

Exoesqueletos industriales: siete principios para su implementación desde la perspectiva de la ergonomía

Seven principles for implementing industrial exoskeletons using the ergonomic approach

Yaniel Torres-Medina ^{1a, 2}, Yordán Rodríguez ^{1b}

¹Facultad Nacional de Salud Pública, Universidad de Antioquia, Colombia. Orcid: [0000-0002-9825-9437](https://orcid.org/0000-0002-9825-9437) ^a, [0000-0002-0079-4336](https://orcid.org/0000-0002-0079-4336) ^b. Correos electrónicos: yaniel.torres@udea.edu.co ^a, yordan.rodriguez@udea.edu.co ^b,

²École de technologie supérieure, Canadá.

Recibido: 22 noviembre, 2022. Aceptado: 3 febrero, 2023. Versión final: 7 abril, 2023.

Resumen

En los últimos años ha crecido el interés por el uso de exoesqueletos industriales como estrategia de prevención de desórdenes musculoesqueléticos de origen laboral. Sin embargo, existe aún incertidumbre sobre las posibles ventajas y desventajas de la adopción de esta relativamente nueva tecnología. El objetivo de este artículo es llevar a cabo un análisis crítico sobre el uso de los exoesqueletos industriales como estrategia de prevención de desórdenes musculoesqueléticos y proponer siete principios para guiar su implementación en contextos de trabajo desde la perspectiva de la ergonomía. Si bien el potencial de los exoesqueletos es prometedor, el estado actual de conocimientos es insuficiente como para hacer un uso de ellos en la prevención de desórdenes musculoesqueléticos sin considerar algunos cuestionamientos. Se recomienda que un profesional competente en ergonomía acompañe cualquier intervención encaminada a implementar exoesqueletos industriales, con el objetivo de incrementar las posibilidades de éxito y atenuar efectos negativos.

Palabras clave: aceptabilidad; confort; costo-beneficio; desórdenes musculoesqueléticos; ergonomía; exoesqueletos industriales; salud laboral; seguridad; trabajo; usabilidad; utilidad.

Abstract

In recent years, there has been growing interest in using industrial exoskeletons as a strategy for the prevention of work-related musculoskeletal disorders. However, there is still uncertainty about the potential advantages and disadvantages of adopting this relatively new technology. The objective of this article is to conduct a critical analysis of the use of industrial exoskeletons as a strategy for the prevention of these disorders and to propose seven principles to guide their implementation in work contexts from an ergonomics perspective. Although the potential of exoskeletons is promising, the current state of knowledge needs to be improved to use them in preventing musculoskeletal disorders without considering some questions. It is recommended that a professional ergonomist should accompany any intervention aimed at implementing industrial exoskeletons to increase the chances of success and mitigate negative effects.

Keywords: acceptability; comfort; cost-benefit; musculoskeletal disorders; ergonomics; industrial exoskeletons; occupational health; safety; work; usability; utility.

1. Introducción

A pesar de la creciente tendencia a la automatización del trabajo en diversos sectores económicos a escala global, la ejecución de tareas de tipo manual sigue siendo relevante en muchos contextos laborales. En primer lugar, el ritmo de automatización es inferior en países en vías de desarrollo en comparación con países industrializados. Por esta razón, las economías de muchos países en vías de desarrollo dependen en gran medida del trabajo manual, con frecuencia físicamente demandante y rutinario [1]. En segundo lugar, incluso en países industrializados donde la automatización es más marcada, el empleo de las habilidades y de la destreza humana sigue siendo fundamental, ya que, dado el estado actual de conocimientos y avances tecnológicos, existen aún muchas tareas que son difíciles de automatizar.

El sector de la manufactura industrial es donde la automatización se ha desplegado con mayor énfasis, puesto que diversas tareas ejecutadas en las líneas de producción son tareas estructuradas. Este tipo de tareas tienen, en general, ciclos bien definidos y predecibles, que se repiten a una determinada frecuencia. Sin embargo, en sectores como la construcción, la minería, la logística, la industria del petróleo y el gas, o los cuidados de la salud, por citar algunos ejemplos, existen un sinnúmero de tareas que demandan la percepción y la manipulación en entornos de trabajo no estructurados y, por ende, no son propicias a la automatización [2].

Por todo lo antes planteado, la automatización total de tareas manuales está muy lejos aún de ser una realidad, incluso si se consideran las últimas tendencias asociadas a la Industria 4.0 [3].

Lamentablemente, muchas tareas ejecutadas manualmente implican exigencias físicas importantes y exponen a los trabajadores a factores de riesgo de origen ergonómico, entre los cuales se destacan los movimientos repetitivos, la adopción de posturas incómodas y la realización de esfuerzos excesivos. Esta exposición contribuye, en gran medida, al desarrollo y la aparición de desórdenes musculoesqueléticos (DME) como el síndrome del túnel carpiano, la bursitis del hombro, la tendinitis o epicondilitis del codo, la hernia discal, el esguince lumbar y el dolor de espalda, entre muchos otros [4], [5]. Es por ello por lo que la prevención de DME es un elemento fundamental para garantizar entornos de trabajos saludables, productivos y sostenibles. En particular si se considera que, según la Organización Internacional del Trabajo, los DME constituyen

alrededor del 40 % de los costos globales de indemnización por lesiones y enfermedades profesionales [6].

Otras estadísticas similares muestran lo alarmante de la situación en diferentes regiones del planeta. Por ejemplo, según la *Sexta encuesta de condiciones de trabajo*, llevada a cabo en los países de la Unión Europea, el 32 % de los trabajadores que participaron en ella reportaron una exposición a tareas físicamente exigentes asociadas con la manipulación de cargas; también el 61 % informó algún tipo de exposición a movimientos repetitivos, mientras que el 43 % dio cuenta de la exposición a posturas incómodas [7].

Por otro lado, según la Oficina de Estadísticas Laborales de Estados Unidos, en el 2015, los DME de origen ocupacional representaron el 31 % de todas las lesiones profesionales declaradas y una pérdida de 12 días de trabajo como promedio por lesión. Los problemas de la espalda representaron el 40 % del total de los DME declarados [8].

A pesar de los esfuerzos realizados desde diversas disciplinas como la ergonomía, la medicina ocupacional, la higiene industrial y la seguridad ocupacional, la prevención de los DME plantea desafíos importantes. En muchas ocasiones, debido a la complejidad asociada a la naturaleza de la tarea y el contexto de trabajo, no es posible llevar a cabo un rediseño del sistema de trabajo que tome en cuenta los principios de la ergonomía y que sea, a la vez, tecnológica y económicamente viable. En consecuencia, el margen de maniobra en términos de diseño ergonómico del sistema de trabajo (métodos, herramientas, ambiente y organización del trabajo) es limitado.

Los exoesqueletos industriales son una tecnología de creciente interés para la prevención de los DME, por su potencial impacto en la reducción de esfuerzos físicos (véase *figura 1*). Si bien los exoesqueletos existen desde hace ya cierto tiempo en el campo de la rehabilitación de pacientes y en el sector militar, no es hasta hace algunos años que se dispone de la tecnología especialmente diseñada para contextos laborales [9]. Desde el punto de vista histórico, hace alrededor de 30 años que los exoesqueletos están siendo desarrollados y estudiados por el Ejército de Estados Unidos en el U.S. Army Research Laboratory's, con el fin de asistir a los soldados en el transporte de cargas [10].



Figura 1. Un trabajador prueba un exoesqueleto biónico futurista, recogiendo objetos metálicos en una fábrica de la industria del acero. Fuente: [36].

En la actualidad, existe una gama cada vez mayor de exoesqueletos industriales disponibles en el mercado, por lo que muchas compañías, ante la problemática de los DME, pueden verse tentadas a adquirir exoesqueletos como una solución rápida y relativamente simple. Sin embargo, no hay aún un consenso sobre estos dispositivos en cuanto a criterios para su selección o uso, lo que puede ocasionar confusión y crear algunos problemas durante su adopción en contexto de trabajo.

Aunque los primeros estudios experimentales tienden a demostrar que los exoesqueletos pueden ser eficaces para limitar las sobrecargas musculares locales, su utilización en situaciones de trabajo reales plantea varias interrogantes en relación con: la salud y la seguridad de los trabajadores, la utilidad y la pertinencia de la introducción de la tecnología en un contexto dado, el nivel de aceptabilidad entre los trabajadores y el confort de uso, entre muchos otros elementos.

La tecnología de los exoesqueletos industriales puede ser planteada, en la actualidad, como una tecnología de tipo disruptiva, que presupone un cambio de paradigma en las formas de enfocar al humano en el contexto de trabajo [11]. El objetivo de este artículo es analizar críticamente el empleo de los exoesqueletos industriales para la prevención de DME desde la perspectiva de la ergonomía. Es, por tanto, una investigación donde se reflexiona sobre los exoesqueletos industriales, los cuales

han sido desarrollados para ser utilizados en contextos de trabajo.

2. Los exoesqueletos industriales

En esta sección se pretende dar claridad en cuanto a la definición de exoesqueleto tanto desde el punto de vista etimológico como normativo. Igualmente, se presenta dos tipologías básicas, en las que se clasifican los exoesqueletos según la zona corporal objeto de intervención o según si proveen o no suplemento local de fuerza. Se termina con un recorrido por las tendencias actuales en cuanto a la normalización de diversos aspectos del ciclo de vida de los exoesqueletos, como es el caso de la definición de parámetros ergonómicos funcionales y métricas de prueba para evaluar los exoesqueletos.

2.1. Definición

Desde el punto de vista etimológico, la palabra “exoesqueleto” significa “esqueleto externo”. El prefijo “exo” proviene del griego y quiere decir “afuera”. Según el *Diccionario de la lengua española*, de la Real Academia Española (RAE), se denomina “exoesqueleto” a la estructura de protección y soporte externa que tienen un grupo de animales como los artrópodos (escarabajos, cangrejos, langostas) [12]. Este es el único significado

que aparece en el diccionario de la RAE con respecto al término exoesqueleto y está asociado a la zoología.

Se evidencia que la terminología vinculada a los exoesqueletos como tecnología de soporte humano no se refleja aún en el diccionario de la RAE. En inglés, el diccionario Merriam-Webster reconoce que “un exoesqueleto [*exoskeleton*] es cualquier estructura artificial de soporte externo” [13]. Esta definición, aunque no muy elaborada, va más allá del ámbito de la zoología y permite así incluir los exoesqueletos como tecnología de soporte humano.

Ya en el ámbito de la seguridad ocupacional y la ergonomía, el Instituto Nacional de Investigaciones en Seguridad (Institut National de Recherche et de Sécurité), de Francia, define los exoesqueletos como estructuras externas, portadas por el trabajador y diseñadas para proporcionar asistencia física en la realización de una tarea [14].

En 2017, el grupo de normalización de ASTM International (American Society for Testing and Materials, Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales) crea el Comité F48, con el objetivo de desarrollar normas específicas para los exoesqueletos y abordar temáticas como la seguridad, la calidad, el rendimiento, la ergonomía y la terminología de esta tecnología y sus componentes [15].

Uno de los objetivos de la creación de este comité es impulsar, primeramente, la armonización del vocabulario y desarrollar diversas normas que permitan la futura certificación de los exoesqueletos a partir de criterios establecidos [15].

Desde el punto de vista conceptual, la norma ASTM F3323-20, desarrollada por este comité, define los exoesqueletos como “una tecnología que se puede llevar puesta y que está diseñada para permitir, aumentar o ayudar en las actividades físicas” [16].

Los exoesqueletos están constituidos de una interfaz rígida en forma de armazón sólida, lo que contrasta con los exotrajes (*exosuit*, en inglés). Si bien los exoesqueletos se componen principalmente de componentes rígidos o duros, los exotrajes están constituidos por componentes blandos y maleables.

Los exotrajes tienen una interfaz persona-dispositivo más ligera y suave, e incluyen el uso de textiles flexibles. No obstante, es de general aceptación que la mención de la palabra “exoesqueleto” incluye a los exotrajes, pues son similares en sus funciones [16].

En la **tabla 1** se presenta la definición de exoesqueleto y de exotraje según la norma ASTM F3323-20.

Tabla 1. Definición de exoesqueleto y exotraje

	Definición
Exoesqueleto	Estructura de soporte externa, compuesta por materiales rígidos o duros, y que puede llevarse puesta con el objetivo de facilitar, aumentar o ayudar en la realización de actividades físicas mediante la interacción mecánica con el cuerpo.
Exotraje	Estructura de soporte externa, compuesta por materiales blandos y maleables, similares a los textiles de las prendas de vestir, y que se lleva puesta con el objetivo de facilitar, aumentar o ayudar en la realización de actividades físicas.

Fuente: [16].

Cabe destacar que la palabra “exotraje” no existe aún en el diccionario de la Real Academia Española. “Exotraje” es una traducción libre de los autores a partir del inglés *exosuit*, definido en la norma ASTM F3323-20 [16].

2.2. Clasificación

La zona corporal es uno de los criterios de clasificación de los exoesqueletos industrialmente comúnmente usado. Las principales zonas corporales son: extremidades superiores, la espalda y las extremidades inferiores. También existen algunos especialmente diseñados para las manos o como dispositivos de sujeción de herramientas. No obstante, debe señalarse que la mayoría de los exoesqueletos que se comercializan en la actualidad están diseñados para la espalda (47 %) y las extremidades superiores (33 %), según el catálogo recopilado por ExoskeletonReport.com, un sitio especializado en vigilancia tecnológica sobre los exoesqueletos [17].

Otro criterio de clasificación de los exoesqueletos se basa en el tipo de suplemento local de fuerza que ofrecen. Los exoesqueletos son diseñados con el objetivo de proporcionar un suplemento local de fuerza en diversas regiones corporales durante la ejecución de movimientos específicos. Este suplemento local de fuerza se puede obtener por compensación de esfuerzos o por un aumento de capacidades motrices. La compensación de esfuerzos se logra a partir de exoesqueletos pasivos, mientras que

el aumento de capacidades motrices implica el uso de exoesqueletos activos. Cerca del 70 % de los exoesqueletos que actualmente se comercializan en el mercado son de tipo pasivo, mientras que el resto son de tipo activo o semiactivo [17]. Estos últimos incluyen componentes o modos de uso activos y pasivos.

En la **tabla 2** se presenta una descripción de las principales características de los exoesqueletos pasivos y activos.

Tabla 2. Principales características de los exoesqueletos pasivos y activos

Tipo	Descripción
Pasivo	No incluyen actuadores; el movimiento humano natural crea la energía que alimenta el dispositivo, por medio de los materiales que componen el exoesqueleto mismo, como muelles o amortiguadores. No aportan una fuerza adicional, pero son capaces de realizar una redistribución de las cargas biomecánicas hacia zonas musculares más potentes. De esta manera, los músculos que inicialmente hacen el esfuerzo ejercen menos fuerza y se reduce la fatiga y el riesgo de lesión.
Activo	Funciona por medio de actuadores, que pueden ser pequeños motores eléctricos, palancas, sistemas neumáticos o hidráulicos, o una combinación de estas tecnologías. Son alimentados por alguna fuente de energía, en general la electricidad, a través del uso de baterías. En esta categoría encontramos los exoesqueletos robotizados, que incluyen un grupo de sensores conectados a un procesador central que ejecuta los movimientos según la información recibida en tiempo real de la actividad de trabajo. De esta manera ofrece apoyo según la necesidad de la tarea.

Fuente: [9].

2.3. Normalización

En el 2019 se crea el “Centro de Excelencia Tecnológica Exo” [18], orientado a apoyar el desarrollo de normas sobre los exoesqueletos. El centro trabaja directamente vinculado al Comité F48 de ASTM International, permitiendo articular los intereses de diversos actores, como los consumidores, la industria, el Gobierno y el mundo académico.

ASTM International ha desarrollado, desde el 2020, al menos 15 normas asociadas a diferentes fases del ciclo de vida de los exoesqueletos [18], convirtiéndose así en uno de los principales referentes en materia de normalización asociada a los exoesqueletos industriales. Además de ASTM Internacional, que ha sido pionera en el desarrollo de normas sobre exoesqueletos, otras organizaciones trabajan también en la misma dirección, incluyendo la International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización) a nivel internacional y otros organismos de normalización en Francia y Japón [11].

Otra norma relevante es la “ASTM F3474-20: Práctica estándar para establecer parámetros ergonómicos funcionales del exoesqueleto y métricas de prueba” [19]. La misma proporciona criterios recomendados y un conjunto de opciones para evaluar uno o más parámetros ergonómicos específicos con respecto a los usuarios de exoesqueletos.

Esta norma está sobre todo orientada a ayudar a optimizar los procesos de diseños de nuevos exoesqueletos, por lo que se dirige especialmente a los fabricantes. A la hora de diseñar exoesqueletos, la cinemática y la cinética naturales del ser humano sin asistencia, así como la carga y la fatiga resultantes que experimenta el usuario, deben ser parámetros relevantes de diseño. La norma establece medidas objetivas que puedan seleccionarse para evaluar la cinemática y la cinética humanas, así como la carga y la fatiga resultantes experimentadas por el usuario dentro del contexto de la tarea de la aplicación de uso final del exoesqueleto.

Recientemente, el exoesqueleto Laevo FLEX™ 3.0 se convirtió en el primer exoesqueleto con marcado CE para equipos de protección individual [20]. El *mercado CE* indica que los productos vendidos en el Área Económica Europea han sido evaluados para cumplir altos requisitos de seguridad, salud y protección del medio ambiente [21]. De esta manera, Laevo FLEX™ 3.0 es el primer exoesqueleto en recibir una declaración de conformidad según el Reglamento 2016/425 de la Unión Europea sobre equipos de protección individual [20].

3. Impacto de los exoesqueletos en la reducción de la carga de trabajo físico

En esta sección se hace un recorrido por diversos estudios que han evidenciado los posibles efectos positivos y negativos del uso de exoesqueletos. Los estudios fueron seleccionados a partir de publicaciones científicas especializadas. Se eligieron los artículos que a criterio de los autores muestran resultados relevantes para ilustrar las posibles ventajas y limitaciones de los exoesqueletos

industriales en cuanto a su implementación en contextos de trabajo.

En un estudio efectuado con el exoesqueleto SkelEx™ de soporte de extremidades superiores [22], los autores encontraron que la fuerza de apoyo suministrada por este exoesqueleto implicaba una reducción significativa del momento de fuerza del hombro que debía ser generado por el trabajador. Esto quiere decir que el esfuerzo realizado por el hombro disminuía gracias al apoyo suministrado por el exoesqueleto [22].

Sin embargo, estos efectos dependían de la postura del brazo, en particular de su altura vertical. El efecto más pronunciado se encontró en los ángulos más demandantes entre 60 y 120 grados. Para ángulos menores de 30 grados, el soporte brindado era significativamente menor. También se demostró que para algunos músculos específicos (trapecio alto y trapecio bajo), la activación muscular podía incrementarse a partir de 150 grados. Según los propios autores, los resultados enfatizan la importancia de analizar las demandas de la tarea, como la postura de trabajo, cuando se seleccionan o se diseñan exoesqueletos de soporte a los brazos.

En un estudio llevado a cabo por Marino, en 2019, 14 trabajadores fueron analizados durante la ejecución de sus tareas laborales con y sin exoesqueletos puesto [23]. La tarea consistía en la instalación y el almacenamiento de neumáticos. Los exoesqueletos objetos del análisis fueron los SuitX™ BackX para la espalda y el Levitate™ AIRFRAME para las extremidades superiores.

En el estudio referenciado se midieron indicadores fisiológicos como la frecuencia cardíaca con el uso y sin el uso del exoesqueleto. Se demostró que la frecuencia cardíaca tiende a ser superior con el empleo del exoesqueleto. Los trabajadores percibieron el uso de estos dispositivos como beneficioso y reportaron su disposición a utilizar un exoesqueleto al menos durante parte de la jornada laboral. Sin embargo, también indicaron preocupaciones sobre la calidad de los movimientos articulares, el rendimiento de las tareas y la comodidad.

De manera general, los indicadores fisiológicos no fueron mejores con los exoesqueletos que sin ellos. Los resultados ponen en duda el potencial de los exoesqueletos ocupacionales para prevenir lesiones mediante la reducción de la fatiga fisiológica [23].

Theurel et al., en 2018, llevaron a cabo un estudio similar, esta vez con el exoesqueleto Exhaus™, y determinaron igualmente que el costo cardíaco era superior durante el uso de exoesqueletos de miembros superiores en

comparación con la situación sin empleo de exoesqueletos [24].

Sin embargo, una vez más, el estudio demostró los beneficios de los exoesqueletos de extremidades superiores en la reducción de la actividad muscular del hombro, aunque también mostró un incremento en la actividad muscular antagonista. Además, hay que destacar que quizás el mayor potencial de los exoesqueletos está en la disminución de la carga biomecánica localizada y que, efectivamente, portar algo sobre nuestro cuerpo puede implicar un incremento de la actividad metabólica expresada en el costo cardíaco [24].

En un análisis de aspectos de usabilidad del exoesqueleto Laevo™ (soporte de espalda), llevado a cabo en la manufactura automotriz, los investigadores obtuvieron diversas evaluaciones de tipo subjetiva, elaboradas por los trabajadores [25]. El estudio se realizó durante cuatro semanas, y los resultados mostraron que, de manera general, los trabajadores reportaron una disminución de las molestias físicas en la parte baja de la espalda al utilizar el exoesqueleto pasivo, aunque esta disminución solo fue evidente en los trabajos que requerían posturas relativamente estáticas en comparación con las posturas dinámicas. Del mismo modo, la evidencia mostró que hubo una redistribución de la carga, específicamente a la región del pecho, según las molestias reportadas por el uso del exoesqueleto. Según este estudio, la aceptación de los exoesqueletos entre la población trabajadora se ve afectada por la percepción de la utilidad de estos dispositivos, así como por el nivel de incomodidad experimentado al utilizarlos [25].

En otro estudio similar durante el ensamblaje de autos, pero esta vez en tareas con elevación de los brazos, se evaluaron diversos aspectos de la utilización del exoesqueleto de EksoBionics: impresión sobre uso, ajuste, funcionalidad y malestar musculoesquelético [26].

Los resultados del estudio de terreno sugieren que los exoesqueletos de soporte para los brazos pueden llevar a una disminución sustancial de las molestias musculoesqueléticas en el cuello y los hombros reportada por los trabajadores. El estudio, sin embargo, señala algunos posibles problemas asociados al malestar térmico y al ajuste de los exoesqueletos a las tallas de los trabajadores, así como limitaciones en algunos rangos de movimientos [26].

En Finlandia, un reciente estudio se enfocó en el análisis del exoesqueleto Laevo™, utilizado por un grupo de enfermeras de cuidados geriátricos tanto en ambiente controlado como en la práctica del terreno [27].

Los resultados muestran que, debido a las características particulares asociadas al manejo de pacientes, se debe esperar que el desarrollo de la tecnología de los exoesqueletos sea más maduro antes de poder implementarse como parte del trabajo diario de las enfermeras. El estudio destaca que las enfermeras están dispuestas a utilizar los exoesqueletos si los dispositivos son cómodos y fáciles de usar. Al parecer, el desarrollo de los exoesqueletos deberá tomar en consideración los requisitos de algunos sectores específicos, como es el caso de la manipulación de pacientes, que se diferencia substancialmente de la manipulación de cargas en un contexto como el de la logística [27].

También debería incluirse la perspectiva de género donde se consideren las características particulares de las mujeres, sobre todo en profesiones mayoritariamente femeninas, como es el caso de la enfermería [27].

Con respecto al impacto de los exoesqueletos en el equilibrio postural, un estudio llevado a cabo por Park et al. en 2022 se interesó en evaluar el impacto de estos en determinadas variables que influyen en el riesgo de caída [28]. Un total de 20 participantes (10 mujeres y 10 hombres) usaron backX™ en pruebas de caminar en suelo y en caminadora, con diferentes niveles de torque externo y en una condición de control (sin exoesqueleto). El estudio demostró que el torque externo ejercido durante el uso de exoesqueleto de soporte de la espalda puede afectar negativamente a la anchura del paso, la variabilidad y la estabilidad dinámica de la marcha [28].

En términos de estudios longitudinales, Kim et al., en 2022, efectuaron un estudio durante un periodo de 18 meses, en el cual se compararon los resultados de respuestas a seis preguntas de usabilidad entre un grupo de usuarios de exoesqueletos de extremidades superiores (n = 65) con un grupo control (n = 133) [29]. Se encontró que las respuestas fueron consistentes en el tiempo. El uso de exoesqueletos fue percibido como eficaz para reducir las exigencias físicas de los hombros, el cuello y la espalda. El desempeño en la realización de la tarea, así como el ajuste y la comodidad global, parecen ser determinantes para la intención de uso de exoesqueletos de extremidades superiores. Finalmente, se encontró que el uso de los exoesqueletos objeto de estudio puede disminuir la probabilidad de visitas al médico [29].

Por último, hay que mencionar que no existen aún suficientes estudios que evalúen el impacto de la utilización de exoesqueletos industriales en contexto de trabajo a largo plazo. En este sentido, en una reciente revisión sistemática y metaanálisis, llevada a cabo por investigadores alemanes [30], se concluyó que el empleo de los exoesqueletos en tareas ocupacionales parece

reducir la carga de trabajo físico y sus posibles efectos (ej. reducción de la actividad muscular, de los momentos articulares y del esfuerzo percibido) en las zonas corporales (ej. miembros superiores, espalda, miembros inferiores) de la persona/usuario a los cuales va dirigido el empleo del exoesqueleto. Sin embargo, aún se desconoce el impacto real del uso de los exoesqueletos en la salud de los trabajadores, debido principalmente a la falta de estudios en condiciones de trabajo reales que evalúen a largo plazo su empleo [30].

4. Siete principios para la implementación de exoesqueletos industriales en contextos de trabajo

Como se pudo apreciar en la sección anterior, el impacto positivo del uso de los exoesqueletos no es claro, incluso pudiera ser controversial. Por tal motivo, el proceso de selección e implementación de un exoesqueleto industrial en entornos laborales debe planificarse cuidadosamente y no debe tomarse a la ligera.

Con base en el análisis de la literatura científica, reportes e informes de institutos y agencias gubernamentales, así como por la experiencia de los autores como investigadores, profesores y consultores en ergonomía por más de 15 años en diversos sectores económicos, se proponen siete principios que pueden servir de referencia para incrementar el éxito de la implementación de exoesqueletos industriales en entornos laborales. Para ello, se definieron inicialmente los siete principios tomando como base la perspectiva de la ergonomía y una secuencia lógica del proceso de selección e implementación de los exoesqueletos. Posteriormente cada principio fue enriquecido a partir del análisis crítico de la literatura y de la discusión entre los autores.

4.1. Principio 1: Definición y caracterización de la tarea

Es necesario que las compañías que deseen avanzar hacia el empleo de estas nuevas tecnologías definan claramente qué tareas podrían ser asistidas físicamente con el uso de exoesqueletos industriales. Esto debe anteceder a la elección del modelo de exoesqueleto que sea más conveniente.

Se propone, como punto de partida, la identificación de tareas de alto riesgo que, a su vez, puedan beneficiarse de la implementación de un exoesqueleto industrial. Para ello, un diagnóstico o evaluación ergonómica es fundamental en este proceso.

El diagnóstico debe conducir a la búsqueda de soluciones, siguiendo la jerarquía de control de riesgos [31]. En síntesis, primero, se debe tratar de

eliminar la exposición al riesgo; luego, se debe tratar de sustituirlo o controlarlo, y, por último, utilizar equipos de protección individual. Los exoesqueletos pueden ser considerados, en la mayoría de los casos, como equipos de protección individual. Así lo demuestra el marcado CE para equipos de protección individual que recibió el exoesqueleto Laevo FLEX™ 3.0 [20]. Por tal motivo, siguiendo la jerarquía de control de riesgos, los exoesqueletos no deben considerarse como la primera alternativa de solución.

De esta manera, las soluciones de prevención mediante el rediseño ergonómico de puestos de trabajo deben ser privilegiadas y los exoesqueletos deben asumirse como una alternativa adicional dentro de una amplia gama de soluciones para mejorar la ergonomía de los puestos de trabajo.

El proceso de diagnóstico ergonómico debe permitir caracterizar en detalle la tarea o las tareas que serán objeto de la introducción de un exoesqueleto industrial: partes del cuerpo y movimientos implicados, número de repeticiones, tiempos de los ciclos, pesos de las cargas, duración de la tarea, pausas y características del entorno de trabajo.

4.2. Principio 2: Seguridad y condiciones de utilización

Durante el análisis de las tareas que se beneficiarían de la introducción de un exoesqueleto se deben examinar los riesgos que se podrían introducir en el contexto de trabajo. Por ejemplo, el uso de algunos tipos de exoesqueletos podría afectar el equilibrio postural y generar un riesgo de caída.

Se debe tener en cuenta también que el uso de exoesqueletos puede modificar la repartición de esfuerzos y contribuir a la aparición de tensión en otras partes del cuerpo, lo que puede ocasionar un riesgo biomecánico.

Los exoesqueletos asimismo podrían convertirse en un obstáculo si es necesario atravesar accesos de dimensiones restringidas; el trabajador podría quedar atrapado o se podría incrementar el riesgo de colisión con otros elementos del contexto de trabajo.

Las condiciones ambientales deben igualmente ser contempladas. Los ambientes húmedos podrían afectar el desempeño de los exoesqueletos o el confort durante su uso. Otras variables ambientales, como la temperatura o la presencia de polvo pueden asimismo afectar el desempeño y el confort de uso.

En otros casos, según el tipo de tarea, se debe evaluar la interacción del exoesqueleto con ciertos riesgos específicos. Por ejemplo, durante las tareas de soldaduras, el material de composición de los exoesqueletos puede no ser adecuado (combustible). En caso de que el trabajador deba portar un equipo de protección individual, como un arnés de seguridad, debe evaluarse también el impacto del uso del exoesqueleto en interacción con este dispositivo de protección contra caídas.

4.3. Principio 3: Confort y facilidad de uso

Los exoesqueletos son una tecnología de uso individual y de manera similar a los equipos de protección individual, deben adaptarse a las características de los trabajadores que lo emplean. De manera ideal, deben ser fácilmente ajustables a las dimensiones de los usuarios finales, tomando en cuenta la variabilidad antropométrica de la población trabajadora.

Debido a las diferencias anatómicas entre hombres y mujeres, algunos tipos de exoesqueletos pueden no ser adecuados para unos u otras. Es importante caracterizar la población objetivo para comprender qué elementos de adaptabilidad son necesarios.

La facilidad y rapidez con la cual el trabajador pueda ponerse y quitarse el exoesqueleto es también un punto relevante, ya que es importante que se disminuya la interferencia con la tarea objetivo.

El material con el cual se confecciona el exoesqueleto podría ocasionar irritación o incomodidad local en un ambiente cálido o húmedo, si no permite la transpiración. La presión y la fricción frecuente de los exoesqueletos en determinadas partes del cuerpo pueden crear malestar e irritación.

De manera similar, es probable que algunos aspectos socioculturales deban ser considerados durante el despliegue de estas tecnologías en países en vía de desarrollo o en contextos multiculturales.

4.4. Principio 4: Utilidad

La utilidad de una tecnología está directamente relacionada con la proposición de valor que la misma trae al medio de trabajo. Algo “útil” es algo que “trae o produce provecho, comodidad, fruto o interés” [32]. La utilidad, vista de manera objetiva, es un aspecto que se evalúa *a posteriori*. Esta se halla relacionada con el cumplimiento de las expectativas asociadas con la adquisición de una nueva tecnología. La pregunta clave

aquí es: ¿los exoesqueletos contribuyen a realizar mejor el trabajo?

En este sentido, la contribución primaria de los exoesqueletos pretende ser la reducción de la fatiga y la incomodidad postural, con el fin de prevenir los DME.

Hasta ahora, los estudios demuestran que existe el potencial de que los exoesqueletos logren el objetivo deseado de contribuir a efectuar mejor el trabajo. Sin embargo, es en la práctica, durante el uso de la tecnología por los usuarios finales en el terreno, que se podrá evidenciar si el exoesqueleto cumple las expectativas iniciales.

En términos de utilidad, se deben emplear algunos indicadores claves de proceso, que podrían ser tanto métricas subjetivas, como objetivas: quejas de los trabajadores, satisfacción de los trabajadores, lesiones laborales o el absentismo. No obstante, incluso si la tecnología pasa la prueba de la utilidad en cuanto a los indicadores antes mencionados, puede haber otros elementos que hagan que no sea deseable. Estos últimos se describen en otros principios.

En el principio 6 se retoma el concepto de *utilidad*, pero desde el punto de vista de la percepción del trabajador asociado a sus expectativas. La utilidad percibida debe ser entendida en términos de aceptabilidad de la nueva tecnología y se determina *a priori*.

4.5. Principio 5: Impacto en la ejecución de la tarea

La introducción de un exoesqueleto en el sistema de trabajo puede tener una influencia en los modos de ejecución de la tarea. Un exoesqueleto puede condicionar la adopción de métodos de trabajo alternativos.

Los modos de ejecución de la tarea pueden ser adaptados por el trabajador si el exoesqueleto interfiere en la ejecución de los movimientos habituales. Estos nuevos modos de ejecución de la tarea o métodos de trabajo alternativos pueden ser menos efectivos desde el punto de vista del rendimiento (productividad del trabajo) o incluso generar malestar o molestias en los trabajadores. Es siempre de esperarse que, en una primera etapa, el trabajador necesite adaptarse al empleo del exoesqueleto, por lo que es normal, durante las primeras semanas, alguna disminución del rendimiento.

Es recomendable introducir el uso de los exoesqueletos de manera paulatina. Esto puede realizarse de diversas formas, como, por ejemplo, comenzar por un número limitado de horas de uso del exoesqueleto e ir

aumentando progresivamente el número de horas de uso, hasta llegar a la jornada laboral completa si así se prevé.

4.6. Principio 6: Aceptabilidad y aceptación

Más allá de la posible efectividad de los exoesqueletos en la prevención de DME, la introducción de cualquier nueva tecnología constituye un cambio significativo dentro de la organización, ya que puede impactar las tareas, la actividad de los trabajadores y los métodos de trabajo. Una nueva tecnología, incluso si es simple, puede ser rechazada por los trabajadores, mientras que otra más compleja puede ser aceptada. También una tecnología inicialmente aceptada puede ser luego rechazada por los trabajadores. Es por ello por lo que la aceptabilidad de la tecnología es un aspecto relevante para considerar.

El concepto de *aceptabilidad* (cualidad de aceptable) se refiere a las intenciones de los usuarios de utilizar o no la nueva tecnología, mientras que la *aceptación* (acción de aceptar) se refiere a su uso efectivo [33].

Si bien la aceptabilidad está asociada con la intención de uso, la aceptación del exoesqueleto es en última instancia lo que indica si el exoesqueleto ha pasado la prueba de fuego. En ambos casos, se trata de constructos, o conceptos multidimensionales estrechamente relacionados el uno con el otro.

El modelo de aceptabilidad tecnológica (Technology Acceptance Model) identifica dos dimensiones claves: *utilidad percibida* y *facilidad de uso percibida* [34]. La primera dimensión se refiere a las expectativas de rendimiento, y la segunda, a las expectativas de esfuerzo. Sin embargo, otras variables, como la influencia social, aspectos profesionales e identitarios, así como afectivos [35], pueden influir en la aceptabilidad/aceptación, incluyendo los principios 3 a 5.

Wioland et al., en 2019, proponen medir la aceptabilidad/aceptación a partir de 44 preguntas, repartidas en seis grupos: condiciones facilitantes, facilidad de utilización, influencia en el desempeño, influencia social, aspectos profesionales e identitarios, y aspectos afectivos [33].

4.7. Principio 7: Costo y factibilidad económica

Se deberá tener en cuenta el retorno de la inversión de los exoesqueletos. Para ello, se debe identificar el monto de la inversión inicial y otros costos asociados: valor de compra y costos de envío, costos de mantenimiento, inversión en formación, seguros, etc.

También se deben considerar, en el análisis, el posible impacto económico en términos de disminución del número de lesiones, reducción del ausentismo y la variación en el rendimiento (productividad, calidad).

Los elementos que resulten difíciles de cuantificar se podrán estimar mediante la consulta a expertos. Para ello, se pueden construir diferentes escenarios.

5. Conclusiones

Diversos estudios demuestran el potencial de los exoesqueletos para aliviar localmente el esfuerzo muscular y disminuir la carga biomecánica. También se ha identificado un posible aumento del costo cardíaco y un incremento en la actividad muscular en grupos antagonistas. Por ende, aunque el potencial de los exoesqueletos es prometedor, el estado actual de conocimientos es insuficiente como para recomendar su uso sin vacilación en la prevención de DME.

Tanto los beneficios como los inconvenientes de los exoesqueletos a la hora de atenuar riesgos biomecánicos dependen en gran medida de la interacción entre las características del exoesqueleto, el trabajador y la tarea para la cual se emplea. Por esta razón la integración de los exoesqueletos en contextos de trabajo puede acarrear desafíos importantes. En este sentido, es fundamental caracterizar la tarea y evaluar el potencial impacto de un exoesqueleto tanto en términos positivos como negativos.

Se recomienda que un profesional de la ergonomía acompañe cualquier intervención encaminada a implementar exoesqueletos en contextos laborales, con el objetivo de incrementar las posibilidades de éxito y atenuar posibles efectos negativos.

Finalmente, debe señalarse que esta investigación se centró en las etapas de selección e implementación de los exoesqueletos en contextos de trabajo. Sin embargo, en el futuro deberían analizarse las etapas de diseño y fabricación de los exoesqueletos.

Financiación

No aplica.

Contribuciones de los autores

Y. Torres: Conceptualización, Análisis formal, Escritura-borrador original. Y. Rodríguez: Metodología, Investigación, Escritura -revisión y edición.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

- [1] P. Egaña del Sol, C. Joyce, “The future of work in developing economies”, *MIT Sloan Management Review*, 2020.
- [2] L. Nedelkoska, G. Quintini, “Automation, skills use and training”, *OECD Social, Employment and Migration Working Papers*, núm. 202, OECD Publishing, París, 2018. doi: <https://doi.org/10.1787/1815199X>
- [3] D. Romero, T. Wuest, J. Stahre, D. Gorecky, “Social factory architecture: Social networking services and production scenarios through the social internet of things, services and people for the social operator 4.0”, en H. Lödding, R. Riedel, K. D. Thoben, G. von Cieminski, D. Kiritsis (eds.), *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing*, APMS 2017. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol. 513. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66923-6_31
- [4] D. Colombini, E. Occhipinti, N. Delleman, N. Fallentin, A. Kilbom, A. Grieco, Technical Committee on Musculoskeletal Disorders of International Ergonomics Association, “Exposure assessment of upper limb repetitive movements: A consensus document developed by the Technical Committee on Musculoskeletal Disorders of International Ergonomics Association (IEA) endorsed by International Commission on Occupational Health (ICOH)”, *G Ital Med Lav Ergon*, vol. 23, no. 2, pp. 129-142, 2001.
- [5] K. G. Davis, W. S. Marras, “Partitioning the contributing role of biomechanical, psychosocial, and individual risk factors in the development of spine loads”, *Spine J*, vol. 3, no. 5, pp. 331-338, 2003. doi: [https://doi.org/10.1016/S1529-9430\(03\)00082-2](https://doi.org/10.1016/S1529-9430(03)00082-2)

- [6] International Labour Organization, “Global trends on occupational accidents and diseases”, World Day for Safety and Health at Work, 28 April, 2015.
- [7] Eurofound, “6th European Working Conditions Survey – Overview report (2017 update)”, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017.
- [8] Bureau of Labor Statistics, U.S Department of Labor, “Nonfatal occupational injuries and illnesses requiring days away from work, 2015”, 2016.
- [9] M. A. Nussbaum, B. D. Lowe, M. de Looze, C. Harris-Adamson, M. Smets, “An introduction to the special issue on occupational exoskeletons”, *IISE Trans. Occup. Ergon. Hum. Factors*, vol. 7, nos. 3-4, pp. 153-162, 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/24725838.2019.1709695>
- [10] H. P. Crowell, J.-H. Park, C. A. Haynes, J. M. Neugebauer, A. C. Boynton, “Design, evaluation, and research challenges relevant to exoskeletons and exosuits: A 26-year perspective from the U.S. Army Research Laboratory”, *IISE Trans. Occup. Ergon. Hum. Factors*, vol. 7, nos. 3-4, pp. 199-212, 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/24725838.2018.1563571>
- [11] K. G. Davis, C. R. Reid, D. D. Rempel, D. Treaster, “Introduction to the *Human Factors* Special Issue on User-Centered Design for Exoskeleton”, *Human Factors*, vol. 62, no. 3, pp. 333-336, 2020, doi: <https://doi.org/10.1177/0018720820914312>
- [12] Real Academia Española (RAE), “Dermatoesqueleto”, *Diccionario de la lengua española*, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://dle.rae.es/dermatoesqueleto#Iccjw8c>
- [13] Merriam-Webster, “Exoskeleton”, *Merriam-Webster.com Dictionary*, 2022. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/exoskeleton>
- [14] J. Theurel, K. Desbrosses, “Usage d’un exosquelette d’assistance des bras : bénéfiques et contraintes lors de tâches de manutention”, *Hygiène et sécurité du travail*, no. 251, pp. 62-68, 2018.
- [15] B. D. Lowe, W. G. Billotte, D. R. Peterson, “ASTM F48 formation and standards for industrial exoskeletons and exosuits”, *IISE Trans. Occup. Ergon. Hum. Factors*, vol. 7, nos. 3-4, pp. 230-236, 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/24725838.2019.1579769>
- [16] American Society for Testing and Materials (ASTM). *ASTM F3323-20 Standard Terminology for Exoskeletons and Exosuits*. West Conshohocken, PA, 2020.
- [17] Exoskeleton Report. “Exoskeleton Catalog / Industrial”, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://exoskeletonreport.com/product-category/exoskeleton-catalog/industrial/>
- [18] American Society for Testing and Materials (ASTM), Center of Excellence, *ASTM International Exo Technology. Center of Excellence. Pursuing Safe & Reliable Exo Technologies for Humanity*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.etcoe.org/>
- [19] American Society for Testing and Materials (ASTM), *ASTM F3474-20 Standard Practice for Establishing Exoskeleton Functional Ergonomic Parameters and Test Metrics*. West Conshohocken, PA, 2021.
- [20] Exoskeleton Report, “Laevo FLEX 3.0 is the first-ever exoskeleton issued personal protective equipment PPE CE Mark”, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://exoskeletonreport.com/2022/04/laevo-flex-3-0-is-the-first-ever-exoskeleton-issued-personal-protective-equipment-ppe-ce-mark>
- [21] European Commission, “Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. CE marking”, 2021. [En línea]. Disponible en: https://ec.europa.eu/growth/single-market/ce-marking_en
- [22] A. de Vries, M. Murphy, R. Könemann, I. Kingma, M. de Looze, “The amount of support provided by a passive arm support exoskeleton in a range of elevated arm postures”, *IISE Trans. Occup. Ergon. Hum. Factors*, vol. 7, nos. 3-4, pp. 311-321, 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/24725838.2019.1669736>
- [23] M. Marino, “Impacts of using passive back assist and shoulder assist exoskeletons in a wholesale and retail trade sector environment”, *IISE Trans. Occup. Ergon. Hum. Factors*, vol. 7, nos. 3-4, pp. 281-290, 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/24725838.2019.1645057>
- [24] J. Theurel, K. Desbrosses, T. Roux, A. Savescu, “Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks”, *Applied Ergonomics*, vol. 67, pp. 211-217, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.10.008>

- [25] R. Hensel M. Keil, “Subjective evaluation of a passive industrial exoskeleton for lower-back support: A field study in the automotive sector”, *IISE Trans. Occup. Ergon. Hum. Factors*, vol. 7, nos. 3-4, pp. 213-221, 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/24725838.2019.1573770>
- [26] M. Smets, “A field evaluation of arm-support exoskeletons for overhead work applications in automotive assembly”, *IISE Trans. Occup. Ergon. Hum. Factors*, vol. 7, nos. 3-4, pp. 192-198, 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/24725838.2018.1563010>
- [27] T. Turja, R. Saurio, J. Katila, L. Hennala, S. Pekkarinen, H. Melkas, “Intention to use exoskeletons in geriatric care work: Need for ergonomic and social design”, *Ergonomics in Design: The Quarterly of Human Factors Applications*, vol. 30, no. 2, pp. 13-16, 2020, doi: <https://doi.org/10.1177/1064804620961577>
- [28] J.-H. Park, S. Kim, M. A. Nussbaum, D. Srinivasan, “Effects of back-support exoskeleton use on gait performance and stability during level walking”, *Gait & Posture*, vol. 92, pp. 181-190, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.11.028>
- [29] S. Kim, M. A. Nussbaum, M. Smets, “Usability, user acceptance, and health outcomes of arm-support exoskeleton use in automotive assembly: An 18-month field study”, *J Occup Environ Med*, vol. 64, no. 3, pp. 202-211, 2022, doi: <https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000002438>
- [30] M. Bär, B. Steinhilber, M. A. Rieger, T. Luger, “The influence of using exoskeletons during occupational tasks on acute physical stress and strain compared to no exoskeleton – A systematic review and meta-analysis”, *Applied Ergonomics*, vol. 94, 103385, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103385>
- [31] National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), “Hierarchy of controls”, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.cdc.gov/niosh/topics/hierarchy/default.html>
- [32] Real Academia Española (RAE), “Útil”. *Diccionario de la lengua española*, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://dle.rae.es/utilidad>
- [33] L. Wioland, L. Debay, J. J. Atain-Kouadio, “Acceptation des exosquelettes par les opérateurs : étude exploratoire”, *Références en santé au travail*, no. 157, pp. 45-61, 2019.
- [34] F. D. Davis, “Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology”, *MIS Quarterly*, vol. 13, no. 3, pp. 319-340, 1989, doi: <https://doi.org/10.2307/249008>
- [35] M. Hassenzahl, “The interplay of beauty, goodness, and usability in interactive products”, *Human-Computer Interaction*, vol. 19, no. 4, pp. 319-349, 2004, doi: https://doi.org/10.1207/s15327051hci1904_2
- [36] Gorodenkoff, Black African American Engineer and Exoskeleton Human, [En línea]. Disponible en: <https://www.shutterstock.com/g/gorodenkoff>