



Evaluación del impacto ergonómico de exoesqueletos en puestos laborales. Metodología y procedimiento de análisis

Fermín Basso Della Vedova,
Ignacio Bermejo Bosch,
Juan López Pascual,
Jesús Sellés Vizcaya,
Alicia Piedrabuena Cuesta,
Juanma Belda Lois,
Mario Lamas Rodríguez,
Mercedes Sanchis Almenara

Instituto de Biomecánica (IBV).
Universitat Politècnica de
València. Edificio 9C.
Camino de Vera s/n.
(46022) Valencia. España

Los exoesqueletos son una solución ergonómica para reducir la carga física de los segmentos corporales que entran en juego durante la realización de ciertas tareas, sobre todo en entornos industriales. Es importante realizar un análisis biomecánico cuando se incorpora un exoesqueleto en un puesto de trabajo, ya que permite evaluar tanto las mejoras y ventajas que supone su introducción en los puestos de trabajo como los riesgos que podría conllevar su implementación. En este análisis biomecánico se debe registrar la actividad muscular, los movimientos y las fuerzas de reacción de los segmentos corporales principalmente involucrados en la realización de la actividad laboral. El Instituto de Biomecánica (IBV) sigue un procedimiento que involucra el estudio de los movimientos en el puesto de trabajo, la definición de variables biomecánicas, la realización de pruebas y el análisis de los resultados. Para realizar este análisis, el IBV utiliza Kinemov/IBV, una herramienta que permite el registro sincronizado de las diferentes variables necesarias para el análisis biomecánico de exoesqueletos. En conclusión, el estudio biomecánico es fundamental para evaluar la idoneidad de incorporar exoesqueletos en entornos laborales y Kinemov/IBV es una herramienta útil para llevar a cabo este análisis.



INTRODUCCIÓN

Los esfuerzos requeridos para la realización de ciertas tareas laborales, pueden acarrear incomodidad, molestias o incluso enfermedades profesionales.

Como posible ayuda para la mejora del confort y la reducción de trastornos musculoesqueléticos, en los últimos años se han introducido, principalmente en el sector industrial, los exoesqueletos pasivos, cuyo objetivo es reducir la carga física de las zonas corporales que entran en juego durante la realización de algunas tareas que implican manipulación manual de cargas o posturas forzadas, como puedan ser la manipulación de cargas, o aquellas que provoquen posturas forzadas.

No obstante, la introducción de exoesqueletos en puestos de trabajo conlleva una serie de aspectos que deben ser tenidos en cuenta antes de su implantación. Por un lado, es importante conocer las zonas corporales que protege, en qué medida lo hace y qué otras zonas corporales se ven afectadas. Esto implica que es necesario un estudio biomecánico donde se pueda analizar tanto la actividad muscular como las posturas y fuerzas que realiza la persona trabajadora con y sin la ayuda del exoesqueleto. Por otro lado, también es básico conocer la percepción del usuario del exoesqueleto: si le resulta cómodo, si podría incorporarlo a su puesto de trabajo, etc. De esta manera, se consigue un ajuste completo entre puesto de trabajo, persona trabajadora y exoesqueleto.

El presente artículo se centra en explicar el análisis biomecánico en la incorporación de exoesqueletos en puestos de trabajo.





EL RETO

En la actualidad, es necesario desarrollar análisis biomecánicos para cuantificar el impacto ergonómico del uso de un exoesqueleto en el contexto laboral.

Sin embargo, estos análisis son complejos y requieren tiempo para su realización. Esta situación se debe a que es necesario poner a punto tecnologías de registro diversas, sincronizar los registros, definir los modelos biomecánicos adecuados y programar el cálculo de las variables de interés, entre otras actividades.

En el presente artículo se presenta la metodología, procedimientos y métricas para el análisis biomecánico.

El análisis biomecánico se hace posible gracias al registro y análisis de tres fuentes de información:

- La señal de electromiografía (EMG), que permite registrar la señal fisiológica procedente de la actividad eléctrica de los músculos y nervios que los controlan. Para poder registrarla, se colocan electrodos de superficie en la piel de la persona, que registran la actividad eléctrica de los músculos durante el descanso y la contracción muscular.
- El análisis de movimientos, para poder registrar rotaciones y desplazamientos de los diferentes segmentos

corporales que actúan durante la ejecución de una tarea. De aquí se pueden obtener flexiones y rangos de movimiento articular, que permiten evaluar las posturas corporales durante la realización de la tarea. Se puede medir mediante sensores inerciales o mediante fotogrametría.

- Fuerzas de reacción, registradas con plataformas de fuerza o plantillas. Las fuerzas de reacción son útiles para poder calcular modelos de estimación de fatiga muscular y esfuerzos musculoesqueléticos.

El IBV utiliza como plataforma de registro y análisis biomecánico el sistema Kinemov/IBV, que permite integrar las anteriores tecnologías. En el contexto del análisis biomecánico de exoesqueletos, Kinemov/IBV permite registrar todas las métricas necesarias para llevar a cabo este tipo de análisis de manera sincronizada y con buena precisión. La herramienta permite registrar análisis de movimientos, tanto con fotogrametría como con sensores inerciales, señal de EMG y fuerzas de reacción del suelo, mediante plataformas de fuerza. La aplicación puede ser utilizada tanto en entorno de laboratorio (versión fotogrametría), como en entornos de trabajo directamente en el puesto de trabajo (versión sensores inerciales).



PROCEDIMIENTO DE UN ANÁLISIS BIOMECÁNICO

Para poder llevar a cabo el análisis biomecánico del uso de un exoesqueleto en un puesto de trabajo, es necesario definir un procedimiento de cara a poder identificar los factores de riesgo que puedan desembocar en lesiones y trastornos musculoesqueléticos. A continuación, se define cuál es la metodología que sigue el IBV una vez ha sido seleccionado el exoesqueleto y el puesto de trabajo a analizar.

Fase 1. Estudio de los movimientos llevados a cabo en el puesto de trabajo

El primer paso es realizar un análisis del puesto de trabajo. Para ello, se visualiza el puesto de trabajo donde se va a

incorporar el exoesqueleto y se estudian los movimientos que son necesarios para poder realizar las tareas (Figura 1).

Una vez observados y estudiados los movimientos que se llevan a cabo, detectamos las variables biomecánicas que merecen ser estudiadas para evaluar ergonómicamente el puesto de trabajo. Los parámetros seleccionados suelen estar relacionados con las zonas corporales más afectadas y en riesgo de sufrir trastornos musculoesqueléticos.

Por ejemplo, en los análisis biomecánicos suele ser habitual obtener los percentiles en la activación muscular como variable biomecánica a estudiar. Con esta variable se puede observar el grado de activación que tiene el músculo y



Figura 1

Ejemplo de un puesto de trabajo donde la persona trabajadora está realizando una postura forzada.



durante cuánto tiempo se producen estas activaciones. Otro ejemplo de variable biomecánica que suele estudiarse es la flexión máxima de alguna región corporal sobre la que actúe el exoesqueleto. De esta manera, se identifican las diferencias entre usar exoesqueleto y no usarlo a nivel postural, o si el uso de exoesqueletos supone menos libertad de movimientos en las personas trabajadoras que hagan uso de él.

Fase 2. Diseño de un protocolo de medidas

Previo al inicio de los registros es necesario definir el protocolo de medida. En esta fase es importante tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Tareas a reproducir. El protocolo de medida consiste principalmente en reproducir las tareas críticas en un laboratorio o en el puesto real (Figura 2).
- Condiciones de análisis. Habitualmente cada sujeto se analiza en las mismas condiciones utilizando el exoesqueleto y sin la ayuda del dispositivo. De esta forma, reducimos los sesgos.
- Métricas biomecánicas y modelo biomecánico: El proceso de selección de las métricas biomecánicas y el modelo biomecánico es iterativo. En función del previsible efecto del exoesqueleto, se seleccionarán las métricas biomecánicas más adecuadas. Por otro lado, cada modelo biomecánico permitirá obtener unas métricas concretas. Por tanto, es necesario iterar hasta conseguir un modelo biomecánico viable que ofrezca las variables

más adecuadas. Kinemov/IBV nos ofrece los modelos biomecánicos disponibles, cómo instrumentar al sujeto y qué tipo de variables se pueden calcular para facilitar la elección.

Figura 2

Reproducción de una tarea de manipulación de 3 tipos de carga en un laboratorio.





Fase 3. Ejecución del estudio

Una vez ya hemos seleccionado todos los detalles del estudio, el siguiente paso es realizar las medidas. El procedimiento es el siguiente:

1. Generar un nuevo registro en el *software* Kinemov/IBV para poder gestionar todas las medidas que se han realizado en el sujeto y controlar todos los datos relevantes de la misma.
2. Seleccionar el modelo biomecánico.
3. Instrumentar al sujeto siguiendo las indicaciones del *software*.
4. Calibrar al sujeto instrumentado (Figura 3).
5. Realizar el registro de cada una de las tareas seleccionadas en las condiciones definidas (con y sin exoesqueleto).

Fase 4. Análisis de resultados

En las primeras medidas o en las pruebas piloto, es habitual que el usuario realice un proceso iterativo en el que vaya visualizando distintos tipos de tablas, gráficos y variables en función de los hallazgos que va encontrando. Este proceso se realiza en la pantalla de análisis de Kinemov/IBV puesto que permite seleccionar las variables de interés, el formato de visualización y diversos ajustes para facilitar el análisis

Figura 3

Ejemplo de calibración con Kinemov/IBV.





de forma automática y en tiempo real (Figura 4). De esta forma, el usuario selecciona de forma sencilla los gráficos y parámetros que va a utilizar para todas las medidas de su estudio. La usabilidad del programa hace que el perfil del usuario del programa no necesariamente tenga que ser experto en modelación biomecánica. El programa está pensado para que perfiles sanitarios y técnicos de prevención de riesgos laborales, también puedan hacer uso de la herramienta.

Tras cada una de las medidas realizadas, es recomendable visualizar las métricas biomecánicas definidas con Kinemov/IBV y revisar de forma cualitativa los resultados. De esta manera, se garantiza que no hay errores de ningún tipo. Este trabajo suele ser rápido puesto que en la fase piloto

ya se han seleccionado los gráficos, tablas y formatos a mostrar con la herramienta.

En la figura 4 se muestra un ejemplo de los diferentes resultados que ofrece la herramienta Kinemov/IBV. En primer lugar, puede observarse el movimiento registrado por marcadores de fotogrametría junto con el movimiento real registrado por cámaras de documentación. En la parte superior derecha, puede observarse el resultado de la señal de EMG de diferentes grupos musculares registrados durante el movimiento, todos ellos perfectamente sincronizados. En la parte inferior de la imagen, se pueden observar los ángulos articulares calculados a partir de los marcadores (izquierda), así como lo registrado por las plataformas de fuerza (derecha).

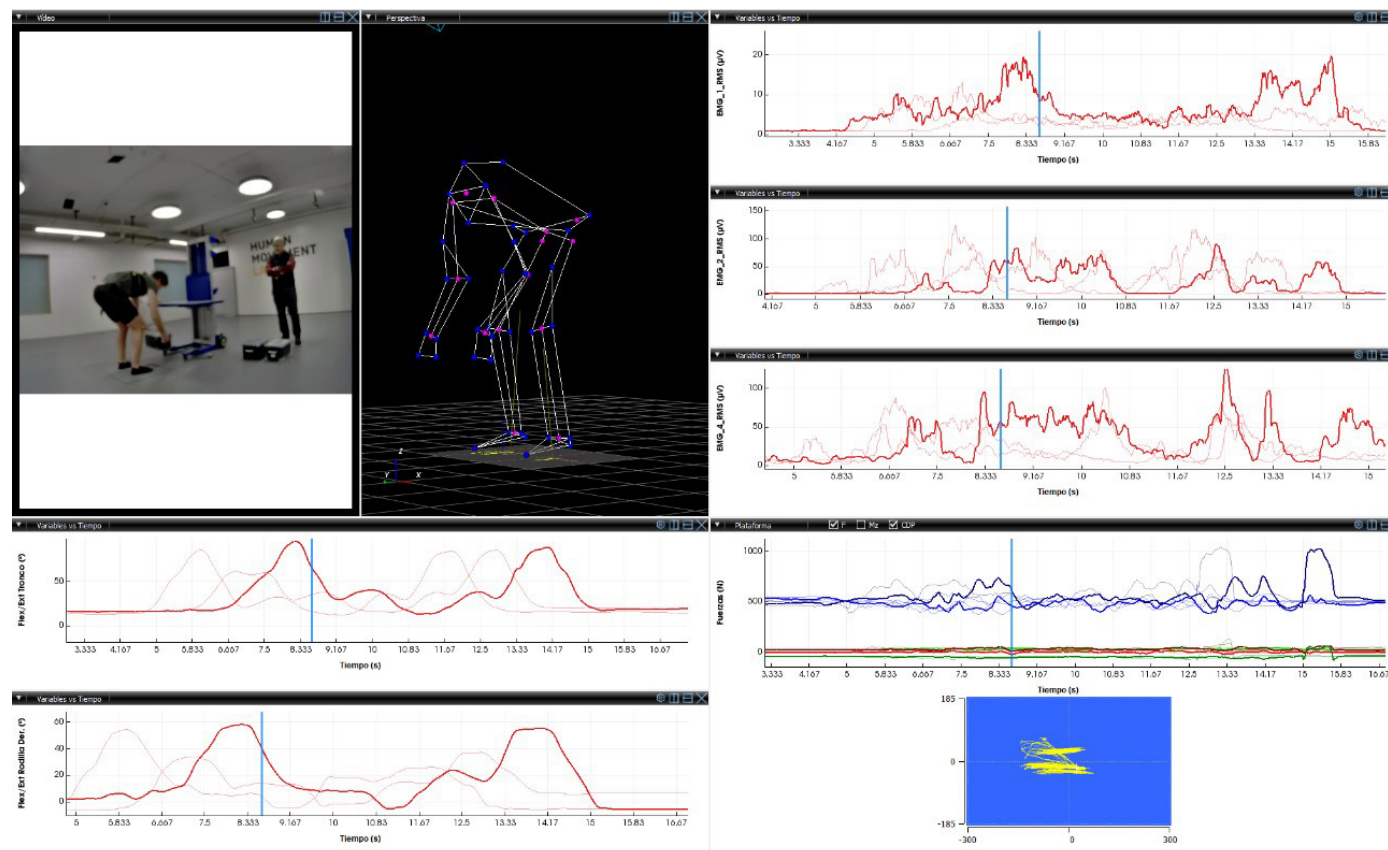


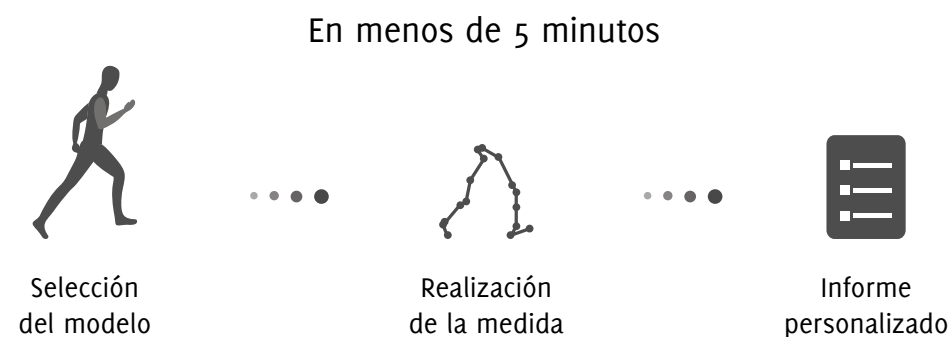
Figura 4

Ventana de análisis del programa Kinemov/IBV.



Una vez finalizado el análisis preliminar, se puede generar un informe automático dentro de Kinemov/IBV con los datos y gráficos seleccionados. Una buena práctica es generar plantillas de informe a través de Kinemov/IBV. Así, cuando analizamos un nuevo estudio, solo tenemos que cargar la plantilla para que nos muestre los datos y gráficos seleccionados.

A parte de este tipo de resultados, Kinemov/IBV permite exportar los datos obtenidos por los diferentes sistemas de registro, por si se quiere hacer análisis un más pormenorizado de esos datos. Esto es de utilidad para el tipo de análisis que realizamos en el IBV, donde normalmente planteamos análisis más complejos a partir de scripts programados en Excel, SPSS, R, Python, OpenSIM o Anybody, entre otros. Por ejemplo, el IBV ha desarrollado un modelo biomecánico mediante el cual, a partir de la introducción de los datos de movimiento y medidas antropométricas de los participantes en el estudio, es posible realizar simulaciones de las que extraer información que no es posible medir de forma directa durante el desarrollo del estudio, como por ejemplo las cargas articulares.



Fase 5. Discusión de resultados y conclusiones

Una vez finalizado el estudio de campo, se analizan de forma conjunta los resultados obtenidos de las medidas objetivas y de la información subjetiva.

Desde la perspectiva de las pruebas objetivas, es habitual encontrar algunos parámetros que mejoran gracias al uso del exoesqueleto y que, por tanto, reducen el impacto negativo del puesto de trabajo. Sin embargo, también es corriente que algunos aspectos empeoren con el uso del exoesqueleto. Por ese motivo, es fundamental cuantificar los beneficios e inconvenientes para tomar una decisión sobre la implantación de un exoesqueleto.

Por otro lado, la valoración subjetiva es clave para conseguir éxito en la implantación de un exoesqueleto en una empresa. Si aspectos como el confort, el aprendizaje, el ajuste del dispositivo o la usabilidad no son tenidos en cuenta es probable que fracase el proyecto de implantación.

Figura 5

Esquema de las fases de uso de Kinemov.



CONCLUSIONES

En la actualidad, es necesario realizar análisis biomecánicos del impacto de los exoesqueletos en los puestos de trabajo antes de implantarlos. Estos estudios permiten estudiar diferentes aspectos, como el diseño de los dispositivos, la fatiga muscular que sufren los segmentos que intervienen o incluso para cuantificar el exceso de fatiga muscular.

Además de la información biomecánica, existen otros datos, como los subjetivos, que son necesarios para realizar

una evaluación completa del exoesqueleto en un puesto concreto.

Siguiendo un procedimiento de evaluación bien definido, se puede objetivar el impacto de un exoesqueleto en un puesto de trabajo.

Recomendamos el uso de tecnologías de análisis como Kinemov/IBV que permiten registrar y analizar los datos más relevantes de una forma sencilla y ágil. □