo, ya sea para llevar a cabo operaciones de grabado del programa o transmitir información de forma serial.
  - Circuito de alimentación: un regulador de tensión lineal (LDO) LM1117 regula la tensión del pin VIN de 15 V (máx.) a 5 V y proporciona una corriente de salida de 800 mA. Un diodo y un fusible protegen la entrada de alimentación de vía USB.
  - LEDs de indicación: la placa dispone 4 LEDs con los que mostrar el estado de la misma: uno para indicar que está correctamente alimentada (ON), dos para indicar la transmisión de datos vía USB (TX y RX) y uno que puede ser controlado desde el pin D13 del microcontrolador (L).
  - Conectores: la placa dispone de un conector de 2x3 pines que da acceso al puerto ICSP (utilizado para grabar el microcontrolador o dar acceso al bus SPI) y dos hileras de 15 pines con las que proporcionar un fácil acceso a los pines del microcontrolador y de tensión.

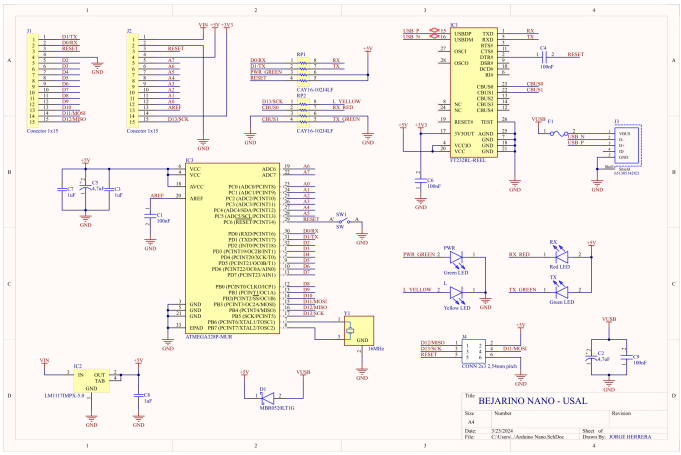


Fig. 3. Esquema del circuito basado en la placa Arduino Nano

- **Diseño de la PCB**: en el diseño de la PCB, se enseñan conceptos fundamentales que abarcan la disposición óptima de los componentes sobre la placa, las conexiones eléctricas mediante pistas, vías y planos; el apilamiento de capas, la consideración de reglas y restricciones que garanticen la funcionalidad y fiabilidad del circuito; así como las técnicas de fabricación de este. Se profundiza en técnicas de diseño para minimizar interferencias electromagnéticas (EMI) y asegurar la integridad de la señal, junto con el uso de prácticas de diseño térmico que contribuyen a una disipación de calor eficiente. Para optimizar el proceso de ensamblaje, se establecen ciertas restricciones respecto a las dimensiones de la PCB y la colocación de los componentes. Esta estrategia garantiza que tanto el stencil, utilizado para aplicar la pasta de

soldadura, como el programa de la máquina Pick&Place sean el mismo y puedan ser utilizados por todos los estudiantes.

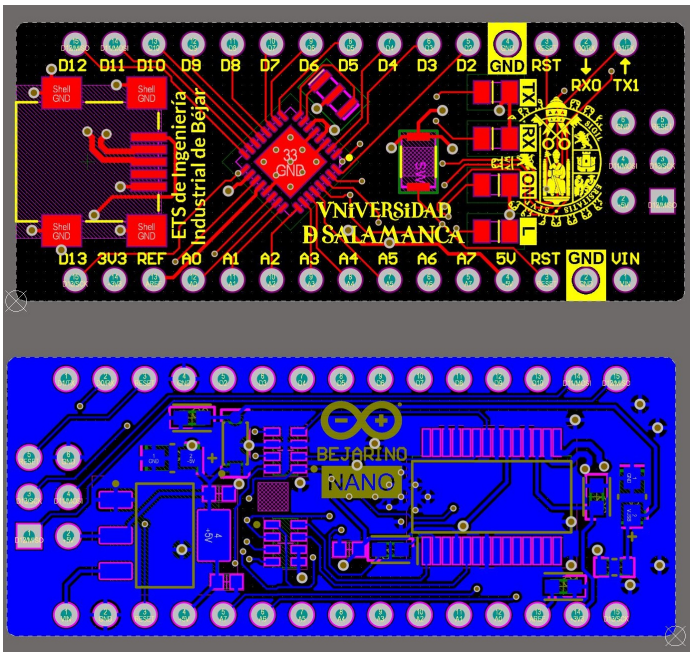


Fig. 4. Diseño de las capas TOP y BOTTOM

Los estudiantes tienen libertad para personalizar la serigrafía de sus placas de circuito impreso, dando la posibilidad de incorporar elementos de diseño que las identifiquen de manera única. Esta flexibilidad en el diseño no solo fomenta la creatividad y la expresión individual, sino que también permite a los estudiantes experimentar con técnicas de marcado y branding en el contexto de la fabricación electrónica, aprendiendo además a equilibrar la estética y la funcionalidad.

Por último, se ejecuta la herramienta "Design Rule Checker", con la que validar que todas las conexiones se han realizado correctamente y que las reglas establecidas se han respetado.

- **Obtención de los archivos de fabricación**: la última de las fases del diseño de placas de circuito impreso consiste en la obtención de los archivos de fabricación con los que poder realizar las órdenes de compra de las PCBs, el stencil y los componentes electrónicos. Para ello, se siguen los requisitos del fabricante de PCBs a la hora de obtener los archivos Gerber y de taladrado [11]. También se obtiene el listado de materiales (BOM) con el que poder realizar la compra de los componentes necesarios para el montaje de la PCB.

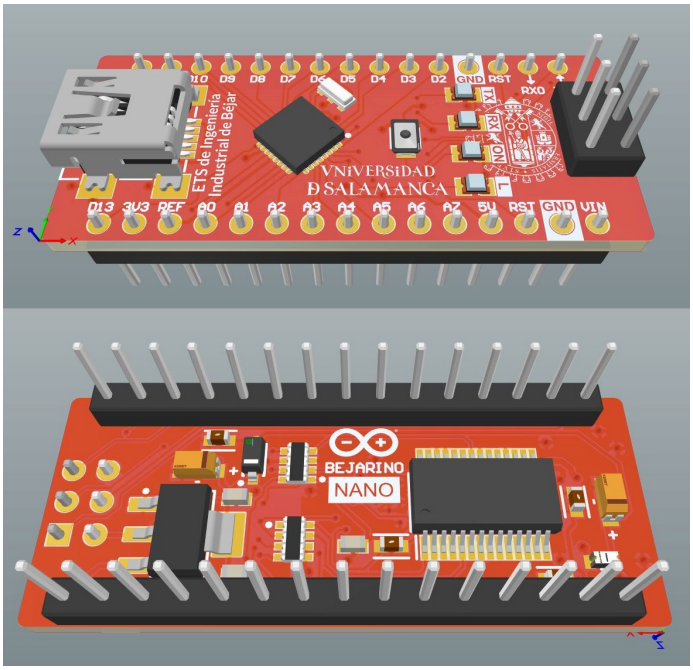


Fig. 5. Vista 3D de la PCB

C. *Fabricación y Ensamblaje de Placas de Circuito Impreso*

El segundo pilar, Fabricación y Ensamblaje de Placas de Circuito Impreso, se centra en el proceso de materializar el diseño en un producto físico. Desde la adquisición de componentes y PCBs hasta la configuración de la maquinaria necesaria para el ensamblaje, esta fase cubre aspectos críticos como la impresión serigráfica de pasta de soldadura, la colocación precisa de componentes y la soldadura eficaz mediante técnicas de horno y manual. Esta etapa es vital para transformar los diseños teóricos en prototipos funcionales o productos listos para el mercado.

- **Adquisición de componentes**: esta fase requiere la selección y compra de todos los componentes electrónicos necesarios para el ensamblaje de la PCB. Los estudiantes aprenden a identificar proveedores, comprender las hojas de datos de los componentes, y considerar aspectos como la disponibilidad, el costo y las especificaciones técnicas. Este paso es crucial para garantizar que los componentes adecuados estén disponibles en el momento del ensamblaje. Todos los componentes, se adquieren en formato de cinta para que puedan ser utilizados de forma automática por los alimentadores de la Pick&Place; y son comprados bajo un único pedido, de forma que los costes unitarios se reducen drásticamente.
- **Adquisición de PCB y stencil**: tras finalizar el diseño de la PCB, se procede a ordenar la fabricación de las placas y el stencil necesario para aplicar la pasta de soldadura. Esta etapa enseña a los estudiantes a elegir entre diferentes servicios de fabricación basados en criterios como calidad, tiempo de entrega y costo, y a entender la importancia del stencil en el proceso de ensamblaje de

componentes SMD. El stencil es adquirido con marco de forma que sea compatible con la impresora de serigrafía TWS Automation SR 2700. Las PCBs y el stencil son adquiridos en el mismo pedido para compartir los gastos de envío.

- **Configuración de maquinaria**: una vez que los componentes, PCBs y stencil se han pedido (y mientras estos llegan), se avanza con la configuración de la maquinaria que compone la línea de ensamblaje. Previamente, se introduce de forma teórica tanto el proceso de fabricación y ensamblaje en la industria, como las máquinas que componen la línea de ensamblaje de la ETS de Ingeniería Industrial de Béjar. Los estudiantes aprenden a ajustar estos equipos según las especificaciones del proyecto, lo que implica comprender los parámetros técnicos de cada máquina y cómo estos afectan la calidad del ensamblaje final. También se avanza en la generación de los programas que serán ejecutados por cada máquina, que terminan de definirse una vez llegan los pedidos.
- **Impresión serigráfica de estaño en pasta**: utilizando el stencil adquirido, se aplica pasta de soldadura sobre la PCB en las áreas designadas para los componentes con la TWS 1385 EVO. Esta técnica requiere precisión para asegurar una cobertura adecuada y evitar defectos como puentes de soldadura o soldaduras insuficientes. Los estudiantes practican la aplicación uniforme de la pasta, aprendiendo a manejar las variables que influyen en este proceso. Previamente, en la fase de configuración, se definen las pasadas que realiza la espátula que reparte la pasta de soldadura (ciclo simple o doble) y se ubica con precisión la PCB bajo el stencil gracias al sistema de cámaras y a los mecanismos de alineado fino que dispone la máquina.
- **Colocación de componentes**: con la pasta de soldadura ya aplicada, se colocan los componentes electrónicos sobre la PCB con la Pick&Place Neoden 4. Se enfatiza en la importancia de la precisión en la colocación y orientación de los componentes. Previamente, en la fase de configuración, se definen el número y tamaño de los alimentadores que serán utilizados en función de los componentes, la posición de cada componente en la PCB y la orientación de esta mediante los puntos fiduciales.
- **Soldadura en horno y manual**: finalmente, las PCBs se someten a un proceso de soldadura para fijar permanentemente los componentes a la placa en el horno de reflujo TWS 1385 EVO. Previamente, en la fase de configuración, se define la velocidad de avance de la cinta transportadora del horno, así como la temperatura de cada fase en función de los datos aportados por los fabricantes de los componentes en el datasheet. Los estudiantes también aprenden técnicas de soldadura manual para realizar retoques y para soldar las hileras de pines y el conector ICSP. Este paso consolida el ensamblaje de la PCB, y se discuten métodos para garantizar una soldadura uniforme y de alta calidad.

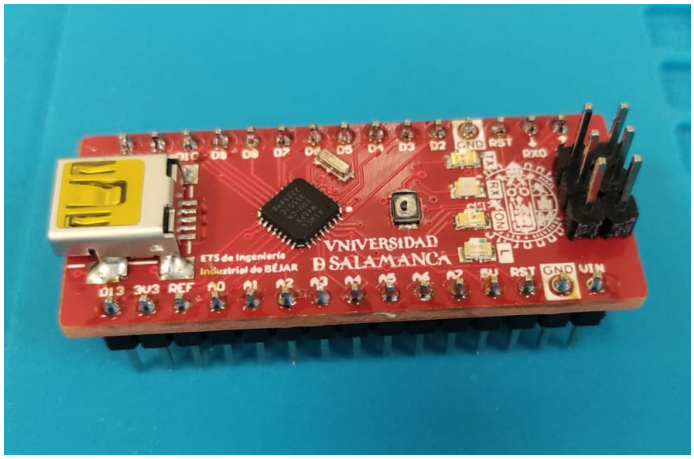


Fig. 6. PCB ensamblada

D. Procesos para el Control de Calidad

Finalmente se puntualiza la importancia de garantizar la fiabilidad y funcionalidad de las PCBs fabricadas. A través del control de calidad y pruebas unitarias, se verifican tanto la integridad física de la soldadura y colocación de componentes como el rendimiento eléctrico de la PCB, asegurando que cada producto cumpla con los estándares establecidos.

- **Control de Calidad**: en esta fase se enfatiza en los procedimientos realizados en la industria destinados a evaluar la integridad física y la correcta colocación de los componentes en las PCBs. Posteriormente, se procede a inspeccionar de forma visual, mediante un microscopio digital, con el fin de identificar posibles defectos de fabricación, como soldaduras frías, puentes de soldadura o componentes mal alineados. Este control de calidad se complementa con la verificación de las dimensiones de la placa, garantizando que cada PCB cumpla con los requisitos de diseño y las especificaciones técnicas antes de avanzar a las pruebas de funcionamiento.
- **Pruebas unitarias**: tras confirmar la calidad física de las PCBs, se realizan pruebas unitarias para evaluar el rendimiento eléctrico y la funcionalidad del circuito. Este proceso incluye pruebas de continuidad, para asegurar que todas las conexiones eléctricas sean correctas y no existan cortocircuitos, así como pruebas de tensión e intensidad de corriente para verificar la respuesta del circuito bajo condiciones operativas normales.
  Adicionalmente, se incorpora un paso crucial de programación y verificación del microcontrolador, utilizando el Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) de Arduino para cargar el firmware correspondiente. Este proceso no solo verifica la capacidad de programación del dispositivo, sino que también evalúa las funcionalidades específicas implementadas en el software, asegurando que el microcontrolador opere conforme a los requisitos del proyecto. Estas pruebas unitarias, al abarcar tanto los aspectos hardware como software del diseño, son fundamentales para confirmar la funcionalidad global de

las PCBs, facilitando la detección temprana de errores y permitiendo ajustes precisos antes de la implementación final del producto.

E. Implementación metodológica

Se plantea la implementación de la metodología propuesta para el segundo cuatrimestre del curso 2024/2025 y siendo organizado en dos sesiones semanales de 2 horas cada una. Estas sesiones se imparten en el aula (A), en el aula de informática (AI) y en el laboratorio de fabricación (LF). A continuación, se describe la distribución temporal y los componentes específicos de cada fase:

- **Fase 1: Diseño de Placas de Circuito Impreso**
  - **Semanas 1 y 2 (A)**: Introducción al diseño de PCBs
  - **Semana 3 (AI)**: Introducción a Altium Designer y Arduino Nano
  - **Semanas 4 y 5 (AI)**: Diseño esquemático
  - **Semanas 6 y 7 (AI)**: Diseño Layout
  - **Semana 8 (AI)**: Diseño Layout
  - **Semana 9 (AI)**: Preparación de archivos de fabricación, órdenes de fabricación y adquisición de componentes
- **Fase 2: Fabricación y Ensamblaje de Placas de Circuito Impreso**
  - **Semana 10 (A)**: Procesos de fabricación de PCBs e introducción a la maquinaria de ensamblaje
  - **Semana 11 (LF)**: Configuración de maquinaria para serigrafía, horno de soldadura y Pick & Place
  - **Semana 12 (LF)**: Configuración Pick & Place
  - **Semana 13 (LF)**: Ensamblaje de PCBs
- **Fase 3: Procesos para el Control de Calidad**
  - **Semana 14 (A)**: Procesos de calidad en industria de fabricación electrónica
  - **Semana 15 (LF)**: Control y pruebas de calidad

Con el fin de que los estudiantes tengan una mayor claridad sobre las expectativas y los recursos disponibles a lo largo del curso, se entrega la siguiente documentación:

- Descripción del curso y objetivos.
- Cronograma detallado de sesiones y actividades.
- Guías de uso de software y maquinaria.
- Criterios de evaluación y rubricas para los proyectos.

V. Conclusiones y futuros trabajos

Este proceso integral culmina en el desarrollo de una placa de desarrollo no solo funcional y de alta calidad, sino que también ofrece una herramienta educativa que se puede extender y aplicar a lo largo de diversas asignaturas, enriqueciendo el aprendizaje multidisciplinar. A través de este proceso, los estudiantes adquieren una experiencia muy valiosa y práctica, abarcando cada faceta del diseño y la fabricación electrónica, desde el concepto hasta la implementación final. Sin embargo, una limitación de este enfoque es la viabilidad de llevar a cabo la fabricación de todas las propuestas de diseño de PCB generadas por los estudiantes. Por razones prácticas y de eficiencia, se hace necesaria la selección cuidadosa de uno o dos diseños para su producción. Este criterio de selección, lejos de ser una desventaja, fomenta entre los estudiantes una competencia sana por la innovación y la calidad, incentivando la presentación de proyectos que no solo sean viables desde el punto de vista técnico, sino que también destaquen por su originalidad y aplicabilidad.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido realizada gracias al apoyo del Programa Territorial de Fomento para Béjar 2019-2023, financiado por la Consejería de Economía y Hacienda de la Junta de Castilla y León (ORDEN EYH/1410/2018, de 26 de diciembre.

References

[1] Crawley, E. F., Malmqvist, J., Lucas, W. A., and Brodeur, D. R. (2011). The CDIO syllabus v2. 0. An updated statement of goals for engineering education. In Proceedings of 7th international CDIO conference, Copenhagen, Denmark.

[2] Aranguren, G., Etxaniz, J., and Monje, P. M. (2012). La producción electrónica: una notable ausencia en la Universidad. TAEE

[3] Sitio web del grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática de la ETS de Ingeniería Industrial de Béjar. industriales.usal.es/estudios/grado-ingenieria-electronica/ . Último acceso en abril de 2024.

[4] Guía académica - TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN Y FABRICACIÓN 2023-2024. https://guias.usal.es/node/164021/ . Último acceso en abril de 2024.

[5] Altium Student Lab. https://www.altium.com/es/education/students/ . Último acceso en abril de 2024.

[6] PCBWay. https://www.pcbway.es/ . Último acceso en abril de 2024.

[7] Mouser Electronics. https://www.mouser.es/ . Último acceso en abril de 2024.

[8] TWS Automation. https://www.tws-automation.com/ . Último acceso en abril de 2024.

[9] NEODEN 4. https://neodenusa.com/neoden-4-smt-pick-and-place-machine/ . Último acceso en abril de 2024.

[10] Arduino Nano. https://store.arduino.cc/products/arduino-nano . Último acceso en abril de 2024.

[11] Generate gerber file from Altium. PCBWay. https://www.pcbway.com/blog/help_center/Generate_gerber_file_from_Altium.html . Último acceso en abril de 2024.

Laboratório remoto VISIR: As Limitações da Matriz de Comutação

Frederico L. Jacob
Departamento de Física
Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP)
Porto, Portugal
ORCID: 0000-0002-0912-2245

André V. Fidalgo
Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP)
Porto, Portugal
ORCID: 0000-0003-1219-3105

Elio San Cristobal Ruiz
Departamento de Engenharia Elétrica, Eletrónica, Controlo, Telemática e Química Aplicada à Engenharia
Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)
Madrid, Espanha
ORCID: 0000-0003-2102-977X

Felix Garcia Loro
Departamento de Engenharia Elétrica, Eletrónica, Controlo, Telemática e Química Aplicada à Engenharia
Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)
Madrid, Espanha
ORCID: 0000-0001-5445-2377

***Resumo*— Num mundo em rápida evolução, a tecnologia desempenha um papel fundamental na transformação da forma como os estudantes aprendem e interagem com conceitos teóricos e práticos. Um exemplo notável deste progresso é o *Virtual Instrument Systems in Reality* (VISIR), uma popular plataforma de laboratório remoto desenvolvida para o ensino de disciplinas específicas, como a eletrónica analógica e a eletricidade. Este laboratório permite que os estudantes realizem experiências práticas através da Internet, utilizando potencialmente equipamento real, instalado num local distante, e controlado à distância. Assim, os estudantes podem aceder ao laboratório remoto VISIR através de um navegador Web e interagir com instrumentos e circuitos como se estivessem num laboratório convencional. No entanto, provavelmente por não ter recebido actualizações relevantes durante bastante tempo, esta plataforma apresenta várias limitações, que serão exploradas neste artigo, essencialmente as que existem atualmente na Matriz de Comutação. Esta abordagem baseou-se em informações publicadas na literatura científica combinadas com o retorno da intensiva experiência de utilizadores e proprietários. Esta avaliação visa identificar várias limitações (técnicas, educativas ou pedagógicas, operacionais e económicas) da Matriz de Comutação, que podem ser consideradas ameaças para o futuro do laboratório remoto VISIR e afetar o seu desempenho e estabilidade, bem como a sua expansão a uma comunidade mais vasta de utilizadores. De salientar que não são apresentadas sugestões de soluções para corrigir as limitações desta parte da plataforma remota.**

Palavras-chave— Limitações, Matriz de comutação, VISIR

I. INTRODUÇÃO

De acordo com [1], o laboratório remoto VISIR é a plataforma de experimentação mais popular no ensino de circuitos elétricos e eletrónica analógica, estando na vanguarda de um movimento mundial no campo do ensino prático à distância. Assim, além de ser um dispositivo de medição física, esta plataforma é também um instrumento educativo que, de acordo com os autores de [2], é tão difundido que a bibliografia (atas de conferências, artigos de revistas, teses, secções de livros, etc.) focada exclusivamente neste laboratório totaliza cerca de trezentas publicações.

O laboratório remoto VISIR, conforme mostrado na Fig. 1, é essencialmente composto por uma unidade física constituída por vários componentes de *hardware* e *software* [3], comunicando-se com os estudantes através de uma interface web, nomeadamente, uma placa de ensaio virtual onde todos os componentes necessários para a realização dos experimentos estão disponíveis [4]. Assim, esta plataforma está dividida em três blocos principais, nomeadamente, o *setup* experimental (Matriz de Comutação, chassis PXI e os seus módulos, etc.), os servidores (Servidor Web, Servidor de Equipamentos e Servidor de Medição) e o cliente (que fornece acesso e interação com os experimentos disponíveis).

Fig. 1. Plataforma do laboratório remoto VISIR [4]

A Matriz de Comutação do laboratório remoto VISIR é um manipulador de circuitos controlável remotamente, consistindo numa pilha de placas de circuito impresso (PCB), especificamente concebida para esta plataforma [3]. Portanto, este dispositivo desempenha um papel fundamental na configuração e interligação de componentes (transístores, amplificadores operacionais, resistências elétricas, condensadores, etc.), fios de ligação e instrumentos usados nos experimentos. Por outras palavras, os circuitos são criados adicionando ou removendo componentes e fios de ligação diretamente nas várias placas, enquanto os sinais e/ou tensões elétricas, bem como as medições, são obtidos ao ligá-los aos módulos do chassis PXI. Embora ofereça flexibilidade para os estudantes explorarem uma ampla gama de circuitos e fenómenos, adaptando-se às necessidades específicas de cada experimento, a Matriz de Comutação apresenta, no entanto, algumas limitações importantes.

O laboratório remoto VISIR tem sido utilizado diariamente em vários projetos de investigação académica e em múltiplas aulas em todo o mundo, exigindo, assim, que esteja sempre totalmente operacional. No entanto, apesar de alguns esforços de desenvolvimento, a falta de uma estratégia de desenho a longo prazo resulta em inconvenientes persistentes que permanecem sem solução, não estão totalmente identificados ou são apenas parcialmente abordados. Isso se aplica a todos os elementos que compõem esta plataforma de experimentação. Portanto, o foco deste artigo é avaliar o funcionamento da Matriz de Comutação, um dos componentes mais importantes do laboratório remoto VISIR, e posteriormente identificar as várias limitações que enfrenta atualmente. Assim, este trabalho consiste em descrever as limitações da Matriz de Comutação e explicar, se possível, como influenciam o desempenho da plataforma remota, a preparação das atividades experimentais e/ou os resultados obtidos nos experimentos.

Este documento está dividido em quatro seções distintas. Na seção seguinte (Seção II), a Matriz de Comutação é brevemente descrita. Depois, na Seção III, considerando informações publicadas na literatura (artigos, teses, etc.), bem como o *feedback* de utilizadores e proprietários do laboratório remoto VISIR, são apresentadas as principais limitações da Matriz de Comutação que já foram identificadas. Estas limitações são agrupadas em categorias distintas, ou seja, técnicas, educacionais ou pedagógicas, operacionais e económicas, e são caracterizadas e brevemente explicadas. As conclusões são apresentadas na última seção (Seção IV).

II. Matriz de Comutação do VISIR

No laboratório remoto VISIR, a Matriz de Comutação, especificamente projetada para esta plataforma, é responsável por interligar componentes e fios de ligação, bem como conectar instrumentos ao circuito para permitir a introdução de sinais ou tensão elétrica e realizar medições. Assim, este mecanismo de ligação substitui a manipulação pelo utilizador dos dispositivos do laboratório físico, que é frequentemente a parte mais complexa de um laboratório remoto [4].

Projetada, concebida e comercializada pela *Blekinge Tekniska Högskola* (BTH) [1], a Matriz de Comutação, conforme mostrada na Fig. 2 (com apenas uma Placa de Componentes), contém tipos distintos de placas. Assim, possui placas para a alocação dos componentes utilizados nos experimentos (Placas de Componentes), placas para a ligação aos instrumentos (Placas de Instrumentos) e outras placas para a ligação a fontes de alimentação DC e ao gerador de sinal (Placa de Alimentação) presentes nos módulos do chassis PXI. Além destas, existem também *Dual Component Boards* que permitem a conexão livre entre nós de até dois componentes com dois terminais cada, ou um instrumento de baixa frequência, como um multímetro digital. Para expandir a gama de aplicações, existe também a possibilidade de ligar externamente as Placas de Componentes da Matriz de Comutação a outros componentes (por exemplo, com uma pinagem diferente da suportada pela plataforma) ou placas que contenham circuitos complexos implementados.

As Placas de Componentes da Matriz de Comutação consistem num microcontrolador (o Controlador da Placa), o Microchip PIC16F767, cujo objetivo é identificar cada placa, lidar com o formato das mensagens e controlar os componentes incluídos nela, vários relés eletromecânicos, um potenciómetro digital de 10 kΩ, dois integrados ULN2003A (um conjunto de sete Darlington), vários soquetes para componentes e fios de ligação, e conectores de barramento para a comunicação entre as várias placas.

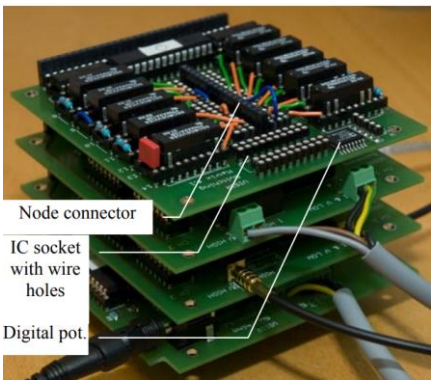


Fig. 2. Matriz de Comutação [5]

As Placas de Instrumentos são de dois tipos distintos, ou seja, a Placa DMM (para medições de tensão elétrica, resistência eléctrica e intensidade de corrente) e a Placa de Osciloscópio. Ambos os tipos incluem o Controlador de Placa e os conectores de barramento e, além disso, têm pinos específicos que permitem ligar as entradas de medição a qualquer nó da plataforma.

A Placa de Alimentação é única para cada Matriz de Comutação e permite a ligação a várias fontes de energia, como o gerador de função e a fonte de alimentação DC, presentes nos módulos do chassis PXI. Também possui uma ligação externa a uma fonte de 12 V_{DC} utilizada para alimentar os relés eletromecânicos. Além disso, esta placa é usada para transmitir sinais de controlo entre as várias partes da plataforma, por isso inclui um microcontrolador dedicado para esta tarefa (o Controlador da Matriz), o Microchip PIC18F4550 [5].

Para além destas ligações com os módulos do chassis PXI, a Matriz de Comutação comunica com o computador que tem os vários servidores através de um cabo USB, facilitando a ligação à Internet que permite aos estudantes realizar os experimentos práticos.

O Servidor de Equipamentos, totalmente desenvolvido no *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench* (LabVIEW), uma linguagem de programação gráfica da *National Instruments* (NI), controla a Matriz de Comutação, permitindo que esta execute e implemente o circuito criado pelo estudante e forneça resultados da medição [6]. Assim, entre outras funções, gere a execução dos comandos dos estudantes sem comunicar diretamente com eles, recebendo ordens do Servidor de Medição e acedendo à Lista de Componentes, um ficheiro usado para descrever todos os componentes, os seus valores nominais, as possíveis ligações e as suas posições exatas na Matriz de Comutação.

III. Limitações da Matriz de Comutação

Em [7], os autores mencionam que existem muitas fraquezas de diversos tipos no laboratório remoto VISIR, indicando que vários aspetos precisam de ser melhorados, pois podem ser vistos como uma ameaça à sua existência, mesmo num futuro próximo.

A dependência de terceiros do laboratório remoto VISIR, incluindo a Matriz de Comutação, é a maior limitação desta plataforma, causando dificuldades de vários tipos, como a

impossibilidade de facilmente utilizar *hardware* de diferentes fabricantes.

Considerando toda a informação publicada na literatura científica (artigos, teses, etc.) e o *feedback* de experiências intensivas de utilizadores e proprietários da plataforma, as limitações relacionadas com a Matriz de Comutação podem ser divididas em categorias técnicas, educativas ou pedagógicas, operacionais e económicas, e são apresentadas nas seções seguintes.

A. Limitações técnicas

Uma das principais limitações técnicas da Matriz de Comutação é o facto de apenas permitir circuitos com um máximo de oito nós. No entanto, como a saída do gerador de sinal está ligada internamente ao nó A, quando este instrumento é utilizado no circuito, o número de nós disponíveis é ainda mais limitado. Como todos os componentes e fios de ligação estão sempre conectados a um nó, a conceção da configuração experimental torna-se mais complexo do que com uma placa de ensaio padrão num laboratório convencional [8].

A Matriz de Comutação tem limitações quanto à capacidade de armazenamento de componentes e fios de ligação porque, no máximo, apenas 15 Placas de Componentes podem ser empilhadas juntas [9]. Portanto, os componentes precisam de ser frequentemente trocados para corresponderem aos necessários para implementar os circuitos, o que limita o número de experimentos que podem ser conduzidos simultaneamente pelos estudantes [10].

De acordo com [11], uma limitação importante é a impossibilidade física de conectar diretamente um componente instalado a outro existente nas Placas de Componentes. Também se observa que isso está relacionado com os ficheiros MaxList (como exemplo, uma parte de um na Fig. 3) porque, essencialmente, eles representam uma barreira lógica para combinações diretas entre dois ou mais componentes, instalados na mesma ou noutra Placa de Componentes.

```
VFGENA_24_1 A 0
VDCCOM_24_2:1_11 0
VDC+25V_24_4:1_13 B
VDC-25V_24_5:1_12 C

R_3_1 E G 10k
R_4_1 A H 150
R_4_2 A H 270
R_4_3 B E 47k
R_4_8 B E 56k
R_4_9 D E 10k
R_4_10 H I 10k
R_13_6:13_7 F H 10k_X

OP_4_6:4_5:4_14:4_13:4_7 NC1 D I C NC2 F B NC3 uA741

SHORTCUT_1_5 D E
SHORTCUT_3_4 E G
SHORTCUT_3_12 H I
SHORTCUT_24_12 0 G
```

Fig. 3. Exemplo de um ficheiro MaxList

O código-fonte de ambos os tipos de microcontroladores está inacessível e não é fornecido quando a Matriz de Comutação é adquirida. Uma vez que a Matriz de Comutação é um *hardware* proprietário, o *software* é exclusivo para essa solução e, como não está acessível, nem existem publicações explicando-o, não é viável utilizar outro tipo de matriz (comercial, etc.) para controlar a plataforma de experimentos remotos com ele. No entanto, as limitações com o *software* da Matriz de Comutação do laboratório remoto VISIR também ocorrem com o Servidor de Equipamentos. Para além de não ser fácil entender como este servidor funciona, e de nunca ter sido documentado, o código é bastante extenso e tem muitas ligações relacionais entre os diferentes blocos. Assim, é impossível manter o Servidor de Equipamentos, não é fácil comparar as diferentes revisões feitas ao longo dos anos e pode levar muito tempo para atualizar o código, se necessário.

Outra limitação do *software* ocorre porque o código do LabVIEW não é compilado num programa binário, tornando-o lento, reduzindo o desempenho da Matriz de Comutação.

A partir da utilização repetida do laboratório remoto VISIR, foram identificadas outras limitações técnicas na Matriz de Comutação, tais como:

- Os cabos de ligação, os quais, devido à disposição dos conectores de barramento que ligam os nós aos componentes e fios de ligação, podem sofrer quebra na continuidade elétrica, contato defeituoso ou curto-circuito.
- Os soquetes das Placas de Componentes, onde os componentes e todos os fios de ligação devem ser fisicamente colocados, têm orifícios muito pequenos para acomodar certos elementos, como os díodos.
- Os relés eletromecânicos apresentam frequentemente mau funcionamento, e como essas falhas geralmente são aleatórias, elas quase sempre só são perceptíveis quando os estudantes estão a realizar os experimentos.
- Os controladores de *firmware* que não são atualizados há muito tempo, causam problemas de compatibilidade ao alterar o sistema operativo no computador que contém os servidores.

B. Limitações educativas ou pedagógicas

A abordagem utilizada na conceção da Matriz de Comutação resulta numa redundância de componentes e fios de ligação, o que requer a utilização de mais Placas de Componentes na plataforma para implementar o circuito pretendido. Economicamente, esta situação é insustentável, pelo que se torna necessário organizar as atividades laboratoriais com os elementos disponíveis, reduzindo a diversidade de conteúdos pedagógicos que podem ser abordados em simultâneo. Assim, esta limitação de *hardware* impacta na complexidade das topologias de circuitos permitidas, restringindo o seu uso a cursos que utilizam circuitos mais simples [7]. É de notar que esta baixa complexidade dos circuitos disponíveis para os estudantes também se deve à escassez de nós nas Placas de Componentes [12].

Como o amperímetro deve ser conectado em série com os outros componentes do circuito, na Matriz de Comutação, ele deve ser colocado num curto-circuito entre dois nós diferentes. Portanto, é essencial indicar sempre aos estudantes onde localizar este instrumento de medição, o que significa que, do ponto de vista pedagógico, eles não compreendem que é possível posicioná-lo noutro ponto do circuito.

Outra limitação que também impede a realização de alguns experimentos mais complexos é o fato de que a intensidade de corrente elétrica que pode atravessar os relés eletromecânicos colocados nas Placas de Componentes da Matriz de Comutação estar construtivamente limitada a 500 mA.

Assim, dadas estas limitações da Matriz de Comutação, para os professores e o pessoal técnico especializado, criar,

preparar e projetar circuitos requer abordagens alternativas às normalmente adotadas para realizar a mesma tarefa em laboratórios convencionais.

C. Limitações operacionais

Relativamente às limitações operacionais, observa-se que há alguma dificuldade em manter, atualizar e/ou aceder aos componentes e fios de ligação instalados nas Placas de Componentes porque, como estão empilhados, é necessário remover cada um deles individualmente para realizar estas tarefas. Além disso, não é fácil saber qual dos relés eletromecânicos está com defeito sem ter de os remover todos da Matriz de Comutação, ou seja, sem interromper o laboratório remoto VISIR, aumentando o tempo de manutenção preciso para localizar o dispositivo avariado. Isto leva a outra limitação, nomeadamente, a ausência de uma mensagem informando que a Matriz de Comutação está em manutenção, o que faz com que os estudantes não entendam por que não conseguem aceder à plataforma.

É também de notar a ausência de um invólucro protetor para a Matriz de Comutação, conduzindo a problemas de segurança, fiabilidade e estabilidade, uma vez que não está equipada com uma base de montagem específica dedicada.

A dependência da conectividade à Internet também pode ser um ponto sensível, pois falhas ou problemas de latência podem afetar a experiência do estudante. Por conseguinte, é essencial implementar medidas robustas de monitorização e manutenção para garantir o funcionamento fiável da Matriz de Comutação no laboratório remoto VISIR.

D. Limitações económicas

Sendo o laboratório remoto VISIR uma plataforma em tempo real, entende-se que o seu desenvolvimento e manutenção são dispendiosos. Portanto, uma das principais limitações da Matriz de Comutação é o custo no momento da sua aquisição. Além deste elevado investimento inicial, uma vez que a implementação desta plataforma depende diretamente do uso de *hardware* (incluindo a Matriz de Comutação) e *software* específico para o qual foi concebida, tal resulta num preço excessivo para cada sessão laboratorial [13]. Como a distribuição do LabVIEW não é um *software* gratuito, também é apropriado incluí-la nestes custos iniciais, sem esquecer que a licença precisa de ser renovada todos os anos.

Para funcionar corretamente, é necessário colocar componentes nas Placas de Componentes da Matriz de Comutação, o que significa dispositivos que têm um custo variável. Este gasto pode ser relativamente baixo, como no caso de resistências elétricas, ou mais elevado, como com os amplificadores operacionais, mas qualquer que seja o tipo de componente, o montante gasto será sempre menor do que num laboratório convencional.

Uma vez que a Matriz de Comutação é uma solução proprietária, uma das suas limitações é a baixa probabilidade de ser reutilizada num sistema que não seja o laboratório remoto VISIR. Portanto, o investimento financeiro feito só pode ser recuperado através do uso intensivo da plataforma.

A complexidade da Matriz de Comutação pode tornar a sua configuração e manutenção desafiadoras, exigindo conhecimentos técnicos especializados para o diagnóstico e a resolução de problemas, bem como, para a criação, desenho e depuração de circuitos. Por se tratar de uma atividade complexa que requer conhecimentos de eletricidade, eletrónica e informática, bem como, a capacidade de integrar circuitos com *software* e *hardware*, é necessária a presença de pessoal técnico especializado, o que acarreta custos excessivos. No entanto, quase todas as plataformas instaladas são desenvolvidas, mantidas e geridas por estudantes de pós-graduação, professores e investigadores, pois as organizações não têm recursos financeiros para ter uma equipa permanente.

IV. Conclusões

O laboratório remoto VISIR, apesar de ser uma plataforma de experimentação prática à distância no domínio da eletrónica analógica e da eletricidade, que é utilizada com muita frequência, enfrenta os desafios próprios como um todo, mas também em partes muito específicas, como na Matriz de Comutação.

Através da revisão de toda a informação relevante disponível, juntamente com o *feedback* de experiências intensivas de utilizadores e proprietários, neste trabalho foram identificadas as principais limitações atualmente existentes na Matriz de Comutação, entendendo-se, entre outros, que estas estão relacionadas com o *hardware* e o *software*, mas também com aspectos educacionais ou pedagógicos, operacionais e económicos. Entende-se também que, devido a estas limitações, há uma redução na flexibilidade de preparação das actividades laboratoriais, bem como, uma baixa reutilização dos componentes da plataforma, uma interoperabilidade quase inexistente, a não ser com os próprios dispositivos, e elevados custos de *hardware* da Matriz de Comutação.

Devido a muitas destas limitações serem consideradas ameaças e possíveis obstáculos à disseminação futura, é essencial, caso se pretenda manter esta plataforma operacional por mais algumas décadas, por exemplo, capitalizar o seu custo de aquisição e proceder prontamente a melhorias significativas. Estas últimas podem, com maior ou menor facilidade, superar todas as limitações identificadas, sem esquecer que existe uma interligação entre todas as partes constituintes do laboratório remoto VISIR. Ou seja, são necessárias e essenciais melhorias técnicas para aumentar a flexibilidade e o desempenho, ao mesmo tempo que se diminui a dependência de terceiros, como nos casos da Matriz de Comutação e do LabVIEW, substituindo-os por outras tecnologias.

Apesar dos obstáculos mencionados anteriormente, o laboratório remoto VISIR representa um marco na evolução do ensino das ciências e da engenharia, pois democratiza o acesso à educação prática e promove a colaboração global entre instituições educacionais.

Referencias

[1] A. Villar-Martinez, et al., “LabsLand Electronics Laboratory: Distributed, Scalable and Reliable Remote Laboratory for Teaching Electronics”, Open Science in Engineering, vol. 763, pp. 261-272, Jan. 2024, doi: 10.1007/978-3-031-42467-0_24.

[2] M. M. Silva, A. V. Fidalgo, A. Marques, G. R. Alves, R. M. Salah, and F. L. Jacob, “A comprehensive VISIR bibliographical reference”, 2021 World Engineering Education Forum / Global Engineering Deans Council (WEEF / GEDC), Madrid (Spain), Nov. 2021, pp. 468-475, doi: 10.1109/WEEF/GEDC53299.2021.9657332.

[3] M. Tawfik, et al., “Virtual instrument systems in reality (VISIR) for remote wiring and measurement of electronic circuits on breadboard”, IEEE Transactions on Learning Technologies, vol. 6, no. 1, pp. 60-72, Mar. 2013, doi: 10.1109/TLT.2012.20.

[4] I. Gustavsson, J. Zackrisson, L. Håkansson, I. Claesson, and T. Lagö, “The VISIR project – an Open Source Software Initiative for Distributed Online Laboratories”, 4th International Conference on

Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), Porto (Portugal), pp. 841-851, Jun. 2007.

[5] I. Gustavsson, et al., "Telemanipulator for Remote Wiring of Electrical Circuits", 5th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), Duesseldorf (Germany), pp. 1-8, Jun. 2008.

[6] L. Rodríguez-Gil, P. Orduña, J. García-Zubía, and D. López-de-Ipiña, "Advanced integration of OpenLabs VISIR (Virtual Instrument Systems in Reality) with Weblab-Deusto", 9th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), Bilbao (Spain), pp. 1-7, Jul. 2012, doi: 10.1109/REV.2012.6293150.

[7] G. R. Alves, et al., "A roadmap for the VISIR remote lab", European Journal of Engineering Education, vol. 48, no. 5, pp. 880-898, Mar. 2022, doi: 10.1080/03043797.2022.2054312.

[8] I. Gustavsson, et al., "Telemanipulator for Remote Wiring of Electrical Circuits", 5th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), Duesseldorf (Germany), pp. 1-8, Jun. 2008.

[9] F. Garcia-Loro, et al., "PILAR: a Federation of VISIR Remote Laboratory Systems for Educational Open Activities", 2018 IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE), Wollongong (Australia), pp. 134-141, Dec. 2018, doi: 10.1109/TALE.2018.8615277.

[10] F. L. Jacob, M. A. Marques, A. Fidalgo, E. S. C. Ruiz, F. G. Loro, M. Castro, "VISIR Remote Lab: Identifying Limitations and Improvement Ideas", Open Science in Engineering, vol. 763, pp. 149-157, Jan. 2024, doi: 10.1007/978-3-031-42467-0_13.

[11] I. Gustavsson, T. Olsson, H. Åkesson, J. Zackrisson, L. Håkansson, "A Remote Electronics Laboratory for Physical Experiments using Virtual Breadboards", 2005 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition, Portland (USA), Jun. 2005.

[12] C. J. Garcia-Orellana, M. Macias-Macias, H. Gonzalez-Velasco, A. GarciaManso, and R. Gallardo-Caballero, "Remote laboratory experiments of Analog Electronics based on 'RedPitaya'", Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (TAEE 2016), Sevilla (Spain), Jun. 2016, pp. 1-7, doi: 10.1109/TAEE.2016.7528244.

[13] García-Loro et al., "Remote laboratory VISIR: recent advances, initiatives, federation, limitations and future", 2021 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), Vienna (Austria), Apr. 2021, pp. 1754-1757, doi: 10.1109/EDUCON46332.2021.9453961.

Asistencia a clase y enfoque del estudio: su influencia en el rendimiento de los estudiantes

Ana De Andrés Rubio
Dpto. Electrónica
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares. Spain
ana.deandres@uah.es

Javier Macías Guarasa
Dpto. Electrónica
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henrares. Spain
javier.maciasguarasa@uah.es

Germán Ros Magán
Dpto. Física y Matemáticas
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henrares. Spain
german.ros@uah.es

Elisa Rojas Sánchez
Dpto. Automática
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henrares. Spain
Elisa.rojas@uah.es

Sira Palazuelos Cagigas
Dpto. Electrónica
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henrares. Spain
Sira.palazuelos@uah.es

Juan Manuel Miguel Jiménez
Dpto. Electrónica
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henrares. Spain
jmanuel.miguel@uah.es

Maria Soledad Escudero Hernanz
Dpto. Electrónica
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henrares. Spain
marisol.escudero@uah.es

Jose Manuel Arco Rodríguez
Dpto. Automática
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henrares. Spain
josem.arco@uah.es

Maria Concepción Batanero Ochaita
Dpto. Automática
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henrares. Spain
concha.batanero@uah.es

Jose Luis Martín Sánchez
Dpto. Electrónica
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henrares. Spain
joseluis.martin@uah.es

Sergio Lafuente Arroyo
Dpto.Tª de la Señal y Comunicaciones
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henrares. Spain
sergio.lafuente@uah.es

Miguel Ángel García Garrido
Dpto. Electrónica
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henrares. Spain
miguelangel.garcia@uah.es

Hilario Gómez Moreno
Dpto.Tª de la Señal y Comunicaciones
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henrares. Spain
hilario.gomez@uah.es

***Abstract*——— En este estudio se muestran los resultados obtenidos al analizar los datos sobre asistencia a clase y su influencia en el rendimiento de los estudiantes en asignaturas de Electrónica de las titulaciones de Telecomunicación y Automática Industrial de la Universidad de Alcalá (UAH). Los datos corresponden a las asignaturas de segundo curso de dichas titulaciones impartidas en la Escuela Politécnica Superior (EPS). Los resultados cuantifican de forma específica la mejora esperada en el porcentaje de aprobados y la nota media de los estudiantes según se incrementa el porcentaje de asistencia a clase. Se muestran también los resultados obtenidos al realizar encuestas en estos mismos cursos sobre el enfoque que tienen los estudiantes al abordar los estudios de estas materias. La información obtenida se utiliza de forma explícita como herramienta de motivación del alumnado y como apoyo en la labor docente.**

Keywords— Analíticas de aprendizaje, Asistencia a clase, Rendimiento académico, Motivación.

I. Introducción

En el ámbito académico, la relación entre la asistencia a clase y el rendimiento académico de los estudiantes ha sido objeto de un interés continuo y significativo. En los últimos tiempos, la preocupación de los profesores de la Escuela Politécnica Superior (EPS) de la Universidad de Alcalá (UAH) se ha incrementado en este sentido. Entre los profesores existe una percepción de que la asistencia a clase de los estudiantes ha disminuido, en especial después de la crisis provocada por el COVID-19, y se considera una de las causas del bajo rendimiento y el abandono en ciertas titulaciones de ingeniería impartidas en la EPS. Hay muchos estudios que determinan las causas que hacen que los estudiantes no asistan a clase, pero en nuestro estudio nos interesa cuantificar en qué medida el absentismo está correlacionado en el rendimiento académico y confirmar si realmente la percepción de los profesores corresponde a la realidad.

En los años posteriores a la pandemia producida por el COVID-19, hemos asistido a la publicación de múltiples análisis y estudios sobre cómo afecta la educación online al rendimiento de los estudiantes en diferentes disciplinas universitarias. Los profesores en general, y los de universidad en particular, tuvieron que adaptar sus clases en muy poco tiempo, pasando de una presencialidad del 100% a una enseñanza online 100%, para luego volver a retomar la presencialidad. Esto ha supuesto un antes y un después en las aulas de las universidades de todo el mundo con modalidad presencial. Lejos de volver a una situación prepandemia, en los años posteriores se ha dado una tendencia a compaginar la enseñanza presencial con la enseñanza online, en un intento de mejorar la calidad educativa en la enseñanza superior y aprovechar el esfuerzo de adaptación realizado. En algunos estudios se analizan los aspectos positivos y negativos de esta

situación. A este respecto, el estudio realizado por Alvarez-Herrero et al. [1] concluye que hay que contar con profesores expertos para adaptar las enseñanzas presenciales a una enseñanza online, ya que, aunque el rendimiento aparente es mayor en el caso de aprendizaje no presencial, se requiere la presencialidad para adquirir ciertas competencias necesarias en disciplinas como la educación infantil. Destaca también que el buen rendimiento observado en el caso de enseñanza no presencial puede deberse entre otras cosas al compromiso adquirido por los estudiantes con su aprendizaje y la flexibilidad que necesitaba el grupo de estudio. Muchos de los estudios abogan por una enseñanza mixta (presencial y online) que ha llegado para quedarse y evolucionar en la enseñanza universitaria [2] y se apuesta por una formación específica del profesorado universitario, para llevar a cabo esta docencia [3].

Aun así, existen estudios previos a la pandemia, en los que ya se refleja una preocupación por el absentismo del alumnado en la educación superior. Anees Majeed et al. [4] determinan que hay muchos factores físicos y sociales que contribuyen al absentismo en las aulas, y en su estudio analizan de forma general las causas que determinan ese absentismo en la escuela de enfermería de la Universidad de Lahore (Pakistán). Entre todos los aspectos que reflejan las encuestas realizadas, llama la atención que uno de los más influyentes en la motivación de los estudiantes para asistir a las clases es la falta de hábito en la puntualidad y la dejadez. En las encuestas, los estudiantes consideraron también como motivo de ausencia los problemas personales serios por encima de otros aspectos sociales como el cansancio y la falta de sueño en los aspectos físicos, o la ansiedad y el estrés en los aspectos emocionales. En cuanto a los aspectos más representativos relacionados con la práctica del docente, destacan la poca claridad en las explicaciones, la falta de interés por el aprendizaje de los estudiantes o las clases demasiado aburridas y teóricas. En este estudio, se evalúan también otros aspectos externos, que influyen en la decisión de los estudiantes en no ir a clase, como el tiempo, actividades lúdicas, amigos, etc. El estudio concluye que las causas de abandono son fundamentalmente físicas, de metodología, actitud y organizativas. Estas conclusiones llevan a pensar que hay una fuerte componente de los hábitos de descanso y organización del estudio en las causas de absentismo, aunque también se deduce que no hay que descartar la responsabilidad de los profesores en cuanto a la organización y realización de las clases, para aumentar la motivación del alumnado.

Otros aspectos por considerar para determinar las razones del absentismo y el fracaso en la enseñanza superior es el mal asesoramiento previo sobre los estudios a realizar y la poca información sobre las salidas profesionales de cada titulación. Desde el punto de vista del alumnado que abandona, las razones son siempre externas, en parte debidas a la falta de capacidad para asumir responsabilidades [5], pero también a aspectos de exigencia de las actividades lectivas. En este mismo estudio, se identifica la fuerte dependencia que tiene la capacidad de abordar las actividades docentes, como puede ser la asistencia a clase, con la motivación del estudiante. En esta motivación, el profesor juega un papel relevante, ya que el desempeño docente está directamente relacionado con la motivación del estudiante a asistir a clase.

En trabajos como los de Mokhtari Sepideh et al. [6], se defiende la postura de que la enseñanza online es una herramienta para evitar el absentismo, ya que la participación de los estudiantes en actividades online es mucho mayor que la de los estudiantes en modalidad presencial, pero hay disciplinas con un alto contenido práctico que requieren la presencialidad para adquirir el total de competencias necesarias de los estudios en concreto, como podrían ser las disciplinas asociadas a ciencias de la salud, educación, ingeniería, etc.

Esta tendencia de absentismo, quizá se ha hecho mayor después de la pandemia, en parte debido a la percepción por parte de los estudiantes de que la asistencia a clase no es absolutamente necesaria para la superación de las asignaturas, ya que han podido seguir las materias de forma online con la comodidad que esto reporta. Por otro lado, el esfuerzo de los profesores por realizar innovación en sus aulas, apoyándose en la tecnología, ha dado lugar a múltiples recursos en la red, que los estudiantes ven como sustitutivos de las clases, en vez de recursos complementarios para su formación. La mayoría de los estudios se centran en determinar las causas del absentismo, pero nos interesa en la misma medida cuantificar el impacto real que tiene sobre las calificaciones de nuestros estudiantes. En este sentido, los estudios realizados por Siobhan et al. [7] en el ámbito de la enseñanza de economía no muestran resultados concluyentes sobre el aspecto positivo de la asistencia a clase y el rendimiento. Según sus estudios, hay una relación directa entre los incentivos utilizados para aumentar la asistencia de los estudiantes a clase, pero esto no significa que haya un incremento directo en sus notas.

Ya que los estudios publicados hasta ahora no son generalistas, debido a que cada universidad, curso y grupo de estudiantes tiene particularidades diferentes, se ha realizado el estudio específico de los estudiantes de la EPS de la UAH, recopilando datos durante varios cursos académicos. El objetivo de este trabajo es arrojar luz sobre la correlación que tiene la asistencia a clase con el rendimiento académico de los estudiantes de la EPS. Decimos correlación porque es complicado establecer una relación de causalidad, dada la naturaleza multidimensional de los factores que influyen en el rendimiento de los estudiantes. Adicionalmente, se ha querido incluir como variable el resultado de la encuesta realizada sobre motivación y procesos de estudio para complementar de forma cuantitativa más elementos que puedan influir en el rendimiento del alumnado.

Se propone, además, que esta información llegue tanto a los estudiantes como a los profesores implicados en la docencia de la EPS, ya que se considera que puede ser un incentivo para los estudiantes a la hora de abordar sus estudios, y una información valiosa para que los profesores puedan desarrollar estrategias que mejoren el rendimiento de los estudiantes en sus asignaturas.

II. DESARROLLO DEL TRABAJO

A. Recopilación de datos

Los profesores que componen el grupo de innovación docente DOCERE, provienen de diferentes departamentos de la universidad de Alcalá y pertenecen a diferentes áreas de conocimiento. La recopilación de datos, por lo tanto, se realizó en asignaturas de diferente índole de las ingenierías que se imparten en la EPS, y en este trabajo se analizan las asignaturas específicas referentes a la enseñanza de Electrónica. Las asignaturas referidas son en concreto Electrónica de Circuitos, Electrónica Básica y Electrónica Digital, todas ellas comunes a las titulaciones de Ingeniería de Telecomunicación (GTIC); y Electrónica Digital y Tecnología

Electrónica correspondientes a la titulación de Ingeniería Electrónica y Automática Industrial (GIEAI). Todas estas asignaturas se imparten en segundo curso de las titulaciones especificadas.

El procedimiento de recopilación de datos en todas ellas ha sido el mismo. Al inicio de la asignatura, se ha explicado a los estudiantes que el grupo de innovación docente lleva a cabo un proyecto de recopilación de datos sobre diversos aspectos que afectan al proceso de enseñanza-aprendizaje, como puede ser su motivación ante el estudio, cómo afrontan las asignaturas, la metodología o la asistencia a clase. Se insiste en que los datos se usarán únicamente con fines estadísticos y con el objetivo de mejorar el rendimiento académico de los estudiantes. Se les ha dejado muy claro que las encuestas que realicen no van a repercutir de ningún modo en la calificación que vayan a obtener en la asignatura. De este modo, se pretende maximizar la participación de los estudiantes, implicándolos en el proceso, y buscando la mayor sinceridad posible en sus respuestas.

Casi todas las encuestas realizadas se proponen dentro del horario de clase, dedicando unos minutos a que los estudiantes las rellenen, sin que esto suponga un retraso significativo en el desarrollo de la clase. La encuesta más larga (20 preguntas, escala Likert 1-5) se realiza sólo una vez al inicio del curso, y corresponde al cuestionario R-SPQ-2F validado estadísticamente y muy utilizado a nivel internacional para evaluar los enfoques de estudio de los estudiantes [8]. Al final de curso se les realiza otra encuesta para valorar la motivación y actitudes hacia la metodología concreta seguida en cada asignatura, basada en las encuestas del estudio realizado sobre *Flipped Learning* en [9]. La información de asistencia se registra en cada sesión presencial que tienen los estudiantes de cada asignatura.

Todos los formularios se han realizado en Microsoft Forms, por su versatilidad y facilidad de uso y compartición. Para el acceso de los estudiantes al formulario, la misma herramienta proporciona la opción de crear códigos QR para cada formulario, que se proyectan en las sesiones presenciales para que los estudiantes accedan con sus credenciales de la universidad, simplificando el proceso de identificación en aquellos formularios que requieren conocer la identidad de los participantes.

De forma adicional, en algunas asignaturas, los cuestionarios de inicio y final de curso se han dejado accesibles durante un tiempo prudente en la plataforma de enseñanza virtual de las asignaturas, para que los estudiantes rezagados puedan completarlas fuera del aula.

Para la recopilación de datos se ha contado con la colaboración de profesores ajenos al grupo de innovación que comparten asignatura con los propios componentes del grupo. No obstante, no se ha conseguido obtener los datos completos de todos los grupos existentes de cada asignatura, pero sí se tiene un volumen de respuestas suficientes como para poder extrapolar los datos a las asignaturas completas.

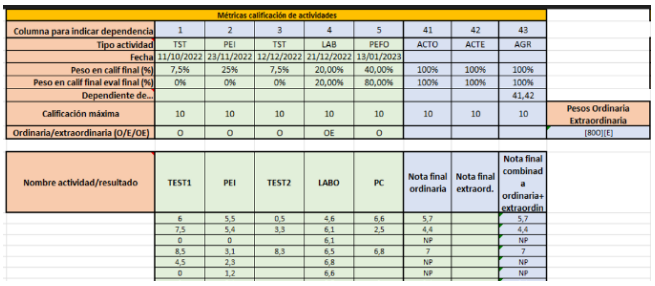
Los datos de asistencia recogidos en los formularios se incluyen en una hoja Excel diseñada por los miembros del grupo de innovación. En esta misma hoja se introducen los datos de matrícula que proporciona la universidad y los datos de calificaciones de las pruebas realizadas en cada asignatura.

B. *Análisis de Datos*

El análisis de los datos se ha realizado al final del curso 2022/23, utilizando los datos recopilados de los cursos 2021/22 y 2022/23 (aunque una asignatura dispone también de datos del curso 2020/21).

El análisis inicial se realiza sobre la hoja Excel diseñada por los profesores, donde se hacen una serie de cálculos base para cada grupo de asignatura. Cada profesor debe incluir en la hoja los datos recogidos en los formularios de asistencia, en el mismo formato que proporciona Microsoft Forms. En otra pestaña ha de incluir el listado de estudiantes del grupo proporcionado por la universidad. Para el profesor que realiza este trabajo, es un simple *copiar-pegar* de datos, lo que simplifica mucho el proceso. Otro de los trabajos que debe realizar el profesor es incluir los datos de las sesiones que ha tenido ese grupo, indicando el tipo de sesión y las pruebas realizadas a lo largo del curso en la asignatura. Además, debe proporcionar el valor numérico de la calificación de cada prueba. Este proceso es algo más tedioso, pero también se puede simplificar conociendo el formato de la hoja y realizando el volcado de datos a lo largo del trimestre. Con los datos incluidos, en la pestaña principal se calcula el porcentaje de asistencia de los estudiantes de ese grupo, y se tienen los datos preparados para hacer un análisis posterior.

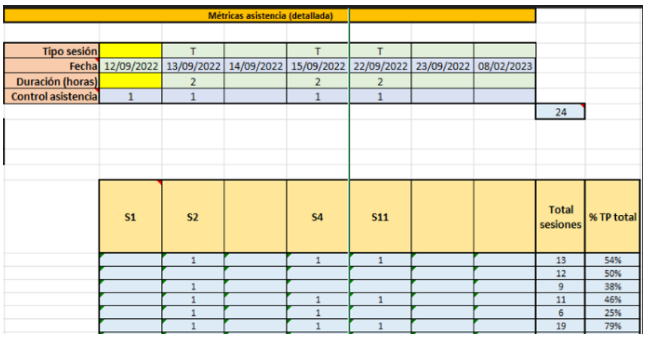
Esta hoja Excel ya es una información valiosa para los profesores, puesto que les da información inmediata y de primera mano sobre la asistencia de cada estudiante a la asignatura. También en la misma hoja, se usa una función hash para asignar un código único a cada estudiante, permitiendo la anonimización de la información, de manera que otros profesores puedan usar los datos de asignaturas ajenas, respetando la protección de datos de los estudiantes. En la Figura 1, se muestran ejemplos de secciones de la hoja Excel diseñada. Esto es útil si se quieren realizar estudios más amplios, que implican asignaturas diferentes con distintos profesores asociados a las asignaturas.



Métricas calificación de actividades									
Columna para indicar dependencia	1	2	3	4	5	41	42	43	
Tipo actividad	TST	PEI	TST	LAB	PEFO	ACTO	ACTE	AGR	
Fecha	11/10/2022	23/11/2022	12/12/2022	21/12/2022	13/01/2023				
Peso en calif final (%)	7,5%	25%	7,5%	20,00%	40,00%	100%	100%	100%	
Peso en calif final eval final (%)	0%	0%	0%	20,00%	80,00%	100%	100%	100%	
Dependiente de...								41,42	
Calificación máxima	10	10	10	10	10	10	10	10	Pesos Ordinaria Extraordinaria
Ordinaria/extraordinaria (O/E/OE)	O	O	O	OE	O				[800][E]

Nombre actividad/resultado	TEST1	PEI	TEST2	LABO	PC	Nota final ordinaria	Nota final extraord.	Nota final combinada ordinaria+extraordin
	6	5,5	0,5	4,6	6,6	5,7		5,7
	7,5	5,4	3,3	6,1	2,5	4,4		4,4
	0	0		6,1		NP		NP
	8,5	3,1	8,3	6,5	6,8	7		7
	4,5	2,3		6,8		NP		NP
	0	1,2		6,6		NP		NP

(a)



Métricas asistencia (detallada)									
Tipo sesión		T		T	T				
Fecha	12/09/2022	13/09/2022	14/09/2022	15/09/2022	22/09/2022	23/09/2022	08/02/2023		
Duración (horas)		2		2	2				
Control asistencia	1	1		1	1			24	

S1	S2		S4	S11			Total sesiones	% TP total
	1		1	1			13	54%
							12	50%
	1						9	38%
	1		1	1			11	46%
	1		1				6	25%
	1		1	1			19	79%

(b)

ID anonimizado
1ee00f97ee73ea4b0208a6f4c0e0d84b04f04a56367572f3873310a0383d89c6
891855dcba2972a250633f16af42c2149148e948ed267c5da7049503b98d4c85
dd452aae45264393cccd07830481461c3ec015aa4a242da73e9487d11d279b55
9e4a949f3b4380c20979fd0770d101f037f8cfccf5e236c4aa5969d80925afe4
dc905e1d19a508c0429759cba8131105fe307cfaf555802741ba2ef9624a0246
9f1f70d58b6f0f44431d560bcd880aeb4ce9955e801ab2202c34a3ea1a285645

(c)

Fig. 1. Secciones de la hoja Excel diseñada por los profesores para el análisis de datos de asistencia y notas.(a) Métrica de calificación de actividades. (b) Métrica de asistencia. (c) Identificador anonimizado del alumno.

En cuanto al análisis de los cuestionarios R-SPQ-2F y de motivación, los objetivos específicos han sido:

- Identificar el tipo de enfoque que adoptan los estudiantes de las titulaciones de las ingenierías analizadas.
- Analizar las diversas dimensiones del enfoque del estudio: motivación y estrategia.
- Analizar las correlaciones entre estas dimensiones.

El paradigma de los enfoques de aprendizaje proporciona una estructura coherente para comprender y mejorar la calidad del aprendizaje del estudiante [10]. Los enfoques de aprendizaje surgen de la combinación de los motivos y las estrategias de aprendizaje. Se han identificado dos enfoques cualitativamente diferentes al afrontar una tarea académica: enfoque superficial y profundo [11].

El enfoque superficial implica motivación extrínseca e instrumental, mientras que el enfoque profundo implica motivación intrínseca, preocupación por aprender adaptando sus estrategias para ello. En cualquier caso, el enfoque del estudiante puede depender de la tarea a realizar. En la Tabla 1 se especifican las dimensiones que se analizan, y cada dimensión se obtiene sumando los ítems correspondientes obteniéndose un valor entre 5 y 25 puntos.

TABLA 1. DIMENSIONES ANALIZADAS DEL ENFOQUE DE ESTUDIO DE LOS ESTUDIANTES

Motivación Profunda (MP)	Estrategia Profunda (EP)	Abordaje Profundo (AP)
Motivación Superficial (MS)	Estrategia Superficial (ES)	Abordaje Superficial (AS)

El análisis de estos cuestionarios se ha realizado usando un análisis estadístico con R [12], por ser una herramienta versátil y gratuita.

C. *Resultados*

En la recopilación de datos se han obtenido 1366 registros de estudiantes en las asignaturas de segundo curso implicadas en el estudio de los grados especificados anteriormente. Los resultados obtenidos en esta encuesta muestran un porcentaje promedio de asistencia a clase en estas asignaturas del 34,3%, que consideramos muy bajo para ser titulaciones presenciales y asignaturas con una fuerte componente práctica.

En la Figura 2 se desglosa el porcentaje de asistencia por asignatura, mostrando el diagrama de cajas de cada una.

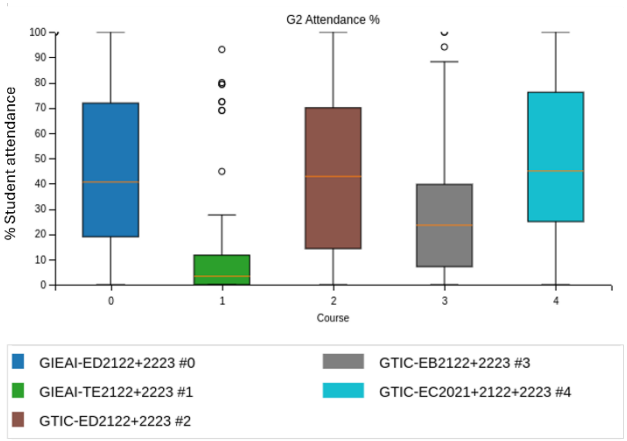


Fig. 2. Porcentaje de asistencia a clase por asignatura en asignaturas de electrónica de segundo curso de grado, indicando los cursos académicos. GTIC=grados de telecomunicación, GIEAI=grados de industriales, ED=Electrónica Digital, TE=Tecnología Electrónica, EB=Electrónica Básica, EC=Electrónica de Circuitos.

Como puede verse, la asignatura de Electrónica Básica de los grados de telecomunicación tiene un porcentaje de asistencia muy bajo en comparación con las de su misma titulación, que coincide con la percepción de los profesores. Un análisis más profundo de esto nos lleva a la conclusión de que es precisamente la primera asignatura de electrónica de la titulación y se percibe como una materia difícil de superar, por lo que los estudiantes terminan por abandonarla el primer año.

La asignatura Tecnología Electrónica de la titulación GIEAI también tiene un porcentaje de asistencia muy bajo. En este caso, el motivo es que el grupo analizado es el de tarde, donde se concentra una mayor cantidad de estudiantes repetidores que, al haber cursado la asignatura previamente, no ven la necesidad de acudir a las clases presenciales de manera habitual.

Cruzando los datos de asistencia con los datos de matrícula se puede deducir lo que coloquialmente se conoce como "matrícula fantasma" y que son estudiantes que están matriculados, pero que nunca han asistido a clase. En el caso de las asignaturas analizadas, estos estudiantes suponen el 16,8%. Este comportamiento lo achacamos a posibles estudiantes que estén trabajando y necesiten estar matriculados para obtener alguna bonificación en la empresa, o estudiantes repetidores que optan por asistir a asignaturas de otros cursos.

La Tabla 2 muestra una comparativa general de estadísticas del rendimiento de los estudiantes de 2º curso, midiendo porcentajes sobre matriculados y presentados.

TABLA 2. RENDIMIENTO GENERAL DE LOS ESTUDIANTES DE SEGUNDO CURSO EN ASIGNATURAS DE ELECTRÓNICA

% presentados / matriculados	68,4%
% aprobados / matriculados	41,7 %
% aprobados / presentados	60,9 %

Partiendo de esta premisa general, en este estudio se ha medido el porcentaje de asistencia a clase, el porcentaje de presentados, el porcentaje de aprobados sobre matriculados y la nota final de las asignaturas. El análisis se hace en función de que la asistencia haya sido mayor que un cierto porcentaje, mostrando también el valor promedio para todos los estudiantes (para facilitar la comparación).

En la Figura 3 se puede ver la relación que existe entre el porcentaje de asistencia y el porcentaje de superación de las asignaturas analizadas, mostrándose el % de aprobados de los estudiantes que han asistido como mínimo a un % de las clases del curso (curva verde en la Figura 3). Como era de esperar, hay una clara correlación entre ambos porcentajes, superando el 91% de aprobados para aquellos estudiantes que acudieron a la totalidad de las clases, 30% más que el promedio para todos los estudiantes (curva naranja en la Figura 3). La misma tendencia puede observarse entre el porcentaje de asistencia y el porcentaje de presentados de las asignaturas (curva azul en la Figura 3), llegando al 97% para los que asisten a todas las clases, casi un 29% más que el promedio para todos los estudiantes (curva roja en la Figura 3).

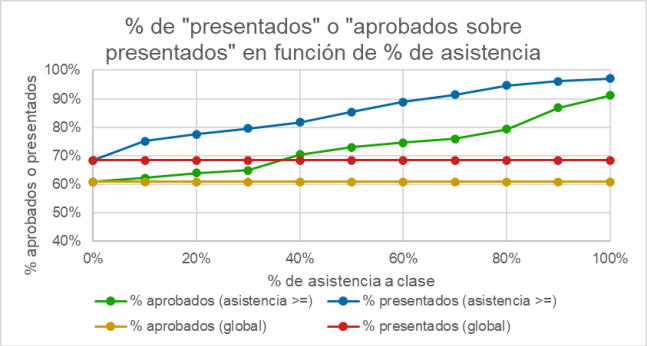


Fig. 3. Relación entre asistencia y rendimiento para estudiantes de 2º curso de ingeniería de las asignaturas de electrónica.

También se ha podido observar un aumento de la nota media que obtienen los estudiantes con mayor porcentaje de asistencia a clase. Como puede verse en la Figura 4, la nota media de los estudiantes de todas las asignaturas es de 4,9 (curva marrón), que supone 1,3 puntos menos que la de los que fueron a todas las clases (curva verde).

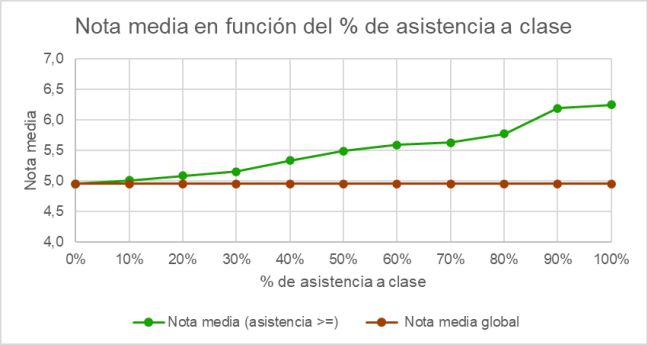


Fig. 4. Media de calificación de las asignaturas encuestadas frente al porcentaje de asistencia por encima de un umbral (asistencia ≥) en comparación con la nota media de todos los estudiantes.

En cuanto al abordaje del estudio de las asignaturas por parte de los estudiantes, los objetivos específicos de las encuestas realizadas era identificar el tipo de enfoque que adoptan los estudiantes en las asignaturas de electrónica analizadas. En el análisis realizado, se ha obtenido una estadística descriptiva del abordaje del estudio y se ha comprobado la fiabilidad del cuestionario mediante un análisis Alpha Cronbhach, obteniéndose una alta fiabilidad con α=0.90. Para obtener las correlaciones entre la motivación y estrategias, se ha utilizado un test no paramétrico de Spearman.

La Figura 5 ilustra la distribución de puntos obtenida en el test en cuanto a la motivación y estrategia que demuestran los estudiantes encuestados. Como se comentó anteriormente, cada dimensión estudiada toma valores de 5 a 25 puntos, por lo que el valor medio de la puntuación se sitúa en 15. Los estudiantes que estén por encima de este valor dan un valor positivo en la dimensión correspondiente. La motivación profunda se sitúa muy claramente en valores por encima de la media, y la estrategia profunda coincide en valor con la mediana, lo que indica una distribución del 50%. Tanto la motivación superficial como la estrategia superficial están en valores negativos. Esto hace pensar que el abordaje que manifiestan los estudiantes es un abordaje profundo. En la Figura 6 se muestra la situación obtenida de abordaje profundo y abordaje superficial. Esta gráfica revela los datos de forma más compacta al combinar motivación y estrategia.

Se ha calculado también la diferencia entre el valor profundo y superficial que ha obtenido cada estudiante. El resultado se muestra en la Figura 7. El cero marca la diferencia de referencia y se puede observar que el 70% del alumnado marca una motivación profunda. En cuanto a la estrategia, el 54% del alumnado está por encima de cero y marca una estrategia profunda. En el conjunto, lo que se denomina el abordaje, el 63.5% del alumnado muestra un abordaje profundo del estudio.

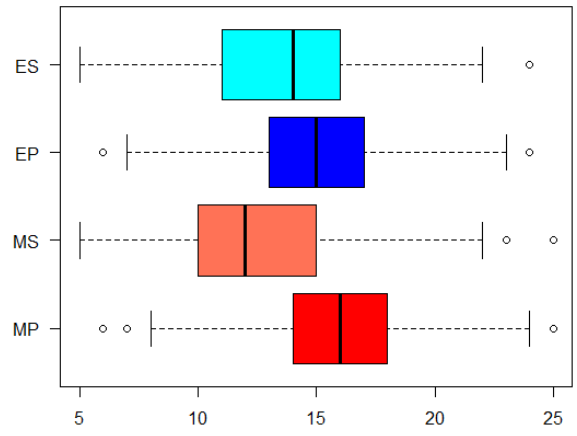


Fig.5. Motivación y Estrategia de los estudiantes encuestados en las asignaturas de electrónica de la UAH. ES=Estrategia superficial, EP=Estrategia profunda, MS=Motivación superficial, MP=Motivación profunda.

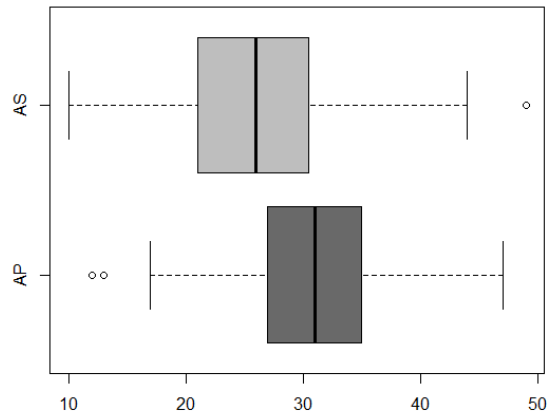


Fig.6. Abordaje profundo y superficial de los alumnnos de asignaturas de electrónica en ingenierías de las UAH. AS=Abordaje superficial, AP=Abordaje profundo.

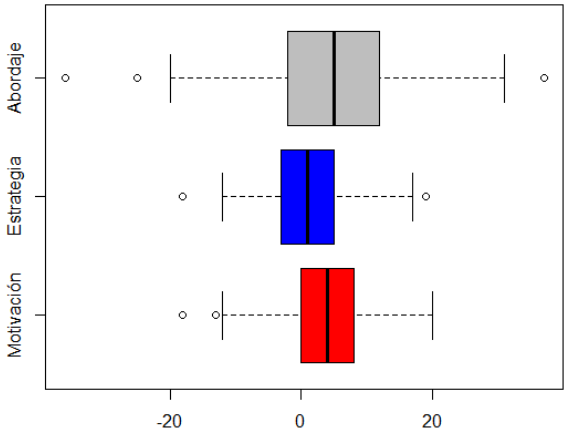


Fig.7. Diferencia valor profundo - valor superficial en motivación y estrategias de estudio de los estudiantes encuestados.

Las correlaciones obtenidas son las esperadas con los resultados del abordaje. Todas las correlaciones son estadísticamente significativas al 99% de confianza (p-valor <0.01). En la Figura 8 se muestran estos resultados. Existe una fuerte correlación entre la motivación y la estrategia profundas lo que indica un abordaje profundo del estudio. Al mismo tiempo, los estudiantes que presentan una motivación superficial también tienen una fuerte correlación con la estrategia superficial.

III. Conclusiones

El estudio ha demostrado de forma cuantitativa lo que se está observando en las aulas de la universidad, que los estudiantes no tienen una percepción de necesidad de asistencia a clase, sobre todo en los cursos iniciales como es este caso. La asistencia media del alumnado de las asignaturas de electrónica en 2º curso de los grados de ingeniería de la EPS está por debajo del 35%. Los motivos de esta baja asistencia requieren un estudio más profundo de las circunstancias concretas de estas titulaciones en la Universidad de Alcalá.

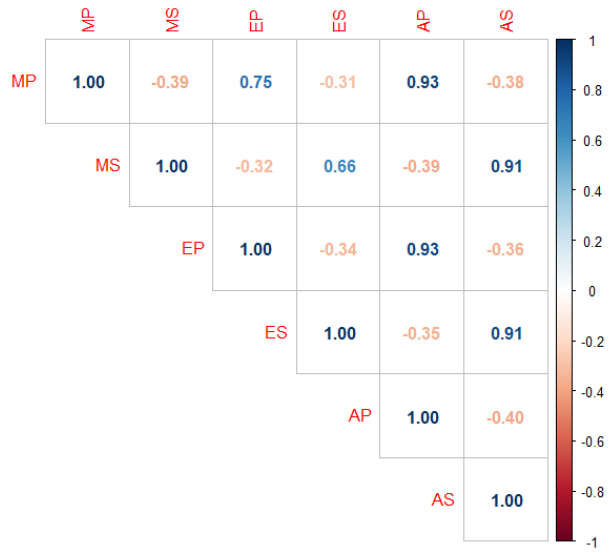


Fig.8. Correlaciones entre motivación y estrategias

Por otro lado, se ha podido constatar, que la asistencia regular a las clases presenciales está correlacionada positivamente con un mejor rendimiento de los estudiantes en todas las asignaturas, y una mayor probabilidad de que se presenten a los exámenes. El porcentaje de estudiantes que superan las asignaturas crece con el porcentaje de asistencia a clase, casi de forma lineal. También se ha comprobado que la nota media de los estudiantes con una asistencia superior al 60% de las clases se mantiene por encima del 5.5, y en general la nota media obtenida se eleva a medida que el porcentaje de asistencia crece.

En cuanto al abordaje del estudio que presentan los estudiantes implicados en las asignaturas estudiadas, se ha mostrado que el 63.5% muestran un abordaje profundo del estudio. Este enfoque profundo implica una motivación intrínseca, preocupación por aprender adaptando sus estrategias para ello, conectando con ideas previas y logrando un aprendizaje satisfactorio, por lo que cabría esperar un porcentaje de asistencia a clase superior al 50% obtenido en este estudio. Este resultado es motivo para que el grupo de innovación DOCERE siga ahondando en los motivos por los que el abordaje profundo que manifiestan los estudiantes no revierte en un porcentaje mayor de asistencia a clase. Los profesores implicados en la recopilación de datos creemos que este estudio se puede utilizar como elemento motivador para el alumnado que comienza sus estudios, así como para dar información a los profesores sobre el estado de sus asignaturas en este aspecto.

En el futuro se pretenden desarrollar nuevas herramientas y mejores análisis para que el proceso de recopilación de datos sea más sencillo para los profesores y la obtención de estadísticas y resultados sea lo más automático posible. Igualmente se va a plantear el uso de encuestas no anónimas para el estudio de la motivación y abordaje de las asignaturas, como medio para evaluar su relación con los resultados académicos obtenidos.

REFERENCIAS

[1] Álvarez-Herrero, Juan-Francisco; Hernández Ortega, José .Formación *online* versus formación presencial: evaluación y rendimiento académico del alumnado universitario.. Tecnologías educativas y estrategias didácticas. UMA. ISBN: 978-84-1335-063-9.

[2] Zhu, X., Liu, J. Education in and After Covid-19: Immediate Responses and Long-Term Visions. Postdigit Sci Educ 2, 695–699 (2020). https://doi.org/10.1007/s42438-020-00126-3

[3] https://theconversation.com/la-universidad-que-viene-de-la-docencia-remota-de-emergencia-a-la-presencialidad-adaptada-140794

[4] Anees Majeed,, Muhammad Hussain,Muhammad Afzal, Syed Amir Gilani. Causes of Absenteeism among University Students EUROPEAN ACADEMIC RESEARCH Vol. VII, Issue 3/ June 2019 ISSN 2286-4822.www.euacademic.org

[5] Katherine Contreras, Carmen Caballero, Jorge Palacio y Ana María Pérez. Factores asociados al fracaso académico en estudiantes universitarios de Barranquilla (Colombia)

[6] Mokhtari S, Nikzad S, Mokhtari S, Sabour S, Hosseini S. Investigating the reasons for students' attendance in and absenteeism from lecture classes and educational planning to improve the situation. Journal of Educatin and Health Promotion 2021;10:221Álvarez-Herrero, Juan-Francisco; Hernández Ortega, José.Formación *online* versus formación presencial: evaluación y rendimiento académico del alumnado universitario. Tecnologías educativas y estrategias didácticas. UMA. ISBN: 978-84-1335-063-9

[7] Siobhan Lucey, Maria Grydaki. University attendance and academic performance: Encouraging student engagement**.** *Scott J Polit E* wileyonlinelibrary.com/journal/sjpe *con.* 2023;70:180–199. DOI: 10.1111/sjpe.12334

[8] Freiberg Hoffmann, A. & Fernández Liporace, M. M. (2016). Enfoques de aprendizaje en universitarios argentinos según el R-SPQ-2F: análisis de sus propiedades psicométricas. Revista Colombiana de Psicología, 25(2), xx-xx. doi: 10.15446/rcp.v25n2.51874

[9] Chien-Yuan Su, Cheng-Huan Chen. Investigating the effect of flipped learning, student question generation, and instrant response technologies on students' learning motivation, attitudes and engagement: A structural Equation Modeling. EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education, 2018, 14(6), 2453-2466. ISSN:1305-8223 (online). 1305-8215 (print). https://doi.org/10.29333/ejmste/89938

[10] Hernández Pina, F., Arán Jara, A., & Salmerón Pérez, H. (2012). Enfoques de aprendizaje y metodologías de enseñanza en la universidad. *Revista Iberoamericana De Educación*, *60*(3), 1. https://doi.org/10.35362/rie6031299

[11] Hernández, F; García, M y Maquilòn, J (2001) " Estudio empíric de los enfoques de aprendizaje de los estudiantes universitarios en función del perfil de su titulación (profundo vs superficial)". Universidad de Murcia. Disponible URL. http://www.uned.es/reop/pdfs/2001/12-22-2---303-Fensanta%20Hernandez%20Pina.PDF

[12] R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/.

2 AUTORES – AUTORES – AUTHORS

Paper ID	Autor	País	Afiliación
67	Abian Bentor Socorro Leránoz	Spain	Universidad Pública de Navarra
142	Adrián Rodríguez	Spain	Escuela Politécnica de la Almunia
185	Adriana Rocha	Argentina	Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Pcia. de Buenos Airesc
47	Agustín Martínez	Spain	Universidad de Alcalá
67, 120	Aitor Urrutia Azcona	Spain	Universidad Pública de Navarra
97	Aitzol Zuloaga	Spain	Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV/EHU
75, 84	Alba Correal Olmo	Spain	Student at University of Málaga
114	Alberto Jiménez Macías	Spain	University Carlos III of Madrid (UC3M)
40	Alberto Peinado	Spain	Universidad de Málaga, BIOSIP Research Group, Málaga
70	Alberto Pigazo Lopez	Spain	Universidad de Cantabria
139	Alberto Tellaeche Iglesias	Spain	University of Deusto
63	Alejandro Cruz Escabias	Spain	Universidad de Jaén
16	Alfonso Parreño Torres	Spain	Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad de Castilla-La Mancha. Albacete, Spain
21	Alfredo Gardel	Spain	Departamento de Electrónica. Universidad de Alcalá
130, 131, 132,133	Alfredo Pérez Vega-Leal	Spain	Universidad de Sevilla
21	Álvaro de la Llana	Spain	Departamento de Electrónica. Universidad de Alcalá
63	Álvaro Fernández Solas	Spain	Institute of Solar Research (DLR)
14	Álvaro Tormos Ferrando	Spain	Universitat Politècnica de València
137	Ana De Andrés	Spain	Universidad de Alcalá
157, 158	Ana Jiménez Martín	Spain	Universidad de Alcalá
40	Ana M. Barbancho	Spain	Universidad de Málaga, ATIC Research Group
139	Ana Macarulla Arenaza	Spain	University of Deusto
63	Ana María Fernández Ocaña	Spain	Universidad de Jaén

123	André Vaz da Silva Fidalgo	Portugal	Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP)
17	Andrés Quintero Zea	Colombia	Universidad EIA
122	Andrés Trujillo-León	Spain	Universidad de Málaga
55	Andrés Vivas	Colombia	Universidad del Cauca
11, 39	Ángel Dieguez	Spain	Universitat de Barcelona
13, 25, 26	Ángel Gaspar González	Spain	University of Jaen
157, 158	Ángel Javier Álvarez Miguel	Spain	Universidad de Alcalá
157, 158	Ángel Llamazares Llamazares	Spain	Universidad de Alcalá
66, 67, 120	Ángel María Andueza Unanua	Spain	Universidad Pública de Navarra
17	Ángela Sucerquia	Colombia	None
144	Anibal Cotrina	Brazil	Anibal Cotrina Atencio
11	Anna Vilà	Spain	Universitat de Barcelona
47	Antonio Da Silva	Spain	Universidad de Alcalá
98, 103	Antonio Dionisio Martínez-Pérez	Spain	Universidad de Zaragoza
129	Antonio García-Calabrés	Spain	Universidad de Jaén.
155	Antonio Martí-Campoy	Spain	Universitat Politècnica de València
51	Antonio Núñez	Spain	Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada (IUMA). Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
72	Arcadio Reyes-Lecuona	Spain	Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad de Málaga
97	Armando Astarloa	Spain	Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV/EHU
154	Aurora Gil de Castro	Spain	Universidad de Cordoba
154	Aurora Sáez Manzano	Spain	Universidad de Cordoba
69, 90, 99, 142	Belén Calvo	Spain	Universidad de Zaragoza
121	Camilo Quintáns Graña	Spain	Universidade de Vigo
21, 147	Carlos Cruz	Spain	Departamento de Electrónica. Universidad de Alcalá
86	Carlos De La Cruz Blas	Spain	IEEC department Public University of Navarre, Campus Arrosadia, Pamplona, Navarre
114	Carlos Delgado Kloos	Spain	University Carlos III of Madrid (UC3M)
166	Carlos Gilabert-Torres	Spain	Universidad de Jaén
110	Carlos J. Jiménez-Fernández	Spain	IMSE CNM(CSIC)/Universidad de Sevilla
44	Carlos Medrano-Sánchez	Spain	EduQTech, EUPT, c/Atarazana 2, 44003, Teruel

166	Carlos Robles-García	Spain	Universidad de Jaén
67	Carlos Ruíz Zamarreño	Spain	Universidad Pública de Navarra
45	Carlos Sánchez	Spain	Escuela Universitaria Politécnica de Teruel. Universidad de Zaragoza
172, 173	Carlos Vargas Salgado	Spain	Departamento de Ingeniería Eléctrica, IUIE Universitat Politecnica de Valencia, España
110	Carmen Baena-Oliva	Spain	Instituto de Microelectrónica de Sevilla/Universidad de Sevilla (CSIC-CNM)
179	Carola Hernández Hernández	Colombia	Profesor Asociado, Faculta de Ingenieria, Universidad de los Andes
185	Carolina Puglisi	Argentina	Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Pcia. de Buenos Aires
147	Carolina Toledano-Monge	Spain	University of Alcalá
61, 76, 165, 166	Catalina Rus Casas	Spain	Universidad de Jaén
55	Cecilia García	Spain	Universidad Politécnica de Madrid
67, 120	Cesar Elosua Aguado	Spain	Universidad Pública de Navarra
70	Christian Brañas Reyes	Spain	Universidad de Cantabria
118	Claudio Carretero	Spain	Universidad de Zaragoza
137	Concha Batanero	Spain	Universidad de Alcalá
12	Cristian Olguin Pinatti	Spain	Universitat Politècnica de València
147	Cristina Losada-Gutiérrez	Spain	University of Alcala
90, 99, 142	Daniel Eneriz	Spain	Universidad de Zaragoza
67	Daniel Leandro González	Spain	Universidad Pública de Navarra
111	Daniel Narbona-Miguel	Spain	Universidad de Sevilla
147	Daniel Pizarro	Spain	University of Alcalá
93	Daniel Rosas Cervantes	Spain	Universidad de Málaga
127, 128	Daniel Santamargarita	Spain	Universidad de Alcalá
178	Danyelle Mousinho Medeiros Santana	Brazil	Instituto Federal de Sergipe - Campus Aracaju
49	David Asiain Ansorena	Spain	Polytechnic University School of La Almunia (EUPLA)-University of Zaragoza
132	David Félix Hernández Formento	Spain	Universidad de Sevilla
147	David Fuentes-Jiménez	Spain	University of Alcalá
173	Dayan Ariadna Guzmán Bejarano	Brazil	Universidad Libre Grupo GINCE
90, 99, 142	Diego Antolín	Spain	Escuela Universitaria Politécnica de la Almunia de Doña Godina
20, 82	Diego Casado Mansilla	Spain	Universidad de Deusto
103	Diego Fabián Paredes Páliz	Ecuador	Universidad de Zaragoza

82	Diego López de Ipiña	Spain	Universidad de Deusto
120	Diego López Torres	Spain	Universidad Pública de Navarra
165	Dolores Eliche Quesada	Spain	Universidad de Jaén
174	Edson Barbosa Lisboa	Brazil	IFS - Instituto Federal de Sergipe
171	Eduardo Boemo	Spain	Escuela Politecnica Superior - Univ. Autónoma
154	Eduardo Cañete Carmona	Spain	Universidad de Cordoba
63	Eduardo Fernández Fernández	Spain	Universidad de Jaén
45	Eduardo Gil	Spain	Escuela Universitaria Politécnica de Teruel. Universidad de Zaragoza
111	Eduardo Hidalgo Fort	Spain	Universidad de Sevilla
154	Elena Gutiérrez Ballesteros	Spain	Universidad de Cordoba
109	Eliana Isabel Arango Zuluaga	Colombia	Departamento de Energía Eléctrica y Automática, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia
123	Elio San Cristóbal Ruiz	Spain	Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)
137	Elisa Rojas Sánchez	Spain	Universidad de Alcalá
16	Emilio J. Molina Martínez	Spain	Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad de Castilla-La Mancha. Ciudad Real, Spain
129	Emilio Muñoz-Cerón	Spain	Universidad de Jaén
14	Emilio Royo Carratalá	Spain	Universitat Politècnica de València
157	Enrique Santiso Gómez	Spain	Universidad de Alcalá
174	Erik Gabriel Teles dos Santos	Brazil	IFS - Campus aracaju
25, 26	Erika Ottaviano	Italy	Università degli studi di Cassino e del Lazio Meridionale
111	Esperanza María Suárez Sánchez	Spain	IES Virgen de Valme (Dos Hermanas, Sevilla)
57, 58	Esteban Sánchez Hernández	Spain	Universidad de Salamanca
140	Eva González Parada	Spain	University of Málaga
144	Ever Cifuentes	Peru	Ever Cifuentes
16	F. Javier López Alcolea	Spain	Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad de Castilla-La Mancha. Ciudad Real, Spain
172	Fabian Alonso Lara Vargas	Colombia	Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Monteria Grupo ITEM. IUIE Universitat Politecnica de Valencia, España
173	Fabian Alonso Lara Vargas	Colombia	Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Monteria Grupo ITEM. IUIE Universitat Politecnica de Valencia, España
130, 131, 132,133,145	Federico Barrero	Spain	Universidad de Sevilla

8, 171	Federico Favaro	Uruguay	Universidad de la República
58	Federico López Simón	Spain	Universidad de Salamanca
53	Federico Muñoz Babiano	Spain	UNIR
147	Felipe Espinosa	Spain	University of Alcala
123	Felix Garcia Loro	Spain	Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)
111, 146	Fernando Muñoz Chavero	Spain	University of Seville
95, 100	Fernando Vidal-Verdú	Spain	Universidad de Málaga
63	Florencia Almonacid Cruz	Spain	Universidad de Jaén
61	Francisco Muñoz-Rodríguez	Spain	Universidad de Jaén.
70	Francisco Azcondo Sánchez	Spain	Universidad de Cantabria
98, 103	Francisco Aznar	Spain	Centro Universitario de la Defensa Zaragoza
146	Francisco Barrero Serrano	Spain	Universidad de Sevilla
127, 128	Francisco Huerta	Spain	Universidad de Alcalá
75	Francisco Javier Gómez Ríos	Spain	University of Málaga
84	Francisco Javier Ríos Gómez	Spain	Universidad de Málaga
166	Francisco Muñoz Rodríguez	Spain	Universidad de Jaén
155	Francisco Rodríguez-Ballester	Spain	Universitat Politècnica de València
171	Francisco Veirano	Uruguay	Universidad de la República
72	Francisco Velasco-Álvarez	Spain	Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad de Málaga
185	Franco Déber	Argentina	Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Pcia. de Buenos Aires
109	Freddy Bolaños Martínez	Colombia	Departamento de Energía Eléctrica y Automática, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia
123	Frederico Lázaro Jacob	Portugal	Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP)
166	Gabino Jiménez-Castillo	Spain	Universidad de Jaén
8	Gastón García González	Uruguay	Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República
63	Genoveva Carmen Martos de la Fuente	Spain	Universidad de Jaén
62	Germán Cano	Spain	University of Seville
137	Germán Ros	Spain	Universidad de Alcalá
68	Gonzalo Guillamón Martín	Spain	Universidad de Málaga
98	Gonzalo López-Gómez	Spain	Universidad de Zaragoza
45	Guillermo Azuara	Spain	Escuela Universitaria Politécnica de Teruel. Universidad de Zaragoza

45	Guillermo Palacios	Spain	Escuela Universitaria Politécnica de Teruel. Universidad de Zaragoza
74	Guillermo Palacios Navarro	Spain	Universidad de Zaragoza
137	Hilario Gómez Moreno	Spain	Universidad de Alcalá
139	Hugo Landaluce Simón	Spain	University of Deusto
78, 139	Ignacio Angulo Martínez	Spain	Universidad de Deusto
21	Ignacio Bravo	Spain	Departamento de Electrónica. Universidad de Alcalá
118	Ignacio Lope	Spain	Universidad de Zaragoza
177	Ignacio Zaradnik	Argentina	Universidad Nacional de la Matanza
174	Inajá de Sousa	Brazil	UFS - Universidade Federal de Sergipe
44, 45	Inmaculada Plaza García	Spain	Escuela Universitaria Politécnica de Teruel. Universidad de Zaragoza
97	Íñigo Kortabarria	Spain	Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV/EHU
40	Isabel Barbancho	Spain	Universidad de Málaga, ATIC Research Group, 29071 Málaga
154	Isabel Santiago Chiquero	Spain	Universidad de Cordoba
9	Iván de Los Santos Díaz	Spain	University of Malaga
174	Ivanildo de Souza Maciel Júnior	Brazil	IFS - Instituto Federal de Sergipe
86	Jaime Cid Monjaraz	Mexico	Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
16	Jaime García Jiménez	Spain	Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad de Castilla-La Mancha. Ciudad Real, Spain
97	Jaime Jiménez	Spain	Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV/EHU
180	Jason Gaona Peña	Colombia	Estudiante programa Tecnología en Electrónica, Corporación Universitaria Minutos de Dios-UNIMINUTO
70	Javier Diaz Rodríguez	Spain	Universidad de Cantabria
6, 38	Javier Diz Bugarín	Spain	Teacher of the electronics departament of IES Escolas Proval
20, 78, 139	Javier García Zubía	Spain	Universidad de Deusto
67	Javier Goicoechea Fernández	Spain	Universidad Pública de Navarra
101	Javier Hormigo	Spain	Dept. Computer Architecture, University of Malaga
12	Javier Ibáñez Civera	Spain	Universitat Politècnica de València
137	Javier Macías Guarasa	Spain	Universidad de Alcalá
106	Javier Malo Gómez	Spain	Universidad Politécnica de Madrid
44	Javier Martínez-Cesteros	Spain	EduQTech, EUPT, c/Atarazana 2, 44003, Teruel

16	Javier Vázquez del Real	Spain	Universidad de Castilla-La Mancha. Ciudad Real
78	Javier Vicente Sáez	Spain	Universidad de Deusto
118	Jesus Acero	Spain	Universidad de Zaragoza
62	Jesús David Barrionuevo Vallecillo	Spain	University of Seville
97	Jesús Lázaro	Spain	Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV/EHU
49	Jesús Ponce de León	Spain	Polytechnic University School of La Almunia (EUPLA)-University of Zaragoza
11, 39	Joan Canals	Spain	Universitat de Barcelona
82	Joan Navarro Martín	Spain	La Salle
179, 180	Jonathan Álvarez Ariza	Colombia	Facultad de ingeniería, Corporación Universitaria Minutos de Dios-UNIMINUTO
129	Jorge Aguilera	Spain	Universidad de Jaén
69	Jorge Cuartero	Spain	Universidad de Zaragoza
57, 58	Jorge Herrera Santos	Spain	Universidad de Salamanca
111	Jorge Jiménez-Sánchez	Spain	Universidad de Sevilla
121	Jorge Marcos Acevedo	Spain	Universidade de Vigo
46, 68	Jorge Romero Sánchez	Spain	University of Malaga
139	José Ángel Gutierrez Olabarria	Spain	University of Deusto
46, 68	José Antonio Hidalgo-López	Spain	Universidad de Málaga
122	José Antonio Sánchez-Durán	Spain	Universidad de Málaga
116, 140	José Borja Castillo Sánchez	Spain	University of Málaga
17	José David López	Colombia	Universidad de Antioquia
93	José Fernández Ramos	Spain	Universidad de Málaga
180	José Garzón Soto	Colombia	Estudiante programa Tecnología en Electrónica, Corporación Universitaria Minutos de Dios-UNIMINUTO
129	José Hidalgo-Peña	Spain	Universidad de Jaén
139	José Ignacio García-Quintanilla	Spain	University of Deusto
21	José Luis Lázaro	Spain	Departamento de Electrónica. Universidad de Alcalá
137	José Luis Martín Sánchez	Spain	Universidad de Alcalá
145	José Luis Mora	Spain	Universidad de Sevilla
6, 38	José Luis Rodríguez Fernández	Spain	IES Escolas Proval
165	José Luis Sáchez Jiménez	Spain	Universidad de Jaén
137	José Manuel Arco Rodríguez	Spain	Universidad de Alcalá

140	José Manuel Cano García	Spain	University of Málaga
63	José Manuel Fernández López	Spain	Universidad de Jaén
147	José Manuel Villadangos	Spain	University of Alcalá
111, 146	José María Hinojo Montero	Spain	Universidad de Sevilla
71, 116	José Miguel Galeas Merchán	Spain	University of Málaga
25	José Vicente Muñoz-Diez	Spain	Universidad de Jaén
153	José-V. Benlloch-Dualde	Spain	Universitat Politècnica de València. DISCA-ETSINF
116	Juan A Rodríguez	Spain	University of Málaga
129	Juan de la Casa	Spain	Universidad de Jaén.
61, 76, 165	Juan Domingo Aguilar	Spain	Universidad de Jaén.
183	Juan Emilo Sanabria Sanabria	Colombia	Profesor de Planta Ingeniería Electrónica
13	Juan Francisco Canalejo	Spain	University of Jaen
166	Juan I. Fernández-Carrasco	Spain	Universidad de Jaén
47	Juan Ignacio García	Spain	Universidad de Alcalá
127, 128	Juan José Pérez	Spain	Universidad de Alcalá
137	Juan Manuel Miguel Jiménez	Spain	Universidad de Alcalá
136	Juan Manuel Santos Gago	Spain	atlanTTic-Universidade de Vigo
171	Juan Oliver	Uruguay	Universidad de la Republica
118	Juan Pablo Martínez	Spain	Universidad de Zaragoza
9	Juan Pedro Peña Martín	Spain	University of Malaga
153	Juan-Luis Posadas-Yagüe	Spain	Universitat Politècnica de València. DISCA-ETSINF
122	Julián Castellanos-Ramos	Spain	Universidad de Málaga
62	Julián Viejo Cortés	Spain	University of Seville
187	Julio F. Golin	Brazil	Federal Institute of Santa Catarina
157, 158	Julio Pastor Mendoza	Spain	Universidad de Alcalá
171	Julio Pérez Acle	Uruguay	Universidad de la Republica
139	Julio Revilla Ocejo	Spain	University of Deusto
153	Laura Grindei	Romania	Technical University of Cluj
187	Lauro Schlemper	Brazil	Federal Institute of Santa Catarina
171	Leandro Diaz	Uruguay	Universidad de la República
177	Leandro Jaimes Soria	Argentina	Universidad Nacional de la Matanza
61, 76	Leocadio Hontoria García	Spain	Universidad de Jaén

87	Leyre Escribano	Spain	Universidad Pública de Navarra
120	Leyre Ruete Ibarrola	Spain	Universidad Pública de Navarra
40	Lorenzo J. Tardón	Spain	Universidad de Málaga, ATIC Research Group
136	Luis Eulogio Anido Rifón	Spain	atlanTTic-Universidade de Vigo
183	Luis Fernando Rico Riveros	Colombia	Director Ingeniería Electrónica
12, 14	Luis Gil Sánchez	Spain	Universitat Politècnica de València
13	Luis Miguel Nieto	Spain	University of Jaen
131, 133	Manuel G. Satué	Spain	Universidad de Sevilla
62	Manuel J. Bellido	Spain	University of Seville
136	Manuel J. Fernández Iglesias	Spain	atlanTTic-Universidade de Vigo
140	Manuel Maestre Nadal	Spain	University of Málaga
130, 131, 132, 133, 145, 146	Manuel Perales	Spain	University of Seville
47	Manuel Prieto	Spain	Universidad de Alcalá
51	Manuel Rodríguez	Spain	Universidad de La Laguna
110	Manuel Valencia-Barrero	Spain	IMSE-CNM (CSIC)/Universidad de Sevilla
106	Manuel Vázquez Rodríguez	Spain	Universidad Politécnica de Madrid
71, 72	Margarita Ruiz García	Spain	University of Málaga
131, 132	María Ángeles Serrano	Spain	Universidad de Sevilla
12	María Auxiliadora Recasens Bellver	Spain	Universitat Politècnica de València
178	Maria Carolina Aragão de Andrade	Brazil	Universidade Federal de Sergipe
165	María Dolores La Rubia García	Spain	Universidad de Jaén
121	María Dolores Valdés Peña	Spain	Universidade de Vigo
67	María José Erro Betrán	Spain	Universidad Pública de Navarra
87	Maríajosé Erro	Spain	Universidad Pública de Navarra
45	Mariano Ube	Spain	Escuela Universitaria Politécnica de Teruel. Universidad de Zaragoza
137	Marisol Escudero	Spain	UAH
121	Marta Gómez Fernández	Spain	Universidade de Vigo
147	Marta Marron-Romera	Spain	University of Alcalá
116	Martin González García	Spain	University of Málaga
136	Martin Liz Domínguez	Spain	atlanTTic-Universidade de Vigo
136	Martin Llamas Nistal	Spain	atlanTTic-Universidade de Vigo

137	Miguel Ángel García Garrido	Spain	Universidad de Alcalá
161	Miguel Ángel García Ruiz	Mexico	Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey
172	Miguel Ángel Ortiz Padilla	Colombia	Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Monteria Grupo ITEM Monteria, Cordoba
58	Miguel Ángel Vega Barroso	Spain	Universidad de Salamanca
19	Miguel Ferrando-Rocher	Spain	Universitat Politècnica de València
133	Mohadmad Hamdan	Spain	Universidad de Sevilla
136	Moisés R. Pacheco Lorenzo	Spain	atlanTTic-Universidade de Vigo
109	Mónica Ayde Vallejo Velásquez	Colombia	Departamento de Energía Eléctrica y Automática, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia
172	Natali Rocío Galeano Gaviria	Colombia	Colegio La Salle Montería
133	Nicolás Martínez	Spain	Universidad de Sevilla
69, 90, 99, 142	Nicolas Medrano	Spain	Universidad de Zaragoza
157, 158	Noelia Hernández Parra	Spain	Universidad de Alcalá
119	Noelia Marzal	Spain	Universidad de Malaga
45	Noemí Gil	Spain	Escuela Universitaria Politécnica de Teruel. Universidad de Zaragoza
17	Norman César Mercado Cruz	Colombia	Universidad de Antioquia
82	Oihane Gómez Carmona	Spain	Universidad de Deusto
20	Olga Dziabenko	Spain	University of Deusto DeustoTech-Faculty of Engineering
11, 39	Oscar Alonso	Spain	University of Barcelona
122	Óscar Oballe-Peinado	Spain	Universidad de Málaga
47	Óscar Rodríguez	Spain	Universidad de Alcalá
45	Pablo Díaz	Spain	Escuela Universitaria Politécnica de Teruel. Universidad de Zaragoza
47	Pablo Parra	Spain	Universidad de Alcalá
53, 70, 154	Paula Lamo Anuarbe	Spain	Universidad Internacional de la Rioja
62	Paulino Ruiz de Clavijo Vázquez	Spain	University of Seville
103	Pedro A. Martínez Martínez	Spain	Universidad de Zaragoza
157	Pedro Alfonso Revenga de Toro	Spain	Universidad de Alcalá
111	Pedro Blanco-Carmona	Spain	Universidad de Sevilla
187	Pedro Giassi Jr.	Brazil	Federal Institute of Santa Catarina
157, 158	Pedro Gil-Jiménez	Spain	Universidad de Alcalá
166	Pedro Gómez Vidal	Spain	Universidad de Jaén

51	Pedro Hernández-Fernández	Spain	Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada (IUMA). Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
114	Pedro J. Muñoz-Merino	Spain	University Carlos III of Madrid (UC3M)
63	Pedro Jesús Pérez Higueras	Spain	Universidad de Jaén
51	Pedro P. Carballo	Spain	Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada (IUMA), Universidad de Las Palmas
74	Pedro Ramos Lorente	Spain	Universidad de Zaragoza
16	Pedro Roncero-Sánchez Elipe	Spain	Universidad de Castilla-La Mancha. Ciudad Real
25, 26	Pierluigi Rea	Italy	Pierluigi Rea Università degli studi di Cagliari
110	Pilar Parra Fernández	Spain	Instituto de Microelectrónica de Sevilla/Universidad de Sevilla (CSIC-CNM)
95, 100	Rafael Navas-Gonzalez	Spain	Universidad de Málaga
46, 68	Raquel Fernández Ramos	Spain	University of Malaga
45	Raquel Lacuesta	Spain	Escuela Universitaria Politécnica de Teruel. Universidad de Zaragoza
74	Raúl Martín Ferrer	Spain	Universidad de Zaragoza
58	Raúl Muñoz Sánchez	Spain	Universidad de Salamanca
178	Renan Oliveira Silva	Brazil	Instituto Federal de Sergipe - Campus Aracaju
22	Renso Mardu Molano Pulido	Colombia	ESUFA
53	Ricardo S. Alonso	Spain	UNIR
185	Roberto de la Vega	Argentina	Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Pcia. de Buenos Aires
177	Rodrigo Spano	Argentina	Universidad Nacional de la Matanza
183	Ronald Steven Rodríguez Rodríguez	Colombia	Profesor de Planta Ingeniería Electrónica
173	Rosa Liliana Tarazona Caceres	Colombia	Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Monteria Grupo ITEM
70	Rosario Casanueva Arpide	Spain	Universidad de Cantabria
21	Rubén Gil	Spain	Departamento de Electrónica. Universidad de Alcalá
14	Salvador Coll Arnau	Spain	Universitat Politècnica de València
103	Santiago Celma	Spain	Universidad de Zaragoza
55	Santiago Rosero	Colombia	Universidad del Cauca
86, 87	Santiago Tainta Ausejo	Spain	Universidad Pública de Navarra
153	Sara Blanc	Spain	Universitat Politècnica de València. DISCA-ETSINF
119	Sebastián Martin	Spain	Universidad de Malaga
47	Sebastián Sánchez	Spain	Universidad de Alcalá

36	Sergio Gallardo	Spain	CENTRO DE LA RED DE EXCELENCIA DE FP - CIFP POLITÉCNICO DE MURCIA
180	Sergio González Gil	Colombia	Profesor Asistente, Facultad de ingeniería, Corporación Universitaria Minutos de Dios-UNIMINUTO
40	Sergio Guillen	Spain	Universidad de Málaga, ATIC Research Group, 29071 Málaga
137	Sergio Lafuente	Spain	University of Alcala
106	Sergio López Gregorio	Spain	Universidad Politécnica de Madrid
11, 39	Sergio Moreno	Spain	University of Barcelona
129	Sergio Moreno-Buesa	Spain	Universidad de Jaén
185	Silvano Rossi	Argentina	Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Pcia. de Buenos Aires
137	Sira Palazuelos Cagigas	Spain	Universidad de Alacalá
13	Slawomir Gulkowski	Poland	Lublin University of Technology
19	Stephan Marini	Spain	Universidad de Alicante
20	Unai Aguilera	Spain	University of Deusto DeustoTech-Faculty of Engineering
20, 139	Unai Hernández Jayo	Spain	University of Deusto DeustoTech-Faculty of Engineering
153	Vicent Lorente Garcés	Spain	Universitat Politècnica de València. DISCA-ETSINF
13	Vicente Muñoz	Spain	University of Jaen
61, 76	Vicente Raya Narváez	Spain	IES Las Salinas. Fuengirola (España)
183	Víctor Hugo Bernal Tristancho	Colombia	Profesor de Planta Ingeniería Electrónica
11	Víctor Moro	Spain	Universitat de Barcelona
174	Vinicius Cunha dos Santos	Brazil	IFS - Campus aracaju
82	Xavier Solé-Beteta	Spain	La Salle - Universitat Ramon Llull