

# Desafíos en la implementación de exoesqueletos ocupacionales: un retorno de experiencia en contextos reales de trabajo

Challenges in the implementation of occupational exoskeletons: an experience report from real work settings

Yaniel Torres<sup>1,2</sup>  0000-0002-9825-9437

Israel Benavides<sup>3</sup>

Gustavo Rosal<sup>4,5</sup>  0000-0002-2848-5746

<sup>1</sup>Universidad de Antioquia, Facultad Nacional de Salud Pública, Medellín, Antioquia, Colombia.

<sup>2</sup>École de technologie supérieure, Département de génie mécanique, Montréal, Québec, Canadá.

<sup>3</sup>Ford-Werke GmbH, Colonia, Renania del Norte-Westfalia, Alemania.

<sup>4</sup>PrevenControl, Terrassa, Barcelona, España.

<sup>5</sup>Asociación Española de Ergonomía, Gijón, Asturias, España.

## Fechas · Dates

Recibido: 24/08/2026

Aceptado: 15/10/2026

Publicado: 27/10/2026

## Correspondencia · Corresponding Author

Yaniel Torres

yaniel.torres@udea.edu.co

## Resumen

Los trastornos musculoesqueléticos siguen siendo la principal enfermedad laboral en diversas regiones del mundo. Los exoesqueletos ocupacionales se perfilan como una alternativa para la gestión del riesgo biomecánico, pero su tránsito del laboratorio al puesto de trabajo sigue siendo complejo. Este artículo ofrece un retorno de experiencia sobre la evaluación e implementación de estos dispositivos, elaborado por tres profesionales de la ergonomía y los factores humanos a partir de intervenciones que han involucrado a más de 600 trabajadores y más de una veintena de modelos, en seis sectores de actividad de Colombia, Alemania y España. Tras un panorama del estado de la tecnología, se identifican diez desafíos prácticos: peso, discomfort térmico, fricción cutánea, complejidad de colocación, higiene, volumen, curva de adaptación, restricción del movimiento, ajuste y tallas, y factores psicosociales. Se concluye que el acompañamiento ergonómico es condición necesaria para trasladar el potencial biomecánico a beneficios reales y sostenidos.

**Palabras clave:** Dispositivo Exoesqueleto; Enfermedades Musculoesqueléticas; Enfermedades Profesionales; Ergonomía; Salud Laboral; Lugar de Trabajo.

## Abstract

Musculoskeletal disorders remain the leading occupational disease in many regions of the world. Occupational exoskeletons are emerging as an alternative for managing biomechanical risk, yet their transition from the laboratory to the workplace remains difficult. This article offers an experience report on the evaluation and implementation of these devices, prepared by three ergonomics and human factors professionals and drawing on interventions involving more than 600 workers and over twenty different models, across six sectors of activity in Colombia, Germany and Spain. After an overview of the current state of the technology, ten practical challenges are identified: device weight, thermal discomfort, skin friction, donning and doffing complexity, hygiene, bulk, the adaptation curve, movement restriction, fit and sizing, and psychosocial factors. It is concluded that ergonomic support is a necessary condition for translating biomechanical potential into real and sustained benefits.

**Keywords:** Exoskeleton Device; Musculoskeletal Diseases; Occupational Diseases; Human Engineering; Occupational Health; Workplace.

## 1. Introducción

A pesar de décadas de intervención desde la ergonomía con el fin de controlar el riesgo biomecánico, los trastornos musculoesqueléticos (TME) siguen siendo una de las principales enfermedades laborales a escala global<sup>(1,2)</sup>. La automatización no parece resolver del todo el problema ya que persisten aún tareas físicamente exigentes que demandan posturas forzadas y que presentan patrones no estructurados y, por ende, resultan difíciles de automatizar incluso en países industrializados<sup>(3)</sup>. La robótica colaborativa o los robots humanoides con capacidades de destreza manual y motricidad fina no son viables en muchos contextos ni deseables (Ej., sector sanitario). En países en vía de desarrollo la realidad del trabajo físico intenso con una elevada exposición a riesgo biomecánico es aún más marcada.

En este contexto, los exoesqueletos ocupacionales han ganado una visibilidad creciente como tecnología de asistencia ergonómica que puede ayudar en la prevención de TME. Su potencial reside en la posibilidad de actuar directamente sobre los factores de riesgo biomecánico —fuerza, postura, activación muscular, fatiga— sin necesidad de grandes modificaciones a los contextos de trabajo. Sin embargo, como toda nueva tecnología, la brecha entre la promesa del catálogo y la realidad del terreno sigue siendo considerable. La literatura científica tiende a demostrar consistentemente los beneficios de estos dispositivos en condiciones de laboratorio o controladas de terreno, pero los estudios de campo con uso sostenido y los retornos de experiencia desde contextos productivos reales siguen siendo relativamente escasos.

Este artículo pretende contribuir a cerrar esa brecha. Se plantea como un artículo de reflexión fundamentado en el retorno de experiencia de los autores en procesos de evaluación e implementación de exoesqueletos en entornos de trabajo reales en Colombia, Alemania y España. Su objetivo es identificar y analizar los desafíos

prácticos que enfrenta esta tecnología en su tránsito del laboratorio al puesto de trabajo. La diversidad geográfica y sectorial de la experiencia que sustenta la reflexión es, precisamente, uno de sus valores añadidos, ya que permite distinguir los desafíos transversales de aquellos que son específicos de cada contexto.

## 2. Naturaleza y alcance del artículo

Este trabajo es un artículo de reflexión fundamentado en el retorno de experiencia de los autores, entendido como el aprovechamiento de la experiencia acumulada en situaciones reales de trabajo para extraer aprendizajes<sup>(4)</sup>. Aunque los autores disponen de datos primarios derivados de sus procesos de evaluación e implementación, el artículo no presenta un análisis sistemático de dichos datos, sino una reflexión argumentada que se apoya en dos fuentes de evidencia complementarias. La primera es la literatura científica reciente sobre exoesqueletos ocupacionales, seleccionada por su pertinencia para los argumentos desarrollados y no mediante un protocolo de búsqueda sistemática. La segunda, y de manera central, es el retorno de experiencia acumulado por los autores a lo largo de procesos de evaluación, prueba piloto e implementación de una veintena de exoesqueletos en decenas de puestos de trabajo, que han involucrado a más de 600 trabajadores en diversos sectores de actividad. Conviene precisar que dicha experiencia no procede de una impresión difusa, sino de procesos estructurados de recogida de evidencia: análisis de la actividad y observación en el puesto, registro fotográfico y videográfico, entrevistas con trabajadores y mandos, cuestionarios de percepción y usabilidad, y elaboración de informes técnicos para las empresas. Es este material el que sustenta las reflexiones que siguen, sin que su análisis sistemático constituya el objeto del presente artículo.

En este tipo de trabajos, en los que la experiencia profesional de los autores constituye la fuente principal de conocimiento, la transparencia sobre esa base experiencial es un elemento central de credibilidad, de forma análoga a la declaración de posicionalidad en la investigación cualitativa<sup>(5)</sup>. Con este fin, la Tabla 1 sintetiza la formación, especialización, sectores de intervención, número de trabajadores implicados y dispositivos evaluados por cada autor. En cambio, a lo largo del texto se ha optado deliberadamente por no identificar las marcas y modelos evaluados, dado que el interés del artículo reside en los desafíos comunes a esta tecnología, no en la comparación entre productos, que requeriría un diseño experimental controlado.

**Tabla 1.** Información relevante del perfil de los autores en relación con intervenciones centradas en exoesqueletos ocupacionales.

| Autor | Formación       | Especialización (años)            | Sectores                                        | Trabajadores | Modelos | Países           |
|-------|-----------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------|--------------|---------|------------------|
| YT    | Ingeniero, PhD. | Ergonomía y factores humanos (20) | Agroalimentario, construcción, logística, salud | 180          | 9       | Colombia         |
| IB    | Ingeniero, MSc. | Producción y ergonomía (14)       | Automotriz                                      | 200          | 24      | Alemania, España |
| GR    | Ingeniero, PhD. | Ergonomía y factores humanos (25) | Salud, logística, industria                     | 230          | 8       | España           |

### 3. Breve panorama del estado actual de la tecnología

#### 3.1. Un mercado en expansión

El mercado de exoesqueletos ha experimentado un crecimiento significativo en la última década. Según el repositorio de Exoskeleton Report, que ofrece una de las panorámicas más completas sobre la evolución del sector, existen actualmente más de 290 dispositivos comercializados a nivel global, de los cuales 148 corresponden a aplicaciones ocupacionales<sup>(6)</sup>. Entre estos últimos, el soporte dorsolumbar concentra la mayor parte de la oferta (96), seguido del soporte de miembro superior (42), soporte de miembro inferior (12), exoesqueletos para sujeción de herramientas (6), soporte cervical (4), guantes de potencia para la mano (3) y dedos (2). Respecto a la tecnología de actuación, predominan los dispositivos pasivos (103) sobre los activos o motorizados (43), con una presencia marginal de sistemas cuasiactivos (2) y con anclaje externo o tethered (1).

Estos datos resultan coherentes con la evidencia disponible sobre patología osteomuscular de origen laboral, donde los trastornos de la región dorsolumbar constituyen la localización más prevalente y con mayor impacto en términos de absentismo y costos<sup>(7)</sup>. Posiblemente una de las razones por las cuales el desarrollo de exoesqueletos ocupacionales ha priorizado este segmento corporal. Adicionalmente, la predominancia de dispositivos pasivos responde, a su vez, a que los sistemas activos o motorizados presentan tradicionalmente mayores desafíos en términos de peso, complejidad de uso y coste de adquisición. No obstante, esta tendencia podría revertirse en el medio y largo plazo debido a la llegada de dispositivos de consumo con tecnología de actuación activa a precios progresivamente competitivos, por lo que las barreras económicas asociadas a los sistemas activos podrían reducirse de forma significativa en los próximos años<sup>(6)</sup>.

### 3.2. Exoesqueletos frente a exotrajes: implicaciones prácticas

La norma ASTM F3323-24 define un exoesqueleto como un dispositivo vestible que aumenta, permite, asiste y/o mejora la actividad física mediante interacción mecánica con el cuerpo, y precisa que puede incluir componentes rígidos o blandos, o ambos<sup>(9)</sup>. Dentro de esta categoría, la literatura científica distingue el exotraje (exosuit), también denominado exoesqueleto blando (soft exoskeleton), como un dispositivo construido principalmente con materiales blandos y textiles que transmiten fuerzas de tracción al cuerpo en paralelo a la musculatura, apoyándose en la propia estructura ósea para soportar las cargas de compresión<sup>(9)</sup>.

Esta distinción tiene implicaciones prácticas directas: los exotrajes tienden a ser menos voluminosos, más ligeros, más compatibles con espacios de trabajo reducidos y menos restrictivos de la movilidad, ya que no imponen una estructura rígida externa que deba alinearse con las articulaciones biológicas del usuario; a cambio, ofrecen generalmente un menor torque de asistencia que los dispositivos de estructura rígida<sup>(9)</sup>. Sin embargo, la separación entre ambas categorías rara vez es nítida. Los exotrajes no son completamente blandos: incorporan con frecuencia cables, anclajes o elementos de soporte rígidos, a la inversa, algunos dispositivos rígidos integran componentes textiles en la interfaz con el cuerpo. El criterio más útil para diferenciarlos es, en la práctica, su mecanismo de actuación y transmisión de fuerza: si la asistencia se genera y transmite a través de elementos rígidos articulados (exoesqueletos), o a través de materiales elásticos y textiles que almacenan y restituyen energía por deformación (exotrajes).

Se debe mencionar que en el uso habitual, tanto en la literatura científica como en los entornos de trabajo, el término exoesqueleto se emplea de forma genérica para referirse a ambos tipos de dispositivo. A lo largo de este artículo se adopta esa misma convención, utilizando exoesqueleto como término paraguas salvo cuando la distinción entre ambas categorías sea relevante para el argumento. Cabe precisar, por último, que esta distinción cobra pleno sentido principalmente para los dispositivos de tronco; para otros segmentos corporales —cuello, miembro superior, mano y miembro inferior— los dispositivos disponibles en el mercado son esencialmente rígidos.

### 3.3. Dispositivos pasivos frente a activos

En función de su fuente de energía y principio mecánico de actuación, los exoesqueletos ocupacionales se clasifican en pasivos o activos. Los dispositivos pasivos no requieren fuente de energía externa ya que almacenan energía mediante la deformación elástica de sus componentes: resortes, barras de torsión o fibras tensoelásticas y la restituyen en las fases del movimiento en que se requiere asistencia, sin necesidad de fuente de energía externa. Los dispositivos activos, en cambio, incorporan actuadores electromecánicos alimentados por baterías que generan un suplemento real de fuerza. Dado que la asistencia activa debe modularse en función del movimiento y la tarea, estos sistemas integran habitualmente algoritmos de inteligencia artificial capaces de interpretar patrones de movimien-

to y ajustar en tiempo real la fuerza desplegada<sup>(10)</sup>. Esta complejidad tecnológica ha influido en su mayor peso, volumen y coste, algo que limita la viabilidad de su adopción en entornos reales de trabajo. No obstante, el segmento activo ha experimentado un desarrollo acelerado en los últimos años que ha permitido el lanzamiento de varios modelos para su uso en contextos ocupacionales.

## 4. Evidencia biomecánica y brecha con el terreno

### 4.1. Impacto de los exoesqueletos

La evidencia biomecánica sobre la efectividad de los exoesqueletos tiende a ser cada vez más consistente. Los estudios de laboratorio y de campo, que emplean electromiografía de superficie (EMG), modelización de fuerzas articulares y captura de movimiento, han demostrado impacto significativo en varias variables. Estos efectos se articulan en torno a tres mecanismos principales:

- Reducción de la activación muscular: menor actividad EMG en músculos objetivo, con la consiguiente reducción de la fatiga local y del riesgo de sobrecarga.
- Reducción de la fuerza articular: disminución de la compresión sobre los discos intervertebrales lumbares y las fuerzas articulares en hombro, codo y rodilla.
- Mejora postural: tendencia a reducir los ángulos de flexión del tronco y de extensión cervical, contribuyendo a mantener posturas más neutras.

Las ganancias en términos de activación muscular y reducción de fuerzas articulares no deben interpretarse como beneficios absolutos. En el plano biomecánico, los exoesqueletos pasivos, los más utilizados y estudiados, no producen energía de forma neta, sino que la redistribuyen: almacenan la energía mecánica generada durante una fase del movimiento y la restituyen en otra, transfiriendo fuerzas hacia segmentos corporales distintos del que se pretende proteger<sup>(11)</sup>. Así, la reducción de activación en los grupos objetivo puede acompañarse de un incremento en músculos o articulaciones adyacentes<sup>(12)</sup>. Aunque también se ha podido comprobar reducciones significativas de la fatiga y el esfuerzo muscular en los hombros durante el trabajo por encima de la cabeza, sin desplazamiento de la carga física hacia otras zonas como la espalda baja<sup>(13)</sup>.

El uso de exoesqueletos puede elevar el coste cardíaco y la actividad de músculos antagonistas<sup>(14)</sup>, y ciertos diseños rígidos alteran el equilibrio y la cinemática del tronco, con posibles repercusiones sobre la estabilidad postural y de la marcha<sup>(15)</sup>.

En los exoesqueletos de soporte dorsolumbar, la descarga de la musculatura extensora del tronco se transfiere mecánicamente hacia el complejo muslo-cadera a través de las almohadillas femorales, estructura dotada de mayor capacidad para soportar cargas. Esta redistribución, no obstante, depende del diseño: en dispositivos neumáticos (cuasiactivos) de alta asistencia, Cohic et al.<sup>(16)</sup> observaron predominantemente una reducción global del reclutamiento junto con una reorga-

nización de las sinergias musculares que alcanzó incluso a músculos no asistidos directamente (bíceps, deltoides), más que una transferencia neta de carga.

El tercer mecanismo —la mejora postural— merece una consideración diferenciada. Diversos exoesqueletos de soporte dorsolumbar reducen el ángulo de flexión del tronco y ajustan la postura corporal<sup>(17)</sup>, imponiendo una restricción o guía del movimiento a partir de cierto umbral angular<sup>(18)</sup> que los aproxima, en la práctica, a lo que en el entorno laboral se denomina en ocasiones corrector postural o arnés postural. No obstante, aunque este efecto cinemático está documentado, apenas se ha estudiado como mecanismo propioceptivo ni se ha vinculado con la aceptación del dispositivo, pese a ser el que los trabajadores perciben con mayor immediatez. En nuestra experiencia, los trabajadores describen el dispositivo durante los primeros minutos de uso en términos sensoriales antes que funcionales: la sensación de que algo les impide encorvarse precede —y en ocasiones supera en relevancia subjetiva— a cualquier percepción de alivio de carga en los momentos iniciales. Esta respuesta propioceptiva inmediata puede constituir un aliado relevante para la aceptación inicial y para la adherencia al uso continuado.

## 4.2. Diferencias entre la biomecánica y la ergonomía como disciplinas

La biomecánica ocupacional, definida como la disciplina científica que estudia las cargas y tensiones fisiológicas que el trabajo físico impone sobre el sistema musculoesquelético<sup>(19)</sup>, constituye el marco de referencia dominante en la evaluación de exoesqueletos. Herramientas como la electromiografía de superficie, la modelización de fuerzas articulares y la captura del movimiento, permiten cuantificar con precisión si un dispositivo reduce la carga sobre estructuras específicas. Su contribución al campo es, en este sentido, indispensable.

Sin embargo, la biomecánica opera sobre el individuo y su interacción con una tarea aislada, y su alcance no se extiende a algo igualmente determinante para el éxito de la implementación: la integración del exoesqueleto en el sistema de trabajo en su conjunto. Dar cuenta de estas dimensiones requiere un marco disciplinar distinto: el que ofrece la ergonomía en su concepción sistémica. Según la definición adoptada por la International Ergonomics Association (IEA) en el año 2000, la ergonomía es la disciplina científica que estudia las interacciones entre los seres humanos y los demás elementos de un sistema, y la profesión que aplica teoría, principios, datos y métodos al diseño con el fin de optimizar el bienestar humano y el rendimiento global del sistema<sup>(20)</sup>. Esta orientación sistémica es constitutiva de la disciplina, no una extensión metodológica opcional.

Un exoesqueleto no se despliega en condiciones de aislamiento: su uso se inscribe en un puesto de trabajo con una configuración espacial determinada, con herramientas y equipos específicos, con dinámicas interpersonales entre trabajadores y supervisores, con ritmos y exigencias de producción, y con una cultura organizacional que condiciona su recepción. Todas estas dimensiones quedan fuera del alcance de la biomecánica, pero constituyen el objeto propio de la ergonomía.

Desde esta perspectiva, el exoesqueleto es un elemento del sistema de trabajo que interacciona con todos los demás, y la comprensión de esas interacciones es condición necesaria para una implementación sostenible.

## 5. Los exoesqueletos en la jerarquía de control de riesgos

La jerarquía de control de riesgos es un marco metodológico consolidado en salud y seguridad ocupacional que establece un orden de prioridad para la selección e implementación de medidas de control del riesgo, en función de su eficacia. En la formulación promovida por el National Institute for Occupational Safety and Health<sup>(21)</sup>, la jerarquía ordena las intervenciones desde la eliminación del peligro en la fuente —nivel de mayor eficacia— hasta el uso de equipos de protección individual (EPI), considerado el nivel de menor eficacia por su dependencia del comportamiento humano y su carácter reactivo. Los niveles intermedios incluyen la sustitución, los controles de ingeniería y los controles administrativos.

Aplicada al ámbito de la prevención de TME, esta jerarquía establece que la intervención de preferencia desde la ergonomía es el rediseño del puesto o del sistema de trabajo —cuando la eliminación completa del peligro mediante automatización no es viable— con el objetivo de reducir la exposición en la fuente antes de recurrir a medidas que actúan sobre el trabajador. Solo cuando las opciones de los niveles superiores han sido evaluadas y descartadas por razones técnicas, organizativas o económicas, resulta justificado descender hacia controles administrativos o dispositivos de protección individual. La Tabla 2 ilustra esta lógica de priorización mediante ejemplos concretos de cada nivel jerárquico aplicados a un contexto logístico de manipulación manual de cargas.

**Tabla 2.** Jerarquía de control del riesgo y ejemplos aplicados al campo de la ergonomía (manipulación de cargas en el sector logístico).

| Nivel jerárquico          | Descripción general                                           | Ejemplos en manipulación de cargas (logística)                                                                         |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Eliminación               | Suprimir la fuente del peligro.                               | Automatización completa del centro logístico; sistemas de paletización robotizada que eliminan la manipulación humana. |
| Sustitución               | Reemplazar el peligro por uno que genere menor riesgo.        | Reducción del peso unitario de las cargas; rediseño del embalaje; uso de unidades más ligeras.                         |
| Controles de ingeniería   | Modificar el entorno o el proceso para reducir la exposición. | Mesas elevadoras, transportadores, carros ergonómicos, sistemas de asistencia mecánica fija.                           |
| Controles administrativos | Modificar la organización del trabajo.                        | Rotación de puestos, limitación de la frecuencia de manipulación, pausas programadas, formación en técnicas de manejo. |

| Nivel jerárquico                 | Descripción general                                 | Ejemplos en manipulación de cargas (logística)                                      |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Equipos de protección individual | Reducir el impacto del peligro sobre el trabajador. | Calzado de seguridad, guantes antideslizantes o de protección mecánica, rodilleras. |

Los exoesqueletos no se ajustan con precisión a ninguna de las categorías establecidas por la jerarquía de control de riesgos, lo que refleja una limitación más general del propio marco: sus niveles no constituyen siempre categorías claramente delimitadas, y en la práctica es frecuente que las intervenciones actúen simultáneamente en varios niveles o que un mismo dispositivo comparta atributos de más de uno.

Clasificar los exoesqueletos como EPI no reflejaría adecuadamente su naturaleza funcional. La mayoría de EPI actúan como barrera pasiva entre el trabajador y el peligro, sin modificar las condiciones de exposición ni el proceso de trabajo. Los exoesqueletos, en cambio, intervienen sobre la biomecánica de la tarea: redistribuyen fuerzas, modulan la carga musculoesquelética y, en el caso de los sistemas activos, generan asistencia motriz mediante actuadores electromecánicos y algoritmos de control. Comparten, por tanto, atributos propios de los controles de ingeniería, sin constituir una modificación del entorno o del proceso de trabajo en sentido estricto. Una caracterización más precisa sería la de “dispositivos de asistencia ergonómica vestibles que, según su tipo y contexto de aplicación, se aproximan más a un control de ingeniería portable que a un equipo de protección individual”.

Si el exoesqueleto se sitúa, como se ha argumentado, más cerca de un control de ingeniería portable que de un EPI convencional, su implementación no puede limitarse a la entrega del dispositivo al trabajador: exige el mismo rigor metodológico —análisis de la actividad, evaluación del puesto, participación del usuario, seguimiento— que se aplicaría a cualquier modificación del sistema de trabajo. Es precisamente cuando se omite ese rigor, y el dispositivo se gestiona como un EPI más, de adquisición y reparto, sin evaluación previa ni acompañamiento posterior, cuando emergen los problemas de adherencia, rechazo y abandono que pueden presentarse en el terreno. Los diez desafíos que se presentan a continuación pueden leerse, en este sentido, como las consecuencias prácticas de tratar como un EPI un dispositivo que exige la lógica de evaluación e implementación propia de un control de ingeniería.

## 6. Desafíos en la implementación en contextos reales

A continuación, se presentan los principales desafíos identificados en los procesos de implementación en los que los autores han participado directamente. Se trata de dificultades que la literatura comienza a documentar<sup>(22,23)</sup> pero que raramente se describen con la concreción que solo la experiencia directa puede aportar.

## 6.1. Peso del dispositivo

El peso constituye una variable relevante en la evaluación y selección de exoesqueletos, con implicaciones tanto biomecánicas como sobre la aceptación y el uso continuado<sup>(24)</sup>. La carga añadida al cuerpo del trabajador puede contrarrestar parcialmente los beneficios en tareas de alta demanda metabólica o con desplazamientos frecuentes<sup>(25)</sup>, y contribuye a la fatiga percibida al final de la jornada en especial si el uso del exoesqueleto se prolonga en la jornada laboral.

El peso varía considerablemente según el tipo de dispositivo y su principio de actuación. Los exotrajes son, en general, los más ligeros por su naturaleza constructiva, con pesos que oscilan aproximadamente entre 0,4 y 1 kg<sup>(6)</sup>. Los exoesqueletos con estructura rígida son más pesados, con valores que se sitúan habitualmente entre 3 y 5 kg<sup>(6)</sup>. Los sistemas activos tienden a ser los más pesados por la incorporación de actuadores, baterías y electrónica de control, y pueden superar los 5 kg.

Una paradoja es que, los sistemas de mayor peso son también los de mayor capacidad asistente, lo que los hace pertinentes en tareas de manejo de cargas elevadas en periodos acotados y sin desplazamientos significativos. Por esta razón el peso del dispositivo debe evaluarse con relación a su nivel de asistencia y a la característica de la tarea, en particular el tiempo de duración y el nivel de desplazamiento.

## 6.2. Temperatura ambiental y discomfort térmico

La temperatura ambiental representa una variable a considerar para evaluar viabilidad de uso de exoesqueletos, cuya relevancia ha sido subestimada en la literatura experimental, desarrollada mayoritariamente en entornos de laboratorio climatizados. La evidencia disponible muestra que el dispositivo puede reducir la producción de calor metabólico y, simultáneamente, elevar la temperatura cutánea y la sensación térmica, con un balance que depende críticamente de la temperatura ambiente<sup>(26)</sup>. En condiciones de calor, el discomfort térmico puede convertirse en el principal factor limitante del tiempo de uso, incluso cuando el dispositivo proporciona un alivio biomecánico claramente percibido por el trabajador<sup>(27)</sup>.

El mecanismo subyacente es fisiológico: en ambientes calurosos, la evaporación del sudor constituye el principal mecanismo de disipación del calor corporal. Los exoesqueletos reducen la superficie corporal disponible para ese intercambio térmico en las zonas de contacto y sujeción, lo que puede dificultar la evaporación e incrementar la acumulación de calor, favoreciendo la aparición de estrés térmico. Este fenómeno no se limita a contextos tropicales: las olas de calor cada vez más frecuentes en Europa, incluidas regiones de España y Alemania generan condiciones comparables en entornos industriales sin climatización adecuada o actividades laborales al aire libre. En Colombia, no obstante, estas condiciones son persistentes en regiones costeras y de baja altitud, con independencia de la estación del año, lo que las convierte en un factor estructural de la implementación y no en

una variable estacional. La superficie corporal cubierta y la permeabilidad de los materiales en las zonas de contacto son aspectos determinantes.

### 6.3. Puntos de fricción e irritación cutánea

Los puntos de contacto entre el dispositivo y el cuerpo del usuario constituyen otra fuente relevante de potencial rechazo, particularmente en el uso prolongado<sup>(28)</sup>. Las presiones registradas en las interfaces físicas presentan una variabilidad considerable entre trabajadores, sin una relación consistente con sus características antropométricas, lo que sugiere que la tolerancia a la presión es un atributo marcadamente individual<sup>(29)</sup>. En sesiones de uso continuado pueden aparecer enrojecimiento, irritación e incluso pequeñas lesiones si el dispositivo no está correctamente ajustado. Si bien molestias leves pueden ser toleradas en periodos cortos de uso, el uso a mediano y largo plazo puede verse comprometido cuando no se resuelven adecuadamente. En muchos casos es una cuestión de ajuste, en otros de diseño del dispositivo y de los materiales de acolchado empleados.

Algunos modelos concentran la redistribución de fuerzas en zonas específicas del cuerpo que, ante una presión sostenida, generan incomodidad o dolor. Este fenómeno es inherente al principio de funcionamiento de los exoesqueletos pasivos: la energía no se elimina, sino que se transfiere, y los sistemas de sujeción son el punto de transmisión de esa carga. Los materiales y el diseño de estos sistemas de fijación tienen un impacto directo sobre la fricción y la irritación cutánea, aspecto que cobra especial importancia cuando el dispositivo entra en contacto directo con la piel. Esto ocurre con frecuencia en exoesqueletos de miembro superior, cuyos apoyos a nivel de codo y brazo se aplican habitualmente sobre piel expuesta, dado que en muchos entornos de trabajo se porta ropa de manga corta.

La variabilidad antropométrica —longitud del tronco, anchura de cadera, circunferencia del muslo— hace que dispositivos con rangos de ajuste insuficientes resulten incompatibles con determinados perfiles corporales. La gestión de los puntos de presión requiere un proceso de ajuste individualizado que puede extenderse durante días o semanas, y que debe contemplarse como parte del proceso de implementación. Esta dificultad se agrava considerablemente cuando un mismo dispositivo es compartido por distintos trabajadores según el turno, ya que el ajuste logrado para un usuario no es directamente transferible a otro con una antropometría diferente, lo que obliga a reiniciar el proceso de acomodación en cada cambio de turno o a asumir, en la práctica, que el dispositivo funcione con un ajuste subóptimo para la mayoría de los trabajadores.

### 6.4. Complejidad de uso: ponerse y quitarse el dispositivo

La facilidad para colocarse y retirarse el exoesqueleto (*donning* y *doffing*, en inglés) es un factor determinante para la adherencia al uso en contextos productivos reales. Los trabajadores no disponen de tiempo ilimitado ni de asistencia para este proceso, y si la colocación requiere varios minutos, implica ayuda de un compañero o exige recordar una secuencia precisa de pasos —difícil de ejecutar, además,

con guantes de trabajo— la probabilidad de que el trabajador opte por no ponerse lo aumenta en situaciones de alta presión productiva.

La complejidad del proceso de colocación está directamente relacionada con el diseño del dispositivo. Algunos modelos incorporan un número elevado de correas, velcros y elementos de ajuste que deben colocarse y tensarse en un orden determinado, con múltiples pasos secuenciales. Esto prolonga el tiempo e incrementa la curva de aprendizaje y eleva la probabilidad de errores de ajuste que comprometen tanto la eficacia biomecánica como la comodidad. En el extremo opuesto, algunos dispositivos han sido diseñados para colocarse en dos pasos, con una lógica de uso intuitiva que reduce el tiempo y no requiere memorización de procedimientos. En nuestra experiencia, un exotraje de colocación sencilla puede mantener tasas de uso activo superiores a las de un dispositivo biomecánicamente más eficiente, pero de ajuste complejo. Es el caso de algunos exoesqueletos dorsolumbares de alta asistencia, capaces de reducir de forma notable la compresión de los discos intervertebrales lumbares, pero cuyo peso, volumen y procedimiento de colocación llevan a los trabajadores a reservarlos para momentos puntuales de la jornada. Frente a ellos, exotrajés más ligeros, versátiles y rápidos de poner y quitar se mantienen puestos durante una mayor parte del turno, porque se adaptan mejor a la alternancia de tareas y pueden retirarse sin interrumpir la actividad. Desde el punto de vista preventivo, el beneficio depende tanto de la magnitud del alivio biomecánico como del tiempo real de uso: un dispositivo menos potente pero utilizado de forma sostenida puede resultar más útil que otro más eficaz que permanece la mayor parte del tiempo sin usar. La literatura identifica, de hecho, la colocación y retirada del dispositivo entre las barreras para su integración sostenible en el puesto de trabajo<sup>(23)</sup>.

Un aspecto frecuentemente referido por los trabajadores, y que merece atención en el diseño de los procesos de implementación, es el tiempo asociado a la colocación y retirada del dispositivo. Cuando este tiempo no está reconocido dentro de la jornada laboral o es percibido como tiempo no productivo, genera resistencia adicional al uso, independientemente de la valoración que el trabajador haga del dispositivo en términos de alivio físico.

## 6.5. Higiene y capacidad de limpieza

La higiene del dispositivo es un aspecto frecuentemente subestimado en la fase de selección, pero que adquiere importancia operativa en el uso diario, especialmente cuando el dispositivo es compartido entre varios trabajadores o cuando las tareas implican exposición a suciedad, polvo, aceites o sustancias húmedas. La posibilidad de limpiar el dispositivo sin que pierda sus propiedades funcionales —resistencia mecánica, elasticidad de los componentes textiles, integridad de los sistemas de fijación— es un criterio de selección que debe evaluarse explícitamente.

Para ello, es conveniente que el dispositivo pueda desarmarse y ensamblarse con facilidad, que los componentes textiles sean lavables siguiendo las indicaciones

del fabricante y que los materiales sean compatibles con los productos de limpieza disponibles en el entorno de trabajo. En la industria agroalimentaria, donde los estándares de inocuidad son especialmente rigurosos el exoesqueleto debe poder someterse a los procedimientos de saneamiento habituales de la instalación. Este requisito puede no ser satisfecho por todos los modelos disponibles, lo que condiciona o descarta su uso en determinadas áreas de producción. Algunos componentes —en particular piezas pequeñas susceptibles de desprenderse— pueden suponer un riesgo de contaminación física que los departamentos de calidad no están en condiciones de asumir.

El uso compartido del dispositivo entre varios trabajadores en diferentes turnos —práctica habitual y económicamente razonable, similar a la gestión de equipos como arneses de seguridad para trabajo en altura— introduce requisitos adicionales de higiene entre trabajadores. En contextos de alta temperatura y contacto significativo con la piel, la asignación individual de dispositivo sería la opción óptima, aunque puede resultar económicamente desafiante. Alternativas prácticas incluyen la limpieza con paños y productos desinfectantes compatibles con los materiales del dispositivo, y el aireado del equipo entre turnos antes de su reutilización por otro trabajador.

## 6.6. Volumen del dispositivo y riesgos de seguridad

El volumen del exoesqueleto —el espacio adicional que ocupa en torno al cuerpo del usuario— es un factor crítico en entornos donde los trabajadores acceden a espacios reducidos, trabajan entre maquinaria o en proximidad a elementos móviles o hacen uso ya de EPI. Un dispositivo voluminoso puede introducir nuevos riesgos: atrapamiento o enganche con partes móviles, imposibilidad de acceder a determinadas zonas del puesto, o interferencia con otros equipos de protección individual. Estos riesgos son frecuentemente invocados por los responsables de seguridad para descartar determinados modelos, y con fundamento: varillas que sobresalen del perfil corporal o estructuras que quedan significativamente separadas del tronco, pueden constituir puntos de enganche con estanterías en entornos logísticos, con útiles de ensamblaje en líneas de fabricación, o con equipos en movimiento en prácticamente cualquier entorno industrial. La valoración del volumen debe realizarse siempre en el puesto de trabajo real, con el trabajador ejecutando la totalidad de sus tareas habituales, y no únicamente en condiciones estáticas o en un entorno despejado.

El volumen influye además en lo que en la literatura se denomina corporización (embodiment): el fenómeno por el cual el dispositivo deja de percibirse como algo externo y pasa a integrarse en el esquema corporal del usuario<sup>(30)</sup>. De esta manera el trabajador siente el exoesqueleto como una extensión natural de su propio cuerpo durante la ejecución de la tarea, sin requerir atención consciente ni generar interferencias en el movimiento. Un dispositivo excesivamente voluminoso dificulta esta integración, prolonga el período de adaptación y puede generar en el trabajador una sensación persistente de restricción o incomodidad postural que, aunque

no tenga consecuencias biomecánicas objetivas, condiciona negativamente la experiencia de uso y la adherencia a largo plazo.

## 6.7. Curva de adaptación y gestión del tiempo de uso

La adaptación al uso del exoesqueleto sigue un patrón que, con variaciones individuales y según el tipo de tarea, se observa de forma consistente en la práctica. En las primeras sesiones, los trabajadores pueden referir sensaciones de incomodidad, torpeza y, en algunos casos, fatiga en grupos musculares no habituales, especialmente cuando el dispositivo modifica el patrón de movimiento al que el trabajador está habituado. La gestión del tiempo de uso en esta fase inicial es relevante: un protocolo de despliegue progresivo, con períodos de uso cortos que se incrementan gradualmente, resulta más eficaz que la inmersión directa en jornadas completas. Esta gradualidad tiene, sin embargo, un coste organizativo que con frecuencia no está previsto en los planes de implementación.

El tiempo necesario para alcanzar una adaptación completa —entendida como la ausencia de molestias atribuibles al dispositivo y la integración natural de su uso en la ejecución de la tarea— es una cuestión abierta en la literatura, sin una respuesta universalmente aceptada, y depende en gran medida del tipo de tarea y del contexto de uso<sup>(31)</sup>. En el extremo más favorable se sitúan tareas con patrones de movimiento repetitivos y predecibles en entornos controlados: por ejemplo, en procedimientos de cirugía plástica (liposucción) y otorrinolaringológica endonasal, con movimientos sostenidos y condiciones estables de trabajo, hemos observado en el propio quirófano que la adaptación a un exoesqueleto pasivo de soporte de miembro superior se produce en el transcurso de una misma intervención, con cirujanos que refieren ausencia de molestias tras aproximadamente una hora de uso. En estas tareas, la elevación sostenida de los brazos con movimientos finos y repetitivos coincide en gran medida con el rango de asistencia del dispositivo y apenas exige desplazamientos o cambios de postura, por lo que el usuario debe gestionar pocas interferencias con el equipo. En contextos industriales con mayor variabilidad de tareas —alternancia de posturas, desplazamientos, manipulación de cargas a distintas alturas—, las interacciones con el dispositivo son más numerosas y diversas, y la adaptación puede extenderse durante días o semanas.

Esta realidad tiene implicaciones directas para el diseño de pruebas piloto. Por su propia naturaleza, los pilotos tienen una duración acotada, lo que puede llevar a evaluaciones realizadas durante la fase de adaptación, con resultados que no reflejan la experiencia de uso una vez superada dicha fase. Un piloto puede tanto sobreestimar el rechazo —si se evalúa antes de que el usuario haya superado las molestias iniciales— como subestimar problemas de uso que solo emergen con el tiempo de exposición acumulado.

## 6.8. Restricción de la libertad de movimiento

Los exoesqueletos asisten el movimiento en determinados planos y rangos articulares, pero pueden limitarlo en otros. Esta asimetría es inherente a su principio de

funcionamiento y debe evaluarse en relación con el conjunto de movimientos que requiere la tarea, no únicamente en las zonas de asistencia previstas por el diseño.

En los exoesqueletos de soporte dorsolumbar que utilizan resortes como mecanismo de actuación, la energía se acumula durante la flexión del tronco y se restituye en la extensión. Este principio es eficaz para tareas de levantamiento desde planos medios, pero puede generar resistencia en los rangos extremos de flexión necesarios para acceder a cargas en planos bajos —suelo o niveles inferiores de estanterías— donde la deformación del resorte alcanza su límite y dificulta o impide el movimiento. De forma análoga, algunos exoesqueletos de soporte de miembro superior diseñados para tareas por encima de la altura de la cabeza ofrecen asistencia con los brazos elevados, pero generan resistencia innecesaria al bajarlos a la posición neutra. La suavidad de esta transición entre la zona de asistencia y el resto del rango de movimiento varía según el modelo y constituye un criterio relevante de evaluación: cuanto más natural resulte el movimiento fuera de la zona de asistencia, menor será la interferencia con la ejecución global de la tarea.

Junto a estas restricciones objetivas, los trabajadores pueden experimentar una sensación subjetiva de limitación de la movilidad. Esta percepción, diferente de una restricción mecánica real, tiende a reducirse con el tiempo de adaptación. Sin embargo, cuando las restricciones objetivas al movimiento son percibidas por el trabajador como un impedimento para ejecutar adecuadamente su tarea, la adaptación no resuelve el problema y la restricción debe abordarse en el proceso de selección del dispositivo o de rediseño de la tarea.

Un caso particularmente crítico es el de los exoesqueletos de soporte de miembro inferior en tareas que requieren subir o bajar escalones o escaleras. Estos dispositivos, al restringir o guiar el rango de movimiento de rodilla y cadera para reducir la demanda muscular durante la bipedestación o la marcha, pueden interferir con la flexión más pronunciada que exige salvar un desnivel, alterando el equilibrio y el patrón natural de apoyo justo en el tipo de tarea —el desplazamiento vertical— donde un traspié tiene consecuencias potencialmente más graves que en terreno llano.

## 6.9. El ajuste y las tallas

Como cualquier elemento que se lleva puesto, la adecuación del exoesqueleto al cuerpo del usuario depende de la capacidad del dispositivo para acomodar la variabilidad antropométrica de la población trabajadora. Este aspecto tiene dos dimensiones relacionadas pero distintas: el sistema de tallas y los mecanismos de ajuste fino.

Los exotrajes, al estar contruidos principalmente con materiales textiles y elásticos, admiten en muchos casos un diseño de talla única con ajustes simples que cubren un rango amplio de la variabilidad antropométrica natural. Sin embargo, esto no es siempre así: algunos sistemas de exotraje combinan varias tallas en distintos componentes, lo que permite encontrar una combinación adecuada para diversas dimensiones corporales pero incrementa significativamente la comple-

alidad del proceso de selección. Los exoesqueletos con estructura rígida presentan mayores restricciones, ya que sus componentes no son redimensionables de forma continua durante el ajuste; en la práctica, la mayoría opera con sistemas de tallas —pequeña, mediana, grande— similares a los empleados en prendas de vestir, con ajuste fino dentro de cada rango.

Este aspecto adquiere especial relevancia dado que muchos dispositivos han sido desarrollados en Europa y algunos en Asia con referencias antropométricas propias de esas poblaciones. Las diferencias antropométricas entre estas referencias de diseño y las poblaciones locales son un factor a considerar en la selección. Por ejemplo, los sistemas de tallas asiáticos tienden a correr más pequeños respecto a los europeos: una talla M en un sistema asiático puede equivaler a una talla S en uno europeo, lo que puede inducir errores en la selección si no se verifica con las medidas reales del dispositivo y de la población objetivo.

## 6.10. El factor psicosocial

La aceptación de los exoesqueletos ocupacionales depende también del contexto organizacional en el que se introducen. El apoyo visible de la dirección y de los mandos intermedios, la comunicación transparente de los objetivos de la implementación y la creación progresiva de una cultura de uso constituyen condiciones necesarias para que el dispositivo sea percibido como una herramienta de protección y no como una imposición o, peor aún, como un mecanismo de intensificación del trabajo. Cuando los trabajadores no participan en el proceso de selección y prueba, o cuando perciben que la adopción responde exclusivamente a criterios productivos, la resistencia al uso tiende a consolidarse con independencia de la calidad técnica del equipo. Así lo ilustra una implementación en una empresa del sector de materiales de construcción, en la que un mismo dispositivo, desplegado con un procedimiento similar en tres sedes, tuvo una buena acogida en dos de ellas y un rechazo marcado en la tercera. Las diferencias no se explicaban por las características de las tareas ni del dispositivo, sino que coincidían con un clima de tensión previo entre los trabajadores y la dirección de esa sede. Esta observación concuerda con la literatura, que sitúa la cultura corporativa, el apoyo de la dirección y la implicación de los usuarios entre los factores que facilitan o dificultan la integración sostenible de los exoesqueletos<sup>(23)</sup>.

La experiencia muestra que los trabajadores que atraviesan un proceso estructurado de adaptación —con ajuste individualizado del dispositivo, periodos progresivos de uso y seguimiento posterior— tienden a presentar niveles de aceptación significativamente superiores a los de quienes reciben el equipo sin acompañamiento. En algunos casos las empresas pueden llegar a desarrollar procedimientos específicos de ajuste inicial, supervisión periódica y formación personalizada como parte integral de sus programas de despliegue.

También es necesario gestionar las expectativas. La difusión mediática de los exoesqueletos ha generado en ocasiones una imagen de dispositivos capaces de eliminar el esfuerzo físico o de multiplicar la fuerza del usuario, muy alejada de la

asistencia parcial y localizada que ofrecen los equipos ocupacionales actuales. Cuando el trabajador espera una descarga total y experimenta únicamente una reducción moderada de la demanda muscular —acompañada, además, del peso y la interacción física propios del dispositivo—, la brecha entre expectativa y realidad puede traducirse en decepción y abandono. Por el contrario, cuando la comunicación previa presenta el exoesqueleto como un complemento dentro de una estrategia ergonómica más amplia, con beneficios específicos y limitaciones explícitas, la valoración posterior del usuario tiende a ser más estable y realista.

## 7. Conclusiones

Los exoesqueletos ocupacionales son una tecnología con potencial preventivo real, respaldada por una evidencia biomecánica favorable y consistente: reducen la fuerza articular, disminuyen la activación muscular y contribuyen a mantener posturas más neutras. Sin embargo, los desafíos identificados en este artículo afectan directamente a la adherencia al uso y, en consecuencia, a la efectividad real de la intervención. El rechazo de los trabajadores o el abandono silencioso del dispositivo no son fracasos de la tecnología, sino consecuencias predecibles de implementaciones que omitieron la evaluación del puesto, la participación de los trabajadores o la gestión de la curva de adaptación, con el consiguiente coste económico, la oportunidad preventiva perdida y un argumento que se instala contra futuras iniciativas ergonómicas.

La diversidad geográfica y sociocultural de la experiencia reportada —Colombia, Alemania y España— muestra que la mayoría de estos desafíos son transversales, aun cuando su expresión concreta esté modulada por las condiciones locales. Los estudios de laboratorio han establecido la eficacia biomecánica de los dispositivos; lo que sigue faltando es evidencia sobre su efectividad en condiciones reales de uso, con poblaciones heterogéneas, en turnos completos y mediante estudios longitudinales. También se necesita un marco de referencia para seleccionar e integrar estos dispositivos, así como incorporar esta tecnología a la formación de los profesionales de la prevención. Son tareas urgentes, pues el abaratamiento de los dispositivos anticipa una difusión mucho mayor que la actual. Mientras tanto, el acompañamiento de profesionales de la ergonomía sigue siendo imprescindible en toda implementación rigurosa: es la ergonomía la que aporta el enfoque sistémico, los métodos de evaluación y la orientación al usuario necesarios para que el potencial biomecánico de estos dispositivos se traduzca en beneficios reales y sostenidos.

### Financiación

Este trabajo no ha recibido financiación específica de agencias públicas, comerciales o sin ánimo de lucro.

### Conflicto de intereses

Yaniel Torres es asesor científico de ExoLab Technologies, empresa dedicada a la asesoría y comercialización de exoesqueletos ocupacionales. Esta relación no

ha condicionado el contenido del manuscrito, que no promueve marca ni modelo alguno. Los demás autores declaran no tener conflictos de intereses.

## Bibliografía

1. Liu M, Rong J, An X, Li Y, Min Y, Yuan G, et al. Global, regional, and national burden of musculoskeletal disorders, 1990-2021: an analysis of the Global Burden of Disease Study 2021 and forecast to 2035. *Front Public Health*. 2025;13:1562701. doi: 10.3389/fpubh.2025.1562701.
2. Greggi C, Visconti VV, Albanese M, Gasperini B, Chiavoghilefu A, Prezioso C, et al. Work-related musculoskeletal disorders: a systematic review and meta-analysis. *J Clin Med*. 2024;13(13):3964. doi: 10.3390/jcm13133964.
3. Nedelkoska L, Quintini G. Automation, skills use and training. Paris: OECD Publishing; 2018. (OECD Social, Employment and Migration Working Papers, n.º 202). [citado 21 Ago 2026]. Disponible en: [https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2018/03/automation-skills-use-and-training\\_b611ef08/2e2f4eea-en.pdf](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2018/03/automation-skills-use-and-training_b611ef08/2e2f4eea-en.pdf)
4. De la Garza C, Fadier E. Le retour d'expérience en tant que cadre théorique pour l'analyse de l'activité et la conception sûre. *Activités*. 2007;4(1):188-97. <https://doi.org/10.4000/activites.1485>
5. Berger R. Now I see it, now I don't: researcher's position and reflexivity in qualitative research. *Qual Res*. 2015;15(2):219-34. doi: 10.1177/1468794112468475.
6. Exoskeleton Report. Exoskeleton catalog / industrial [Internet]. Exoskeleton-Report.com; 2026 [citado 21 Ago 2026]. Disponible en: <https://exoskeletonreport.com/product-category/exoskeleton-catalog/industrial/>
7. Ferreira ML, de Luca K, Haile LM, Steinmetz JD, Culbreth GT, Cross M, et al. Global, regional, and national burden of low back pain, 1990-2020, its attributable risk factors, and projections to 2050: a systematic analysis of the Global Burden of Disease Study 2021. *Lancet Rheumatol*. 2023;5(6):e316-29. doi: 10.1016/S2665-9913(23)00098-X.
8. ASTM International. ASTM F3323-24. Standard terminology for exoskeletons and exosuits. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2024. [citado 21 Ago 2026]. Disponible en: <https://store.astm.org/f3323-24.html>
9. Mohamed Refai MI, Moya-Esteban A, van Zijl L, van der Kooij H, Sartori M. Benchmarking commercially available soft and rigid passive back exoskeletons for an industrial workplace. *Wearable Technol*. 2024;5:e6. doi: 10.1017/wtc.2024.2.
10. Hochreiter D, Schmermbbeck K, Vazquez-Pufleau M, Ferscha A. Intention prediction for active upper-limb exoskeletons in industrial applications: a systematic literature review. *Sensors (Basel)*. 2025;25(17):5225. doi: 10.3390/s25175225.

- 11.** Ashta G, Finco S, Battini D, Persona A. Passive exoskeletons to enhance workforce sustainability: literature review and future research agenda. *Sustainability*. 2023;15(9):7339. doi: 10.3390/su15097339.
- 12.** Bär M, Steinhilber B, Rieger MA, Luger T. The influence of using exoskeletons during occupational tasks on acute physical stress and strain compared to no exoskeleton: a systematic review and meta-analysis. *Appl Ergon*. 2021;94:103385. doi: 10.1016/j.apergo.2021.103385.
- 13.** Maurice P, Čamernik J, Gorjan D, Schirrmeister B, Bornmann J, Tagliapietra L, et al. Objective and subjective effects of a passive exoskeleton on overhead work. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2019;28(1):152-64. doi: 10.1109/TNSRE.2019.2945368.
- 14.** Kranenborg SE, Greve C, Reneman MF, Roossien CC. Side-effects and adverse events of a shoulder- and back-support exoskeleton in workers: a systematic review. *Appl Ergon*. 2023;111:104042. doi: 10.1016/j.apergo.2023.104042
- 15.** Park JH, Kim S, Nussbaum MA, Srinivasan D. Effects of back-support exoskeleton use on gait performance and stability during level walking. *Gait Posture*. 2022;92:181-90. doi: 10.1016/j.gaitpost.2021.11.028.
- 16.** Cohic A, Segers T, Thamsuwan O. Impact of an occupational back-support exoskeleton on muscle synergies during a pick-up movement. *Eur J Appl Physiol*. 2026;126(3):1515-30. doi: 10.1007/s00421-025-05954-4.
- 17.** Luger T, Bär M, Seibt R, Rimmel P, Rieger MA, Steinhilber B. A passive back exoskeleton supporting symmetric and asymmetric lifting in stoop and squat posture reduces trunk and hip extensor muscle activity and adjusts body posture: a laboratory study. *Appl Ergon*. 2021;97:103530. doi: 10.1016/j.apergo.2021.103530.
- 18.** Xiang X, Tanaka M, Umeno S, Kikuchi Y, Kobayashi Y. Dynamic assessment for low back-support exoskeletons during manual handling tasks. *Front Bioeng Biotechnol*. 2023;11:1289686. doi: 10.3389/fbioe.2023.1289686.
- 19.** Chaffin DB, Andersson GBJ, Martin BJ. Occupational biomechanics. 4.<sup>a</sup> ed. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2006.
- 20.** International Ergonomics Association. What is ergonomics (HFE)? Ginebra: IEA; 2000 [citado 10 Jun 2020]. Disponible en: <https://iea.cc/what-is-ergonomics/>
- 21.** National Institute for Occupational Safety and Health. Hierarchy of controls. Cincinnati (OH): NIOSH; 2024 [citado 21 Ago 2026]. Disponible en: <https://www.cdc.gov/niosh/topics/hierarchy/default.html>
- 22.** Ralfs L, Hoffmann N, Glitsch U, Heinrich K, Johns J, Weidner R. Insights into evaluating and using industrial exoskeletons: summary report, guideline, and lessons learned from the interdisciplinary project "Exo@Work". *Int J Ind Ergon*. 2023;97:103494. doi: 10.1016/j.ergon.2023.103494.
- 23.** van Laar DM, Bieleman HJ, Rijnders CSI, Saakes DP, Reneman MF, Roossien CC. Occupational exoskeletons as a technological solution for musculoskeletal

disorders: a systematic review of barriers and facilitators for sustainable workplace integration. *J Occup Rehabil*. 2026. doi: 10.1007/s10926-026-10397-5. Epub ahead of print.

**24.** Bhat S, Gavin J, Warner M, Myall M. Mapping the evidence on occupational exoskeleton use for the workforce in healthcare, social care, and industry: a systematic scoping review. *Wearable Technol*. 2025;6:e53. doi: 10.1017/wtc.2025.10033.

**25.** Cardoso A, Ribeiro A, Carneiro P, Colim A. Evaluating Exoskeletons for WMSD Prevention: A Systematic Review of Applications and Ergonomic Approach in Occupational Settings. *Int J Environ Res Public Health*. 2024 Dec 19;21(12):1695. doi: 10.3390/ijerph21121695.

**26.** Liu Y, Zhang Z, Xue Y, Wang M, Fan H, Li R, et al. Thermophysiological and subjective thermal responses to soft and rigid spinal exoskeletons in young male workers: an experimental study. *Appl Sci*. 2026;16(2):820. doi: 10.3390/app16020820.

**27.** Joshi A, Bartels L, Viswanathan SH, Martinez DM, Sadeghi K, Jaiswal AK, et al. Evaluation of thermal properties and thermoregulatory impacts of lower back exosuit using thermal manikin. *Int J Ind Ergon*. 2023;98:103517. doi: 10.1016/j.ergon.2023.103517.

**28.** Flor-Unda O, Arcos-Reina R, Nunez-Nagy S, Alarcos B. Adverse effects due to the use of upper limbs exoskeletons in the work environment: a scoping review. *Biomimetics (Basel)*. 2025;10(5):340. doi: 10.3390/biomimetics10050340.

**29.** Linnenberg C, Weidner R. Industrial exoskeletons for overhead work: circumferential pressures on the upper arm caused by the physical human-machine-interface. *Appl Ergon*. 2022;101:103706. doi: 10.1016/j.apergo.2022.103706.

**30.** Dufraisse M, Atain Kouadio JJ, Hayot C, Desbrosses K, Clerc-Urmès I, Morel O, et al. Embodiment of occupational exoskeletons as developing a sense of ownership and readiness-to-hand: laboratory and field explorations. *Hum Factors*. 2026;68(2):239-259. doi: 10.1177/00187208251368269.

**31.** Subasinghe D, Aviles J, Shayan AM, Srinivasan D. Short-term adaptations to lifting and gait kinematics when using a passive back-support exoskeleton. *Ann Biomed Eng*. 2025;53(9):2264-81. doi: 10.1007/s10439-025-03770-7.