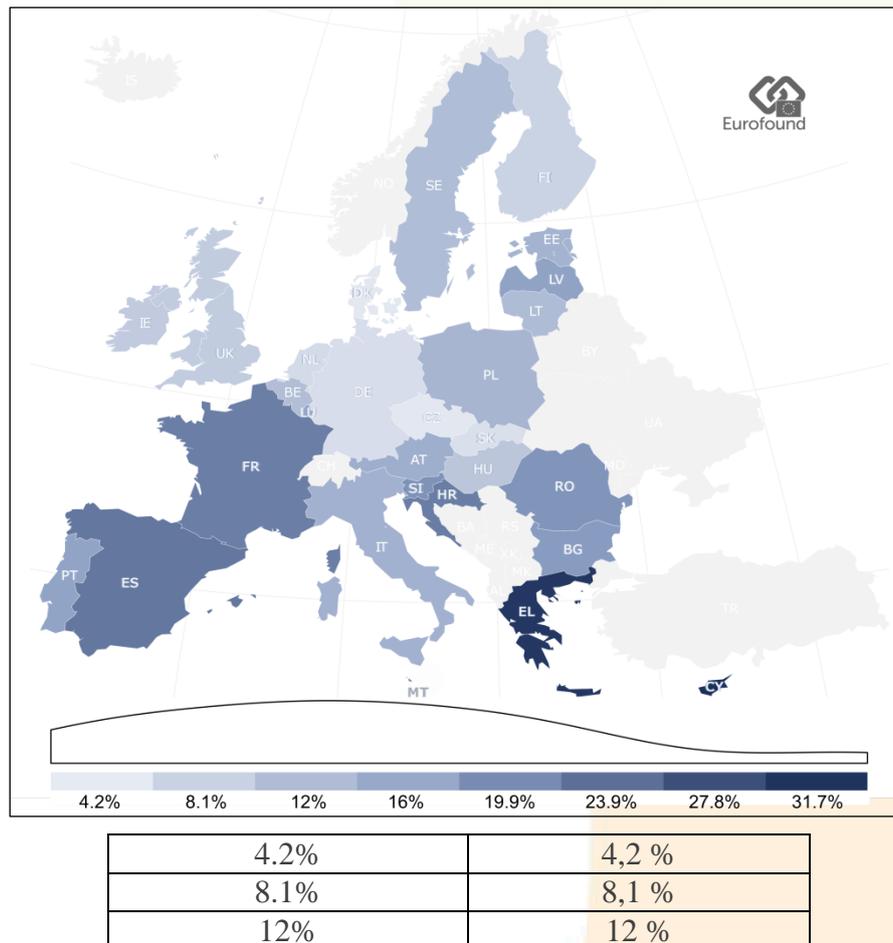


IMPACTO DE LA UTILIZACIÓN DE LOS EXOESQUELETOS EN LA SEGURIDAD Y LA SALUD EN EL TRABAJO

Introducción

En los últimos años, se han introducido en los lugares de trabajo nuevos dispositivos de ayuda denominados exoesqueletos. Se espera que su uso se convierta en algo más habitual en el futuro, ya que los prototipos de exoesqueletos han resultado ser beneficiosos en ámbitos como la asistencia médica. En particular, los exoesqueletos parecen ofrecer un nuevo enfoque para abordar la cuestión de los trastornos musculoesquelético (TME). Los TME son uno de los mayores desafíos en los lugares de trabajo en Europa¹. El gráfico 1 muestra los porcentajes de trabajadores que trabajan en posturas agotadoras y forzadas, que pueden asociarse a un mal diseño del puesto de trabajo, ya que las condiciones de trabajo siguen siendo un problema importante en toda Europa. Se han desarrollado exoesqueletos para abordar dicho problema.

Gráfico 1 Porcentajes de todos los empleados en Europa que trabajan en posturas agotadoras o forzadas (adaptado de Eurofound 2019)



¹ Más del 40 % de los trabajadores en Europa sufren dolor de espalda o de hombros. Además, el 63 % de los trabajadores realizan tareas repetitivas o trabajan con frecuencia (46 %) en puestos potencialmente peligrosos (Eurofound, 2012). Los costes anuales derivados de los problemas relacionados con la salud debido a estas condiciones de trabajo ascienden a cerca del 2 % del producto interior bruto de la Unión Europea (UE) (Bevan, 2015). Muchos de estos problemas están causados por tareas de manipulación manual de cargas, entre las que se incluyen levantar, bajar, sostener o transportar cargas (Zurada, 2012; Collins y O'Sullivan, 2015). Girarse, inclinarse y los trabajos realizados por encima del nivel de la cabeza también aumentan el riesgo de un trastorno relacionado con el trabajo. Por lo tanto, los TME no solo son un problema relacionado con la salud, sino que también tienen una repercusión importante en la economía.

16%	16 %
19.9%	19,9 %
23.9%	23,9 %
27.8%	27,8 %
31.7%	31,7 %

Los exoesqueletos son dispositivos portátiles que pueden ayudar al sistema musculoesquelético empleando varios principios mecánicos. En cuanto a los TME, pueden reducir el estrés muscular en las zonas del cuerpo más afectadas, como la parte baja de la espalda o los hombros. Aunque el beneficio potencial de los exoesqueletos podría ser importante para la prevención de los TME, también es necesario tener en cuenta que estos dispositivos de asistencia plantean nuevas cuestiones en relación con la salud y seguridad en el lugar de trabajo (SST). En este sentido, el Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo para la Prevención de los Accidentes de Trabajo y las Enfermedades Profesionales (INRS) francés ha publicado un resumen de los nuevos factores de riesgo que se encuentran en el lugar de trabajo cuando se utilizan exoesqueletos (INRS, 2019). Por un lado, los exoesqueletos pueden verse como una oportunidad para reducir el estrés muscular en el trabajo, al prestar ayuda física a los trabajadores y prevenir potencialmente los TME o ayudar a los trabajadores con discapacidades físicas. Por otro lado, podrían surgir nuevos riesgos potenciales para la salud debido a la redistribución del estrés a otras zonas del cuerpo. También afecta al control motor, la estabilidad de las articulaciones y la cinemática modificada (INRS, 2018). Además, puede descuidarse el diseño ergonómico de los lugares de trabajo, que se enfoca en los principios de un diseño centrado en el ser humano. Sin embargo, hay muchos lugares de trabajo que no se asocian a una ubicación específica, por ejemplo, los que se refieren a la entrega de muebles o a los servicios de urgencia, en los que no se pueden aplicar medidas de diseño ergonómico debido a los cambios en los requisitos del entorno (Schick2018). Además, el sobreesfuerzo de la musculatura, los levantamientos frecuentes, las posturas incorrectas o los equipos de protección individual (EPI) pesados pueden aumentar el riesgo de sobreesfuerzo físico en estas profesiones. En este contexto, los exoesqueletos pueden ofrecer una serie de posibilidades para mejorar las condiciones de trabajo.



Inc/MONOPOLY919, ©Shutterstock

La preocupación más importante es que se debe tener cuidado cuando se utiliza una tecnología tan cerca del cuerpo humano. Deben tenerse en cuenta medidas técnicas y organizativas a la hora de diseñar los lugares de trabajo, antes de equipar a los empleados con exoesqueletos. En general, el uso de exoesqueletos para mejorar el diseño ergonómico de los lugares de trabajo debe ser siempre el último recurso. En la actualidad, existen pocas pruebas científicas sobre el efecto de los exoesqueletos en la ergonomía y las ciencias del trabajo. Uno de los desafíos es el acceso a los efectos a largo plazo de los exoesqueletos sobre la biomecánica y la fisiología humanas, lo cual es difícil de lograr en la práctica (Liedtke y Glitsch, 2018), ya que hay que tener en cuenta el tipo de exoesqueleto, las tareas laborales y los periodos de utilización. Además, la investigación de los efectos sobre la salud

relacionados con aspectos fisiológicos o biomecánicos acaba de comenzar, ya que la interacción humana con los exoesqueletos es compleja y lleva mucho tiempo analizarla. Sin embargo, se deben desarrollar nuevos enfoques para demostrar la eficacia de los exoesqueletos, para estimar mejor las ventajas y desventajas de esta tecnología. Este artículo ofrece una visión general del debate actual sobre el uso y la evaluación de los exoesqueletos en términos de SST.

Exoesqueletos

Definición

Un exoesqueleto puede definirse como un sistema de ayuda personal que afecta al cuerpo de manera mecánica (Liedtke y Glitsch, 2018). En un sentido más estricto, los exoesqueletos son tecnologías robóticas que modifican las fuerzas internas o externas que actúan sobre el cuerpo. En resumen, los exoesqueletos son dispositivos portátiles que mejoran o soportan la fuerza del usuario. Debido al gran número de aplicaciones y a las diferentes funcionalidades, todavía no existe una definición común. En los textos especializados, existe un acuerdo general de que los exoesqueletos pueden definirse como estructuras mecánicas externas en el cuerpo (Herr, 2009; De Looze et al., 2016). Es posible clasificarlos como sistemas activos o pasivos.

Los exoesqueletos activos utilizan accionadores (componentes mecánicos de accionamiento) como apoyo de los movimientos humanos. Estos componentes mecánicos llevan incorporados motores eléctricos aunque también pueden ser accionados hidráulica o neumáticamente (Gopura y Kiguchi, 2009). Con este apoyo, proporcionan una fuerza adicional y, por lo tanto, aumentan el rendimiento de un trabajador. En cambio, los exoesqueletos pasivos utilizan las fuerzas de restauración de resortes, amortiguadores u otros materiales para ayudar al movimiento humano. La energía almacenada en un exoesqueleto pasivo se genera exclusivamente por el movimiento del usuario (De Looze et al., 2016). Además, las fuerzas se redistribuyen para proteger regiones específicas del cuerpo. El cambio en el rendimiento del usuario no es resultado de una fuerza física adicional, sino de la capacidad de mantener posturas agotadoras durante un periodo más largo, por ejemplo en condiciones de trabajo por encima del nivel de la cabeza .

Los exoesqueletos híbridos, que pueden ser sistemas activos o pasivos, siguen siendo una excepción hasta el momento. Utilizan actividades de ondas cerebrales (señales de EEG) o activación muscular para iniciar los movimientos. Sin embargo, su uso en la industria es poco probable en la actualidad, por lo que no se discutirá más sobre ellos en este documento.

Tipos de exoesqueletos

Los exoesqueletos pueden clasificarse en tres grupos: exoesqueletos de la parte inferior del cuerpo, de la parte superior y de cuerpo entero. Los exoesqueletos de una sola articulación han sido mencionados por la bibliografía (Gams et al., 2013), pero no se examinarán más en este artículo debido a sus aspectos altamente específicos y a que se aplican en casos individuales. Los exoesqueletos para la parte superior del cuerpo suelen utilizar estructuras mecánicas sólidas para redistribuir las fuerzas corporales aplicadas en las extremidades superiores y en el torso (por ejemplo, la parte superior de los brazos, los antebrazos, los hombros o la parte inferior de la espalda). En este caso, la redistribución de fuerzas implica que otras regiones del cuerpo, como la cadera o las piernas, soporten cargas adicionales. Los exoesqueletos de la parte inferior del cuerpo son capaces de transferir fuerzas al suelo y así reducir la carga sobre el sistema musculoesquelético. Sin embargo, es importante señalar que estos principios dependen en gran medida del diseño y la funcionalidad del exoesqueleto. Los sistemas de ayuda que ofrecen apoyo a la parte superior e inferior del cuerpo al mismo tiempo pueden definirse como exoesqueletos de cuerpo entero.

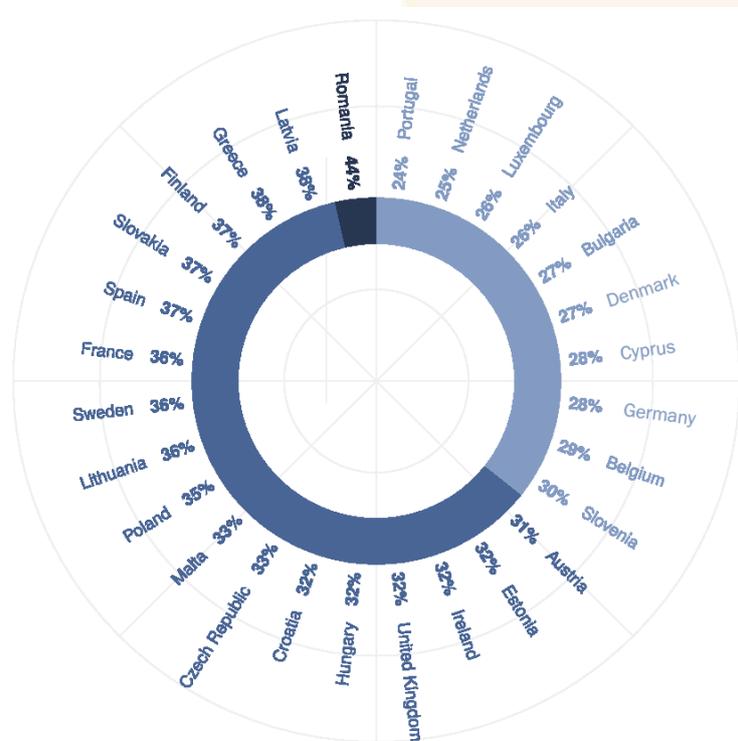
Ámbitos de aplicación en los lugares de trabajo

La idea de asistir los movimientos humanos con dispositivos técnicos no es una novedad reciente. Los dispositivos de ayuda portátiles como los exoesqueletos se han utilizado en la atención médica durante mucho tiempo, por ejemplo, el uso de órtesis con fines de rehabilitación para ayudar a los pacientes lesionados a recuperar su salud física (Viteckova et al., 2013). Sin embargo, las órtesis se pueden

diferenciar de los exoesqueletos, ya que sirven para dar apoyo a las personas con morbilidad musculoesquelética. También se desarrollaron exoesqueletos para aplicaciones militares (De Looze et al., 2016). Sin embargo, el uso de exoesqueletos para mantener o proteger la salud física de los trabajadores es algo nuevo. Aunque la mejora de las condiciones ergonómicas de trabajo con dispositivos de asistencia como los exoesqueletos es, en la actualidad, objeto de controversia, todavía ofrecen nuevas posibilidades para la seguridad y la salud de los trabajadores (Schick, 2018). Además, las condiciones ergonómicas de los lugares de trabajo desempeñarán un papel importante en el futuro para asegurar la salud física de una fuerza laboral que envejece como consecuencia del cambio. Desde esta perspectiva, es esencial desarrollar nuevas herramientas ergonómicas, ya que las opciones son actualmente limitadas (Hensel et al., 2018; Schick, 2018).

Los ámbitos de aplicación de los exoesqueletos para reducir los TME son numerosos. En toda Europa, más del 30 % de las tareas laborales están relacionadas con la manipulación manual de cargas (MMC) (Eurofound, 2012), lo que representa un riesgo importante para la salud. El trabajo que implica tareas repetitivas, la manipulación de cargas pesadas, el trabajo por encima del nivel de la cabeza o las posturas forzadas del cuerpo ofrecen diversas posibilidades para el uso de exoesqueletos. En el gráfico 2 se muestra que, en todos los países europeos, mover y transportar cargas pesadas es un elemento de trabajo significativo. En Rumanía, en particular, casi la mitad de los empleados (44 %) manipulan a veces cargas pesadas. En este contexto, los lugares de trabajo industriales, los servicios de entrega de muebles, los servicios de urgencia y los hospitales son de interés para este tema. Sin embargo, es importante reconocer que el diseño ergonómico se aplica principalmente en los lugares de trabajo estáticos. Mientras las medidas técnicas u organizativas ofrezcan posibilidades para mejorar el diseño ergonómico, no se debe preferir el uso de exoesqueletos (Schick, 2018). Sin embargo, parece que centrarse en los exoesqueletos que aumentan el rendimiento de los trabajadores podría tener un mayor interés que enfocarse en el diseño centrado en el ser humano en los lugares de trabajo (Baltrusch et al., 2018).

Gráfico 2 Porcentaje de empleados de todas las edades en Europa que pasan una cuarta parte de su tiempo cargando o moviendo cargas pesadas (Eurofound, 2019)



24%	Portugal	24 %	Portugal
25%	Netherlands	25 %	Países Bajos
26%	Luxembourg	26 %	Luxemburgo
26%	Italy	26 %	Italia

27%	Bulgaria	27 %	Bulgaria
27%	Denmark	27 %	Dinamarca
28%	Cyprus	28 %	Chipre
28%	Germany	28 %	Alemania
29%	Belgium	29 %	Bélgica
30%	Slovenia	30 %	Eslovenia
31%	Austria	31 %	Austria
32%	Estonia	32 %	Estonia
32%	Ireland	32 %	Irlanda
32%	United Kingdom	32 %	Reino Unido
32%	Hungary	32 %	Hungría
32%	Croatia	32 %	Croacia
33%	Czech Republic	33 %	República Checa
33%	Malta	33 %	Malta
35%	Poland	35 %	Polonia
36%	Lithuania	36 %	Lituania
36%	Sweden	36 %	Suecia
36%	France	36 %	Francia
37%	Spain	37 %	España
37%	Slovakia	37 %	Eslovaquia
37%	Finland	37 %	Finlandia
38%	Greece	38 %	Grecia
38%	Latvia	38 %	Letonia
44%	Romania	44 %	Rumanía

Debido a cuestiones técnicas, los exoesqueletos activos tienen poca relevancia práctica. Varios informes señalan cuestiones relacionadas con el peso, la estructura mecánica, el soporte de la batería y el diseño de la mecánica del accionamiento de los exoesqueletos activos (Yang et al., 2008; Herr, 2009; De Looze et al., 2016). Por el contrario, algunos exoesqueletos pasivos ya están disponibles comercialmente. Sin embargo, la ayuda que proporcionan estos sistemas pasivos es limitado, ya que inicialmente solo pueden aliviarse algunas partes del cuerpo. La asistencia durante las tareas de levantamiento de cargas pesadas sigue siendo limitada.

El uso previsto de los exoesqueletos depende en gran medida de su ámbito de aplicación. Además de su uso como medida técnica, los exoesqueletos también pueden utilizarse como dispositivos de protección individual o productos médicos. Según las aplicaciones previstas, se deben obtener diferentes certificaciones. Estas certificaciones están estrechamente relacionadas con cuestiones de SST.

Certificaciones de exoesqueletos

Debido a su amplia gama de aplicaciones en el ámbito de la rehabilitación, la industria y el ejército y a sus diferentes tipos de construcción, todavía no existe una regulación o certificación uniforme de los exoesqueletos. Para llenar este vacío, primero hay que considerar su diseño funcional y su uso previsto. En este sentido, un exoesqueleto puede clasificarse como un dispositivo técnico que ayuda al trabajador a cumplir su tarea. Además, puede definirse como EPI (equipo de protección individual). En este caso, el exoesqueleto protege al trabajador de cargas físicas que pueden provocar enfermedades relacionadas con el trabajo, como lesiones por uso excesivo. Actualmente no existe consenso en cuanto a si los exoesqueletos pueden proteger contra los TME, lo que dificulta su clasificación.

La aplicación práctica de los exoesqueletos está fuertemente relacionada con la certificación específica. Como ya se ha mencionado, un exoesqueleto puede definirse como una ayuda técnica como resultado de las disposiciones de la Directiva de máquinas de la Unión Europea (2006/42/CE).

Los sistemas activos pueden definirse con más detalle con la regulación internacional de robots y dispositivos robóticos (ISO 10218-1:2011) y los requisitos de seguridad para robots de cuidado personal (ISO 13482:2014).

Si un exoesqueleto está certificado como EPI, según la Directiva 89/686/CEE, puede utilizarse con fines de prevención para evitar lesiones relacionadas con el trabajo o el uso excesivo. Cabe señalar que la Directiva 89/686/CEE se está transfiriendo gradualmente al nuevo Reglamento (UE) 2016/425 relativo a los equipos de protección individual.

Por último, un exoesqueleto puede considerarse un dispositivo médico de acuerdo con la correspondiente Directiva europea (93/42/CEE). Los productos médicos tienen que cumplir con altos estándares de seguridad y rendimiento. Un desafío es la evaluación clínica de la eficacia médica, que todavía es difícil de probar. Sin embargo, todos estos requisitos son necesarios para utilizar los exoesqueletos con fines de rehabilitación o para aplicaciones médicas, o para hacer uso de ellos en el ámbito de la inclusión (Schick, 2018).

Evaluación de riesgos laborales con exoesqueletos

Los empresarios tienen el deber general de proporcionar un entorno de trabajo seguro y saludable, y de limitar los riesgos potenciales durante el trabajo. Las evaluaciones de riesgos en el lugar de trabajo, que tienen en cuenta todos los posibles riesgos profesionales, son obligatorias y la deben realizar todos los empresarios en Europa. Se describen medidas específicas, de acuerdo con la directriz europea destinada a abordar la obligación de evaluación de riesgos de la Directiva marco(89/391/CEE). Estas medidas incluyen la prevención de riesgos laborales, la información y la formación de los trabajadores y las organizaciones, y los medios para aplicar las medidas necesarias. Sobre la base de estas regulaciones, deben tenerse en cuenta los posibles riesgos vinculados a los exoesqueletos en lugares de trabajo específicos.

Los riesgos potenciales de los exoesqueletos en los entornos de trabajo son numerosos y están relacionados con su diseño y funcionalidad. Los sistemas activos pueden incluir defectos mecánicos y técnicos. En este caso, un mal funcionamiento puede provocar lesiones, ya que el mecanismo de accionamiento de los exoesqueletos activos puede ejercer fuerzas adicionales sobre el cuerpo del trabajador. En la actualidad, es difícil clasificar las fuerzas de los dispositivos en el cuerpo y su relación con las lesiones. Como referencia general, se pueden considerar los valores umbrales de los robots colaborativos (ISO/TS 15066:2016) (Schick, 2018). Es factible que los exoesqueletos puedan aumentar el riesgo de lesiones durante un resbalón, un tropiezo o una caída. Sin embargo, su influencia se evalúa actualmente como baja cuando se usan exoesqueletos para la parte superior del cuerpo durante la marcha a nivel (Kim et al., 2018). Sin embargo, dependiendo de la construcción y el peso del exoesqueleto, puede verse restringida la libertad natural de movimiento de los trabajadores. Esto dificulta el restablecimiento del equilibrio a través de movimientos de compensación en caso de caída. Las consecuencias podrían ser más graves que sin un exoesqueleto. Además, deben tenerse en cuenta las posibles colisiones entre un exoesqueleto y el equipo de trabajo, los robots o las máquinas de construcción. En este contexto, se realizaron simulaciones por ordenador para investigar las aplicaciones prácticas de los exoesqueletos en entornos de fábrica virtuales (Constantinescu et al., 2016). En conclusión, se han mencionado varias limitaciones relativas al rediseño de los lugares de trabajo con exoesqueletos integrados. En caso de emergencia, los edificios deben ser evacuados rápidamente para garantizar la seguridad y la salud de todos los empleados. Por lo tanto, la rápida extracción de un exoesqueleto resulta fundamental. Los diseñadores también deben considerar las situaciones en las que los trabajadores pueden estar solos.

En resumen, los riesgos para la seguridad y la salud de los exoesqueletos pueden estimarse en escenarios pero aún no se han especificado. Uno de los motivos es la limitación de medios de prueba científica (Schick, 2018) y la falta de experiencia práctica. Se desconocen, en particular, los efectos a largo plazo de los exoesqueletos en el sistema musculoesquelético. Por consiguiente, subsiste la necesidad de contar con estudios exhaustivos que tengan en cuenta los aspectos personales, fisiológicos, médicos y biomecánicos de los exoesqueletos.

Evaluación de los exoesqueletos

En la actualidad, las ventajas y desventajas de los exoesqueletos son objeto de controversia en los textos especializados. Por lo general, representan una oportunidad prometedora para que los grupos de investigación mejoren las condiciones ergonómicas de trabajo y reduzcan la manipulación manual de cargas (Hensel et al., 2018). Sin embargo, las demandas físicas que afectan al sistema musculoesquelético no son los únicos aspectos que deben tenerse en cuenta. Los exoesqueletos también pueden afectar al entorno social o influir en otros parámetros fisiológicos, como la presión arterial, el consumo de oxígeno y la frecuencia cardíaca.

Aspectos fisiológicos

Colocar una estructura externa como un exoesqueleto en el cuerpo de un trabajador puede tener efectos fisiológicos negativos. En la bibliografía sobre este tema, ya se ha demostrado que el peso adicional de un exoesqueleto posiblemente aumenta las exigencias cardiovasculares (Theurel et al., 2018), aunque los efectos son todavía poco conocidos. Una investigación previa reveló el impacto del peso en la demanda de energía durante el movimiento: se observó un mayor consumo de oxígeno correspondiente al peso transportado. Sin embargo, el gasto energético depende en gran medida del sexo, la velocidad al caminar y el peso corporal (Holewijn et al., 1992). Por el contrario, Whitfield et al. (2014) pudieron demostrar que un dispositivo de elevación ergonómico no aumenta el consumo de oxígeno durante las tareas repetitivas, aunque se incluyó la masa adicional de dicho dispositivo. Además, estos resultados están en consonancia con los hallazgos de diferentes grupos de investigación, en los que no se registraron cambios en la frecuencia cardíaca de los sujetos que usan un dispositivo de elevación personal (Godwin et al., 2009; Lotz et al., 2009). Como conclusión respecto de las aplicaciones industriales, Whitfield et al. (2014) sugieren que los dispositivos de elevación personal no deben utilizarse para aumentar el alcance de las tareas de trabajo. Estas diferentes conclusiones podrían basarse en la diversidad de exoesqueletos que se han estudiado con anterioridad. Además de la estructura mecánica y de la función de un exoesqueleto, las tareas laborales, por ejemplo, las condiciones dinámicas o estáticas, también tienen un impacto en los costes metabólicos y hacen que sea aún más difícil hacer afirmaciones generales. Sin embargo, en condiciones específicas, los exoesqueletos pueden reducir la fatiga muscular y, por lo tanto, ofrecen un gran potencial para la salud de los trabajadores, dado que se asume que la fatiga muscular aumenta el riesgo de lesiones (Godwin et al., 2009; Lotz et al., 2009). El apoyo permanente también puede tener efectos negativos a largo plazo en el sistema musculoesquelético. Es factible que se produzca una reducción de la masa muscular y, en consecuencia, una reducción de la fuerza corporal, pero estos efectos están muy relacionados con la cantidad de apoyo muscular del exoesqueleto.

Además, podrían producirse puntos de presión en aquellas áreas donde el exoesqueleto está adherido al cuerpo. Esto, a la larga, puede producir molestias. Por otro lado, es posible que la presión externa en los vasos sanguíneos, causada por las correas o cinturones, reduzca el flujo sanguíneo en la parte del cuerpo correspondiente. Asimismo, la frecuencia cardíaca y la presión arterial podrían verse modificadas mediante el uso de un exoesqueleto en condiciones de trabajo que supongan elevaciones repetitivas. Por último, es posible que se produzca irritación cutánea debido a la fricción o a reacciones alérgicas. Estos factores, no obstante, tienen carácter especulativo y solo pueden considerarse con precaución.

Aceptación del usuario y efectos psicosociales

Hay que tener en cuenta que, aunque los efectos físicos de los exoesqueletos pueden influir en el trabajador, la aceptación del usuario también puede desempeñar un papel importante en el entorno laboral. La aceptabilidad de un exoesqueleto resulta fundamental si va a utilizarse durante mucho tiempo. En la actualidad, se han realizado algunas investigaciones que tienen en cuenta las evaluaciones subjetivas de los exoesqueletos para abordar la cuestión de la aceptación de la tecnología (Gilotta et al., 2018; Hensel et al., 2018). Aunque muchos usuarios valoran de forma positiva los exoesqueletos duros, Hensel et al. (2018) demuestran que su aceptación puede disminuir con el tiempo y está relacionada con la incomodidad y la usabilidad. La incomodidad es uno de los aspectos que presenta más desafíos y puede impedir una amplia aplicación de exoesqueletos en los lugares de trabajo industriales (Bosch et al., 2016). Una vez más, cabe mencionar que estas evaluaciones están estrechamente relacionadas con tareas y exoesqueletos específicos y, por lo tanto, no pueden

generalizarse. Sin embargo, los resultados indican que los diseñadores deben tener en cuenta la funcionalidad y el peso, así como el diseño ergonómico de los exoesqueletos. Además, los trabajadores pueden sentirse menos válidos cuando utilizan un exoesqueleto para realizar sus tareas diarias, ya que el rendimiento físico también está vinculado con el dispositivo. Gilotta et al. (2018) mencionan los aspectos sociales como un factor que podría reducir la aceptabilidad. Llevar puesto un exoesqueleto también puede conducir a la estigmatización en el lugar de trabajo, ya que puede parecer que los trabajadores dependen de su ayuda.

Aspectos biomecánicos

En la actualidad, existen numerosos estudios que demuestran que los exoesqueletos pueden reducir el estrés físico en zonas locales del cuerpo, como las articulaciones escapulo-humorales o la región lumbar (Abdoli-E et al., 2006; Graham et al., 2009; Bosch et al., 2016; De Looze et al., 2016; Theurel et al., 2018; Weston et al., 2018). Sin embargo, al mismo tiempo, puede ser relevante que la redistribución del estrés físico provoque mayores cantidades de estrés en otras partes del cuerpo si las fuerzas no se transfieren al suelo (Theurel et al., 2018; Weston et al., 2018). En este contexto, Weston et al. (2018) descubrieron que un exoesqueleto para la parte superior del cuerpo aumenta la carga sobre la columna lumbar. Theurel et al. (2018) muestran que un exoesqueleto de la parte superior del cuerpo es capaz de reducir la actividad muscular en las articulaciones del hombro. No obstante, se ha mencionado la existencia de consecuencias físicas, entre las que se incluyen mayores niveles de actividad muscular en otras partes del cuerpo o diferentes patrones de movimiento. Además, el peso adicional del exoesqueleto no solo afecta a las exigencias cardiovasculares, sino que también desplaza el centro de la masa corporal, lo que influye en la actividad muscular del usuario. Es importante mencionar que los efectos de los exoesqueletos en el cuerpo humano no pueden generalizarse. Las preguntas de la investigación biomecánica suelen estar relacionadas con movimientos y actividades musculares muy específicas y no consideran todos los casos posibles de uso y tipos de exoesqueletos. Sin embargo, estas preguntas podrían abordar la falta de funcionalidad debido a los efectos mecánicos de exoesqueletos específicos y sus consecuencias sobre el estrés y la tensión corporal.

Retos para la salud y seguridad en el trabajo

La aplicación de nuevas tecnologías en el lugar de trabajo siempre implica una evaluación crítica de la SST para las partes interesadas. Por lo general, un diseño centrado en el ser humano, de acuerdo con la Directiva marco (89/391/CEE) es un requisito previo básico. En un sentido más estricto, esto implica que los lugares de trabajo estándar no requieren medidas adicionales. Sin embargo, debido a la situación laboral actual en Europa y a la conexión de las nuevas tecnologías con las enfermedades musculoesqueléticas, las condiciones ergonómicas no resultan evidentes. Para garantizar un buen entorno de trabajo, deben considerarse medidas técnicas, organizativas e individuales, de conformidad con la Directiva marco (89/391/CEE). En términos de su impacto en la SST, es obligatoria una aplicación jerárquica. Cuando se han agotado todas las medidas técnicas, por ejemplo, el uso de medios auxiliares de elevación o el rediseño de un lugar de trabajo, deben tenerse en cuenta aspectos organizativos como la reorganización de los procesos de trabajo. Por último, se pueden considerar medidas personales para proteger a los trabajadores.

Como se comentó anteriormente, los exoesqueletos pueden describirse como dispositivos técnicos o médicos y también pueden ser definidos como equipos de protección. Su clasificación depende en gran medida de su aplicación, diseño y uso previsto. Por lo tanto, los exoesqueletos solo pueden evaluarse en la actualidad mediante un enfoque caso por caso. En la práctica, es factible que los exoesqueletos se utilicen como dispositivos técnicos para facilitar los procesos de trabajo. Sin embargo, si se utilizan para mejorar el diseño de un lugar de trabajo en el que se necesitan medidas ergonómicas para proteger a los trabajadores frente a lesiones por uso excesivo, se considerarán equipos de protección individual.

En el futuro, la evaluación de los exoesqueletos deberá integrarse en el enfoque ergonómico tradicional (diseño centrado en el ser humano), ya que estos influyen en las situaciones de trabajo y en los aspectos organizativos.

Trabajadores

Los requisitos del usuario para los trabajadores dependen de la clasificación específica del exoesqueleto en cuestión. Si se certifican como dispositivos técnicos, los exoesqueletos estarán ligados a los lugares de trabajo y no pueden utilizarse en todas las situaciones laborales imaginables, a menos que hayan sido considerados para dicha aplicación. Sin embargo, los dispositivos técnicos no son medidas personales y su uso es voluntario. Si un exoesqueleto está certificado como EPI, su uso se prescribe legalmente. En este caso, el empleado deberá ir equipado con un exoesqueleto mientras esté expuesto a un incremento de la carga de trabajo.

Empresas

Durante la aplicación y la operación, los empresarios deben tener en cuenta diferentes aspectos. En comparación con las ayudas técnicas, los requisitos higiénicos de los EPI son más amplios. En este sentido, el uso de un exoesqueleto se vuelve obligatorio. Para cumplir con estas exigencias, al menos todos los trabajadores que operan en un lugar de trabajo que requiere un exoesqueleto en forma de EPI deberán estar equipados con uno de estos dispositivos, lo que puede causar problemas de almacenamiento. Además, se deben considerar las adaptaciones crónicas, los TME, las respuestas cardiovasculares y los aspectos del rendimiento. Además, deberá disponerse de suficientes productos de limpieza o de lavadoras para cumplir las normas de higiene. Los exoesqueletos que se definen como ayudas técnicas son opcionales y no tienen que estar disponibles para todos los empleados en el lugar de trabajo. No obstante, cuando se utilizan, deben considerarse una ayuda (apoyo) y no una forma de aumentar el rendimiento o la eficiencia de los trabajadores.

Responsables políticos

En el futuro, los responsables políticos deberán tener en cuenta la regulación de los exoesqueletos en relación con los aspectos técnicos y su aplicación, a fin de facilitar la certificación de la nueva tecnología. Esto permite que los fabricantes clasifiquen de forma más clara sus productos y que los empleadores utilicen los exoesqueletos para los fines previstos. Debe mencionarse, no obstante, que el uso previsto del producto y la correspondiente certificación son siempre responsabilidad del fabricante.

Resumen

En la actualidad el tema de los exoesqueletos recibe una atención considerable. Sin embargo, a pesar de su aparente prometedor potencial, debe cuestionarse su aplicación en una amplia gama de ámbitos. Queda por ver si los exoesqueletos se utilizarán de forma amplia en el futuro para proteger a los trabajadores de las lesiones por sobrecarga o para economizar los procesos de trabajo. Dependiendo de los avances técnicos, estos dispositivos pueden convertirse en una herramienta normalizada para los procesos de trabajo manual o seguir siendo un producto especializado para aplicaciones muy específicas. Sin embargo, el interés comercial actual por estos dispositivos también puede plantear un problema para el desarrollo futuro, ya que se puede dar prioridad a los enfoques económicos u orientados al rendimiento, lo que puede provocar que se descuide la seguridad en el trabajo. No obstante, los exoesqueletos pueden utilizarse como equipos técnicos, médicos o de protección individual, en función de su uso previsto en el lugar de trabajo. Si bien, debido a la variedad de funciones, diseño y aplicaciones, no se dispone de una definición uniforme, lo que complica su aplicación en la práctica con respecto a su certificación. Aunque existen numerosos estudios sobre exoesqueletos que tienen en cuenta diferentes aspectos de la usabilidad y la funcionalidad, hoy por hoy, los efectos sobre la salud de los empleados no se comprenden adecuadamente. En particular, se desconocen los efectos a largo plazo de los exoesqueletos sobre los parámetros fisiológicos, psicosociales y biomecánicos. En los futuros estudios se deberán abordar los efectos a largo plazo orientados a la práctica de los exoesqueletos en el lugar de trabajo para obtener resultados más fiables. Cabe mencionar que no se puede recomendar el uso de exoesqueletos para mejorar el diseño ergonómico en lugares de trabajo estáticos, pero que también existe un gran número de lugares de trabajo no fijos o móviles en los que no es posible adoptar medidas ergonómicas. En este contexto, los exoesqueletos pueden ofrecer un enfoque prometedor para reducir los TME en el futuro.

Autores: Peters, M. y Wischniewski, S. (2019). Instituto Federal de Salud y Seguridad en el Trabajo, Friedrich-Henkel-Weg 1-25, 44149 Dortmund, Alemania.

Gestión del proyecto: Annick Starren, Emmanuelle Brun, Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo (EU-OSHA), 2019

Le agradecemos al Dr. Lars Adolph, a la profesora y doctora Ute Latza y al grupo de centros de referencia de la EU-OSHA sus revisiones críticas y sus útiles sugerencias. También queremos expresar nuestra gratitud a EUROFOUND por el uso de las ilustraciones de este documento.

Este artículo se ha elaborado por encargo de la Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo (EU-OSHA). Su contenido, incluidas las opiniones o conclusiones expresadas, es responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja necesariamente las opiniones de la EU-OSHA.

Referencias

- 89/391/CEE. Directiva 89/391/CEE del Consejo, de 12 de junio de 1989, relativa a la aplicación de medidas para promover la mejora de la seguridad y de la salud de los trabajadores en el trabajo. El Consejo de las Comunidades Europeas.
- 89/686/CEE. Directiva del Consejo, de 21 de diciembre de 1989, sobre aproximación de las legislaciones de los Estados miembros relativas a los equipos de protección individual. El Consejo de las Comunidades Europeas.
- 93/42/CEE. Directiva 93/42/CEE del Consejo, de 14 de junio de 1993, relativa a los productos sanitarios. El Consejo de las Comunidades Europeas.
- 2006/42/CE. Directiva 2006/42/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de mayo de 2006, relativa a las máquinas y por la que se modifica la Directiva 95/16/CE (refundición). El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea.
- 2016/425. Reglamento (UE) 2016/425 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de marzo de 2016, relativo a los equipos de protección individual y por el que se deroga la Directiva 89/686/CEE del Consejo. El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea.
- Abdoli-E, M., Agnew, M. J. y Stevenson, J. M. (2006). An on-body personal lift augmentation device (PLAD) reduces EMG amplitude of erector spinae during lifting tasks. *Clinical Biomechanics*, 21 (5), 456-465.
- Baltrusch, S. J., van Dieën, J. H., van Bennekom, C. A. M. y Houdijk, H. (2018). The effect of a passive trunk exoskeleton on functional performance in healthy individuals. *Applied Ergonomics*, 72, 94-106.
- Bevan, S. (2015). Economic impact of musculoskeletal disorders (MSDs) on work in Europe. *Best Practice & Research in Clinical Rheumatology*, 29 (3), 356-373.
- Bosch, T., van Eck, J., Knitel, K. y de Looze, M. (2016). The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Applied Ergonomics*, 54, 212-217.
- Collins, J. D. y O'Sullivan, L. W. (2015). Musculoskeletal disorder prevalence and psychosocial risk exposures by age and gender in a cohort of office based employees in two academic institutions. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 46, 85-97.
- Constantinescu, C., Muresan, P.-C. y Simon, G.-M. (2016). JackEx: the new digital manufacturing resource for optimization of exoskeleton-based factory environments. *Procedia CIRP*, 50, 508-511.
- De Looze, M. P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K. S. y O'Sullivan, L. W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*, 59 (5), 671-681.
- INRS. (2018). Exosquelettes au travail: impact sur la santé et la sécurité des opérateurs – état des connaissances. París: Instituto Nacional de Investigación y Seguridad. Obtenido del INRS: <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206311>
- INRS. (2019). Acquisition et integration d'un exosquelette en entreprise: Guide pour les préventeurs. París: Instituto Nacional de Investigación y Seguridad. Obtenido del INRS: <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206315>
- Eurofound: (2012). *Quinta Encuesta sobre las condiciones de trabajo en Europa*. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.
- Eurofound: (2019). *Encuesta europea sobre las condiciones de trabajo 2015*. Bruselas: Eurofound: Obtenido de Eurofound: <https://www.eurofound.europa.eu/data/european-working-conditions-survey>.
- Gams, A., Petrič, T., Debevec, T. y Babič, J. (2013). Effects of robotic knee exoskeleton on human energy expenditure. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 60 (6), 1636-1644.
- Gilotta, S., Spada, S., Ghibaud, L., Isoardi, M. y Mosso, C. (2018). *Acceptability beyond Usability: A Manufacturing Case Study*. Ponencia presentada en el Congreso de la Asociación Internacional de Ergonomía.

- Godwin, A. A., Stevenson, J. M., Agnew, M. J., Twiddy, A. L., Abdoli-Eramaki, M. y Lotz, C. A. (2009). Testing the efficacy of an ergonomic lifting aid at diminishing muscular fatigue in women over a prolonged period of lifting. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39 (1), 121-126.
- Gopura, R. A. R. C. y Kiguchi, K. (2009). *Mechanical Designs of Active Upper-limb Exoskeleton Robots: State-of-the-art and Design Difficulties*. Ponencia presentada en la ICORR 2009: 11.^a Conferencia Internacional del IEEE sobre Robótica de Rehabilitación.
- Graham, R. B., Agnew, M. J. y Stevenson, J. M. (2009). Effectiveness of an on-body lifting aid at reducing low back physical demands during an automotive assembly task: assessment of EMG response and user acceptability. *Applied Ergonomics*, 40 (5), 936-942.
- Hensel, R., Keil, M., Mücke, B. y Weiler, S. (2018). Chancen und Risiken für den Betrieblichen Einsatz von Exoskeletten in der betrieblichen Praxis. *ASU Zeitschrift für medizinische Prävention*, 53, 654-661.
- Herr, H. (2009). Exoskeletons and orthoses: classification, design challenges and future directions. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 6 (21).
- Holewijn, M., Hens, R. y Wammes, L. (1992). Physiological strain due to load carrying in heavy footwear. *European Journal of Applied Physiology Occupational Physiology*, 65 (2), 129-134.
- ISO 10218-1:2011. Robots y dispositivos robóticos. Requisitos de seguridad para robots industriales. Parte 1: Robots. Ginebra: Organización Internacional de Normalización.
- ISO 13482:2014. Robots y dispositivos robóticos. Requisitos de seguridad para robots de asistencia personal no médicos. Ginebra: Organización Internacional de Normalización.
- ISO/TS 15066:2016. Robots y dispositivos robóticos — Robots de colaboración. Ginebra: Organización Internacional de Normalización.
- Kim, S., Nussbaum, M. A., Mokhlespour Esfahani, M. I., Alemi, M. M., Jia, B. y Rashedi, E. (2018). Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: part II — ‘unexpected’ effects on shoulder motion, balance, and spine loading. *Applied Ergonomics*, 70, 323-330.
- Liedtke, M. y Glitsch, U. (2018). Exoskelette — Verordnung für persönliche Schutzausrüstung. *sicher ist sicher*, 3, 110-113.
- Lotz, C. A., Agnew, M. J., Godwin, A. A. y Stevenson, J. M. (2009). The effect of an on-body personal lift assist device (PLAD) on fatigue during a repetitive lifting task. *Journal of Electromyography Kinesiology*, 19 (2), 331-340.
- Schick, R. (2018). Einsatz von Exoskeletten in der Arbeitswelt. *Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie*, 68 (5), 266-269.
- Theurel, J., Desbrosses, K., Roux, T. y Savescu, A. (2018). Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks. *Applied Ergonomics*, 67, 211-217.
- Viteckova, S., Kutilek, P. y Jirina, M. (2013). Wearable lower limb robotics: a review. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 33 (2), 96-105.
- Weston, E. B., Alizadeh, M., Knapik, G. G., Wang, X. y Marras, W. S. (2018). Biomechanical evaluation of exoskeleton use on loading of the lumbar spine. *Applied Ergonomics*, 68, 101-108.
- Whitfield, B. H., Costigan, P. A., Stevenson, J. M. y Smallman, C. L. (2014). Effect of an on-body ergonomic aid on oxygen consumption during a repetitive lifting task. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44 (1), 39-44.
- Yang, C., Zhang, J., Chen, Y., Dong, Y. y Zhang, Y. (2008). A review of exoskeleton-type systems and their key technologies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 222 (8), 1599-1612.
- Zurada, J. (2012). Classifying the risk of work related low back disorders due to manual material handling tasks. *Expert Systems with Applications*, 39 (12), 11125-11134.