



UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA

VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS EXOESQUELETOS PARA LA PREVENCIÓN DE TRASTORNOS MUSCULOESQUELÉTICOS EN EL TRABAJO

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA
OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN
ERGONOMÍA Y PSICOSOCIOLOGÍA
APLICADA AL TRABAJO

JIMMY CHIPANA SUYO
INGRID MARIA SALAZAR VELASCO

LIMA – PERÚ

2026

ASESOR

Mg. Armando Willy Talaverano Ojeda

JURADO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

MG. BRUNELLA YSABEL LIZARDO OTERO

PRESIDENTE

MG. MIRKO ROGERS PEZOA VILLANUEVA

VOCAL

DRA. CLAUDIA MYLENA TIRADO COSSER

SECRETARIO (A)

DEDICATORIA.

A mi madre Dora por su constante apoyo incondicional.

A mi padre José que me enseñó la perseverancia.

Jimmy

“Dedicado a mi familia, mis grandes maestros de vida. A mi madre Emperatriz por su incansable ejemplo de fuerza y trabajo. A mi tío Americo por regalarme la visión del optimismo en cada paso y a mi tía Maritza por enseñarme que la alegría es el ingrediente esencial para vivir plenamente. Gracias por creer en mi y ser mi guía constantemente”

Ingrid

AGRADECIMIENTOS.

A nuestros equipos de trabajo de la Maestría de Ergonomía

FUENTES DE FINANCIAMIENTO.

Trabajo de investigación autofinanciada



UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Los egresados:

N°	APELLIDOS Y NOMBRES
1.	SALAZAR VELASCO INGRID MARIA
2.	CHIPANA SUYO JIMMY

Pertenecientes al programa de la **MAESTRÍA EN ERGONOMÍA Y PSICOSOCIOLOGÍA APLICADA AL TRABAJO**, autores del trabajo titulado: **VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS EXOESQUELETOS PARA LA PREVENCIÓN DE TRASTORNOS MUSCULOESQUELÉTICOS EN EL TRABAJO**, el cual ha sido elaborado, sustentado y aprobado, según corresponda, para optar por el grado de **MAESTRO EN ERGONOMÍA Y PSICOSOCIOLOGÍA APLICADA AL TRABAJO** bajo la modalidad de **TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**.

En calidad de docentes asesores de la Universidad Peruana Cayetano Heredia:

N°	APELLIDOS Y NOMBRES DEL DOCENTE	FACULTAD	NIVEL DE ASESORÍA
1.	TALAVERANO OJEDA ARMANDO WILLY	FAMED	ASESOR

Declaramos que el contenido del presente documento es original y que las citas y referencias a otros autores cumplen con las normas académicas establecidas. En ese sentido, hacemos constar que:

- El documento presenta un porcentaje de similitud de **19%**, según el reporte emitido por el software **Turnitin®** (identificador de entrega: **3052497023**; fecha de entrega: **06-10-2026**).
- Tras una revisión detallada del reporte y del contenido del trabajo en cuestión, no se han identificado indicios de plagio.
- Se certifica que el documento respeta los principios de integridad académica y cumple con los requisitos institucionales de originalidad.

Lugar y fecha: Lima, 06 de octubre de 2026


Firma del asesor
N° DNI: 10303105
ORCID: 0000-0003-3541-6180

Firma del Co-asesor
N° DNI:
ORCID:

ÍNDICE

RESUMEN

ABSTRACT

I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	6
III. METODOLOGÍA Y PLAN DE ESTUDIO	7
IV. DESARROLLO DEL ESTUDIO	10
4.1. Tipos de exoesqueletos usados en la actividad laboral	10
4.2. Características de uso de exoesqueleto en la actividad laboral	18
4.3. Ventajas del uso del exoesqueleto en la prevención de trastornos musculoesqueléticos.	37
4.4. Limitaciones del uso del exoesqueleto en la prevención de trastornos musculoesqueléticos.	45
4.5. Limitaciones del estudio	51
V. CONCLUSIONES	53
VI. RECOMENDACIONES	56
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

RESUMEN

Introducción: Los trastornos musculoesqueléticos relacionados al trabajo constituyen una de las principales causas de incapacidad temporal a nivel mundial. Afectan predominantemente la espalda baja, hombros, cuello y articulaciones de las extremidades superiores, con mayor prevalencia en sectores como manufactura, construcción, agricultura e industria automotriz, donde predominan tareas repetitivas, posturas forzadas y manipulación manual de cargas. **Objetivo:** Realizar una revisión bibliográfica sobre las ventajas y limitaciones del uso de exoesqueletos en la prevención de trastornos musculoesqueléticos en el trabajo. **Metodología:** Se incluyeron artículos científicos publicados entre enero de 2016 y diciembre de 2025. La recopilación fue en bases de datos biomédicas como PubMed, ScienceDirect y Cochrane Library, seleccionando los documentos alineados con los objetivos del estudio. **Resultados:** Las ventajas de los exoesqueletos de espalda pasivos rígidos muestran reducciones agudas de carga lumbar en tareas específicas, aunque con resultados variables. Los exotrajes blandos pasivos reducen la actividad muscular durante el levantamiento, con efectos dependientes de la postura y la demanda, mientras que los exoesqueletos lumbares activos ofrecen mayor asistencia, pero se restringen a escenarios controlados. En hombro, extremidad superior e inferior, los beneficios se asocian a menor fatiga y demanda muscular, aunque con evidencia más limitada. Las limitaciones de los exoesqueletos, los beneficios biomecánicos agudos observados no se traducen en una prevención demostrable de los trastornos musculoesqueléticos. Además, se evidencian compensaciones biomecánicas y redistribución de cargas hacia regiones no asistidas, junto con discomfort, problemas de usabilidad y baja adherencia, factores

que restringen su efectividad en condiciones reales de trabajo. A ello se suma la carga cognitiva adicional y la presencia de riesgos emergentes para la seguridad.

Conclusión: Los exoesqueletos aportan beneficios biomecánicos agudos y pueden ser una herramienta complementaria, pero su impacto preventivo a gran escala es incierto debido a limitaciones metodológicas, operativas y a la falta de evidencia clínica prospectiva.

PALABRAS CLAVES: EXOESQUELETO, PREVENCION, TRASTORNO MUSCULOESQUELÉTICO

ABSTRACT

Introduction: Work-related musculoskeletal disorders (WMSDs) are among the leading causes of temporary disability worldwide. They predominantly affect the lower back, shoulders, neck, and upper limb joints, with higher prevalence in sectors such as manufacturing, construction, agriculture, and the automotive industry, where repetitive tasks, awkward postures, and manual material handling are common. **Objective:** To conduct a literature review on the advantages and limitations of exoskeleton use in the prevention of work-related musculoskeletal disorders. **Methodology:** Scientific articles published between January 2016 and December 2025 were included. The literature search was conducted in biomedical databases such as PubMed, ScienceDirect, and the Cochrane Library, selecting studies aligned with the objectives of the research. **Results:** Rigid passive back-support exoskeletons demonstrate acute reductions in lumbar load during specific tasks, although results are variable. Passive soft exosuits reduce muscle activity during lifting tasks, with effects dependent on posture and workload, whereas active lumbar exoskeletons provide greater assistance but are currently limited to controlled settings. For shoulder, upper limb, and lower limb devices, benefits are mainly associated with reduced muscle fatigue and demand, although the available evidence is more limited. Regarding limitations, the observed acute biomechanical benefits have not translated into demonstrable prevention of musculoskeletal disorders. Additionally, biomechanical compensations and load redistribution to non-assisted regions have been reported, along with discomfort, usability issues, and low long-term adherence, all of which limit effectiveness under real working conditions. Increased cognitive workload and emerging safety risks have also been

identified. **Conclusion:** Exoskeletons provide measurable acute biomechanical benefits and may serve as a complementary ergonomic tool; however, their large-scale preventive impact remains uncertain due to methodological and operational limitations, as well as the lack of prospective clinical evidence.

KEYWORDS: EXOSKELETON, PREVENTION, MUSCULOSKELETAL DISORDER

I. INTRODUCCIÓN

Los trastornos musculoesqueléticos relacionados al trabajo (TME-T) representan una de las principales causas de incapacidad temporal para el trabajo a nivel global y los principales segmentos corporales afectados son la espalda baja, hombros, cuello, articulaciones de extremidades superiores (Cardoso et al., 2024). Este problema es especialmente prevalente en sectores como la manufactura, la construcción, la agricultura y la industria automotriz , donde las tareas repetitivas, tareas con posturas forzadas y manipulación de cargas pesadas incrementan el riesgo de lesiones (Farahbakhsh et al., 2025; He et al., 2023).

A nivel mundial, el año 2021 la carga global de los trastornos musculoesqueléticos fue de 1,700 millones de casos prevalentes, con 150 millones de años de vida ajustados a discapacidad (DALYS) que representa el 5% del total de DAYS y la prevalencia es mayor en adultos mayores de 40 años (Institute for Health Metrics and Evaluation, 2024). Las principales causas de TME fueron dolor lumbar con 40%, dolor cervical 20%, osteoartritis con 15% y otros transtornos 15% (Institute for Health Metrics and Evaluation, 2024). Así mismo, se ha observado que las tasas de los TME-T fueron altas en las regiones con un índice de desarrollo económico alto y con una notable curva ascendente en las regiones de índice de desarrollo económico bajo y medio (Zhou et al., 2024).

En America Latina, la carga de dolor lumbar en la población en edad laboral (15–64 años) mostró un incremento sustancial en términos absolutos entre 1990 y 2021, evidenciado por el aumento de los casos prevalentes, que pasaron de 1.30 millones

a 2.85 millones, de los casos incidentes, que se incrementaron de 0.57 millones a 1.25 millones, y de los años de vida ajustados por discapacidad (DALYs), que ascendieron de 148 mil a 325 mil años de vida. (Zhang et al., 2025).

En el Perú en la población asegurada de EsSalud (2023), las enfermedades osteomusculares y del tejido conectivo constituyen uno de los principales contribuyentes a la carga de enfermedad medida en AVISA (Años de Vida Saludables Perdidos), con mayor impacto en mujeres y en edades productivas. Estas patologías fueron la primera causa de AVISA en mujeres (12.4%; 280,353 AVISA) y la segunda en hombres (5.3%; 120,885 AVISA). Asimismo, lideraron la carga de enfermedad en los grupos etarios de 15–44 años (20.9%; 103,296 AVISA), 45–59 años (25.9%; 133,271 AVISA) y ≥ 60 años (27%; 159,976 AVISA), evidenciando una carga significativa de discapacidad a lo largo del curso de vida (Oficina de Inteligencia e Información Sanitaria, 2024).

Desde el punto de vista económico y social la Organización Internacional del Trabajo, reporto que los trastornos musculoesqueléticos generan pérdidas económicas a las empresas generando el mayor número de días de descanso médico los cuales pueden llegar inclusive a discapacidad (Pega et al., 2022).

En este contexto, en los últimos años ha surgido un creciente interés en el uso de exoesqueletos como herramienta preventiva especialmente en tareas específicas y en situaciones laborales controladas (Cardoso et al., 2024).

Actualmente los exoesqueletos se han implementado en varios rubros laborales especialmente en la industria automotriz donde se requiere exactitud y trabajo a gran velocidad y a nivel del área de logística para el levantamiento de cargas. Además, estudios recientes han documentado reducciones en la actividad muscular del trapecio y deltoides de hasta un 64%, disminuciones del gasto cardíaco en un 15% y del esfuerzo percibido en tareas con el brazo elevado (Brunner et al., 2023). Los resultados más prometedores del uso de exoesqueletos se ha reportado durante la manipulación manual de carga especialmente con una disminución de la actividad de los músculos paravertebrales hasta un 18% (Schwartz et al., 2021). Diversos estudios han demostrado que el uso de exoesqueletos puede disminuir la actividad en la electromiografía de los músculos estudiados, la fatiga muscular, y la percepción subjetiva de esfuerzo durante tareas repetitivas o de carga (Tetteh et al., 2022).

Sin embargo estos beneficios de los exoesqueletos no son uniformes y dependen del tipo de exoesqueleto y la cinemática específica, pero su eficacia en un largo tiempo y adaptación es aún incierta porque se requieren estudios en situaciones laborales reales y bajo riesgo controlado (Schwartz et al., 2021).

A la fecha, la evidencia sobre el uso de exoesqueletos muestra resultados favorables como contradictorios. Por ejemplo, Kim et al. realizó un estudio longitudinal de 18 meses de duración sin encontrar diferencias estadísticas entre los dos grupos de usuario y no usuarios en términos de discomfort, sin embargo encontraron resultados favorables a segmentos corporales en el cuello y hombro (Kim et al., 2021). Asimismo, se han reportado efectos adversos sobre el equilibrio postural y aumento

de la distancia del centro de presión al usar exoesqueletos en plataformas inestables (Zheng et al., 2024).

Además, se han identificado limitaciones importantes relacionadas con la compatibilidad antropométrica, la restricción de movimiento, el diseño biomecánico y la fatiga inducida por el peso del dispositivo, lo cual puede obstaculizar su adopción masiva (Park et al., 2021). Estudios de campo han identificado efectos secundarios como incomodidad prolongada, interferencias con el equilibrio postural, y restricciones en el rango de movimiento, especialmente en superficies inestables o tareas no estandarizadas (Kim et al., 2021; Zheng et al., 2024). Asimismo, existe una brecha en la evaluación de variables psicosociales, percepción del usuario, adherencia al uso y análisis costo-beneficio en comparación con otras estrategias ergonómicas tradicionales (Botti & Melloni, 2023).

En este contexto, se plantea la necesidad de analizar de manera integral las ventajas y desventajas del uso de exoesqueletos en la prevención de TME-T, con el fin de generar información aplicable para la toma de decisiones en salud y seguridad del trabajo.

El presente estudio se justifica porque contribuirá a la toma de decisiones informadas permitirá fundamentar el uso racional y seguro de estas tecnologías emergentes, alineadas a la ergonomía participativa y la medicina ocupacional basada en evidencia.

Por lo tanto, el presente estudio tiene relevancia científica, impacto ergonómico y ocupacional, con posible aplicabilidad en políticas de salud laboral y en la necesidad de cerrar brechas de evidencia medica que limiten la implementación segura y efectiva de exoesqueletos en entornos reales de trabajo.

Por lo anterior comentado es importante responder la interrogante sobre ¿cuáles son las ventajas y limitaciones del uso de exoesqueletos en la prevención de trastornos musculoesqueléticos en el trabajo?

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- a) Realizar una revisión bibliográfica sobre las ventajas y limitaciones del uso de exoesqueletos en la prevención de trastornos musculoesqueléticos en el trabajo.

2.2. Objetivos específicos

- a) Describir los tipos de exoesqueleto para el uso en la actividad laboral.
- b) Describir las características del uso del exoesqueleto en la actividad laboral.
- c) Describir las ventajas del uso del exoesqueleto en la prevención de trastornos musculoesqueléticos.
- d) Describir las limitaciones del uso del exoesqueleto en la prevención de trastornos musculoesqueléticos.

III. METODOLOGÍA Y PLAN DE ESTUDIO

3.1. Diseño del estudio

El presente estudio fue una revisión narrativa tipo cualitativa y para los fines de este trabajo de investigación, se realizó una revisión exhaustiva y metodológica de la literatura científica en varias bases de datos.

Se consideraron los siguientes criterios de inclusión:

- a) Documentos científicos publicados entre enero 2016 a diciembre 2025. Se incluyó documentación fuera de este rango en forma excepcional por su relevancia para el presente estudio.
- b) Normativa vigente a diciembre del 2025.
- c) Acceso a artículo completo.
- d) Artículos en inglés y español.

Se consideraron los siguientes criterios de exclusión:

- a) Artículos que sean de paga para acceder al artículo completo.

3.2. Procedimientos y Técnicas

- a) Se realizó la búsqueda de la información mediante una pregunta PICO.
- b) Se realizó la búsqueda bibliográfica en buscadores Pubmed, Web of Science, Cochrane Library y SciELO.
- c) Se buscó duplicidad de artículos con el software versión libre Rayann, y se generó un formulario de extracción de estudios por los dos investigadores para minimizar errores y sesgos.
- d) Se extrajo información la cuales fueron: autor, año, diseño del estudio, características de los participantes, detalles de la intervención o estudio, y de existir resultados con medidas de efecto y riesgo de sesgo.

3.3. Análisis y procesamiento de datos

- a) Se realizó una descripción de las características de cada estudio resaltando sus hallazgos y conclusiones y de existir se describió el OR/RR con sus intervalos de confianza o heterogeneidad.
- b) Se agruparon los estudios por segmentos corporales y por temas de ventajas y limitaciones del uso de exoesqueletos para una mejor comprensión.
- c) Se detallaron patrones, tendencia, acuerdos, desacuerdos y vacíos en la literatura
- d) Se realizaron análisis crítico discutiendo la calidad de la metodología y riesgo de sesgo.

3.4. Consideraciones Éticas

- a) Se obtuvo la aprobación del protocolo del Comité de ética de la Universidad Peruana Cayetano Heredia.
- b) Este estudio de investigación se realizó según la metodología planteada respetando la autoría de los estudios originales.
- c) Se minimizo cualquier sesgo en la redacción de la información.
- d) Los datos sensibles se usaron de manera responsable y codificada
- e) No se realizó estudios experimentales en personas ni animales.

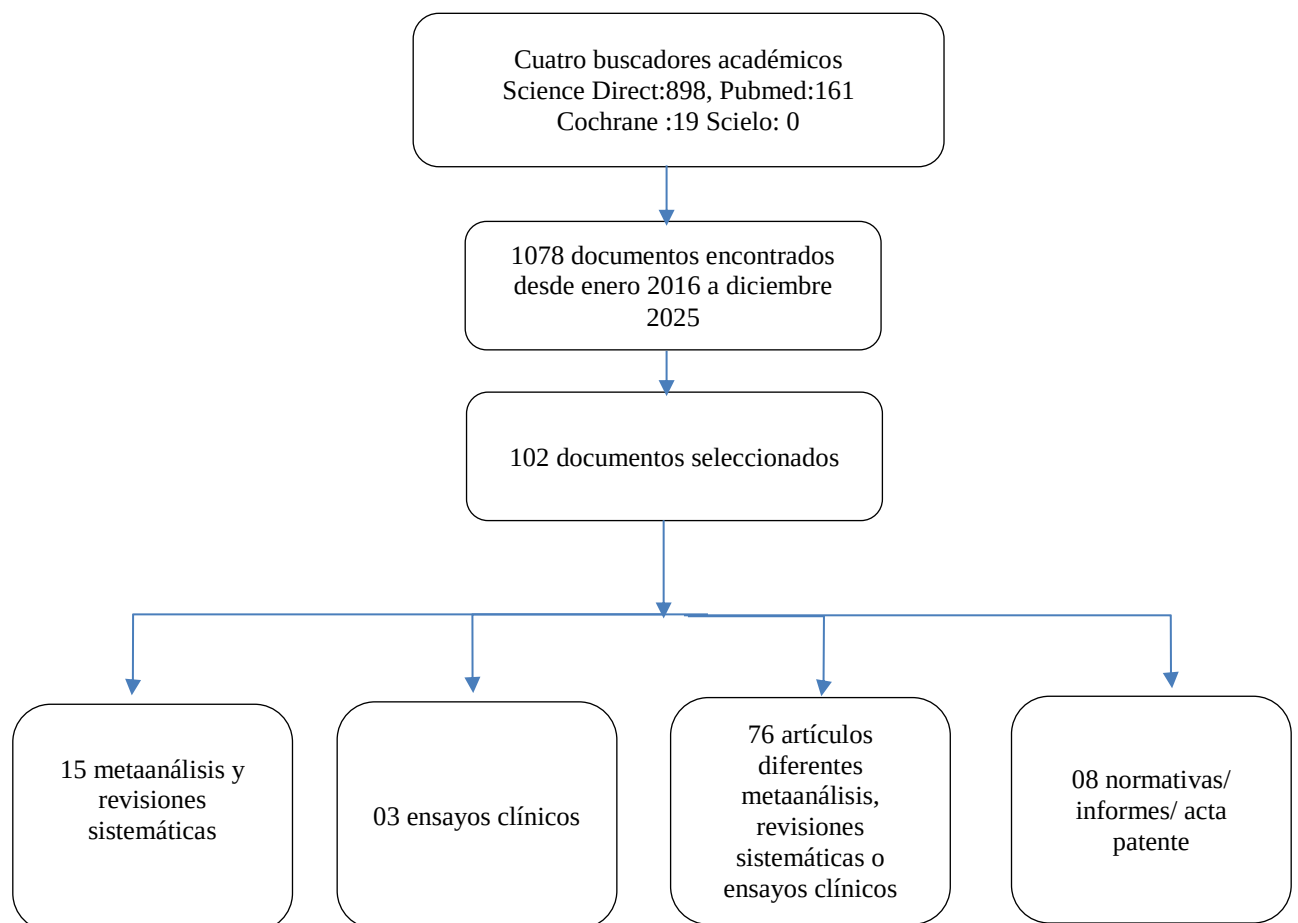
En el presente estudio de investigación, como resultado de la etapa de búsqueda de información científica, se obtuvieron los siguientes resultados:

- a) Se identificaron 1078 documentos relacionados con el tema de investigación, los cuales cumplieron con los términos de búsqueda previamente establecidos.

b) Tras la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión, se seleccionaron 102 documentos, los cuales fueron utilizados para el desarrollo del estudio e incorporados a la bibliografía final del trabajo.

c) Los documentos incluidos estuvieron conformados por, 102 artículos publicados en revistas científicas de los cuales 15 correspondieron a artículos de revisiones sistemáticas y metaanálisis, 03 ensayos clínicos y 76 a artículos originales u otros diseños de investigación, así como 08 normativas e informes técnicos, actas o patente directamente relacionados con el objeto de estudio.

d) El proceso de búsqueda, selección y revisión de la literatura se desarrolló conforme al siguiente procedimiento:



IV. DESARROLLO DEL ESTUDIO

4.1. Tipos de exoesqueletos usados en la actividad laboral

El concepto de exoesqueleto aplicado al apoyo del movimiento humano tiene antecedentes históricos que se remontan a finales del siglo XIX. En 1890, Nicholas Yagn registró en la oficina de patentes de los Estados Unidos uno de los primeros dispositivos mecánicos destinados a asistir actividades como caminar, correr y saltar, sentando las bases conceptuales de lo que hoy se reconoce como exoesqueleto (Yagn, 1890).

En la literatura contemporánea, el exoesqueleto se define como un dispositivo externo al cuerpo humano, diseñado para acoplarse mecánicamente a uno o varios segmentos corporales con el objetivo de asistir, complementar o aliviar la actividad muscular y articular durante el movimiento o el mantenimiento de posturas, mediante el uso de estructuras pasivas (resortes, elementos elásticos, sistemas mecánicos) o activas (motores, actuadores y fuentes de energía externas) (Baldassarre et al., 2022; Gao et al., 2024; Weston et al., 2022). Además, la implementación de exoesqueletos tienen fases ya definidas como caracterización, preparación, pre-evaluación, evaluación central, post-evaluación, análisis y reflexión (Ralfs et al., 2021). Esta definición e implementación resulta particularmente relevante en el ámbito laboral, donde los exoesqueletos se proponen como una estrategia tecnológica preventiva nueva motivo de este presente trabajo de investigación.

Desde una perspectiva funcional y ergonómica, los exoesqueletos utilizados en la actividad laboral pueden clasificarse de diversas maneras. Las clasificaciones

más empleadas consideran la fuente de energía, la región corporal asistida, el tipo de estructura mecánica (rígida o blanda) y la finalidad del dispositivo (asistencia postural, soporte de carga, aumento de fuerza o reducción de fatiga) (De La Tejera et al., 2020; Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) & Zubizarreta Molinuevo, 2021). Estas categorías no son excluyentes, pero permiten un análisis sistemático de las prestaciones, limitaciones y posibles aplicaciones de cada tipo de exoesqueleto en contextos reales de trabajo.

Una de las clasificaciones más relevantes para el análisis es aquella basada en la fuente de energía, que distingue entre exoesqueletos pasivos y exoesqueletos activos (Crea et al., 2021; Fox et al., 2019; Preethichandra et al., 2024):

- Los exoesqueletos pasivos se caracterizan por no incorporar fuentes de energía externas, como baterías o motores. Su funcionamiento se basa en principios mecánicos, utilizando resortes, amortiguadores, sistemas de poleas o elementos elásticos que permiten almacenar y liberar energía o redirigir la carga biomecánica desde grupos musculares más exigidos hacia estructuras más robustas del cuerpo o directamente hacia el suelo (Crea et al., 2021). En el ámbito laboral, este tipo de exoesqueletos ha mostrado una mayor adopción comercial, debido a su menor peso, simplicidad mecánica, facilidad de uso y menor interferencia con la tarea, siendo utilizados principalmente en actividades que implican posturas estáticas o semiestáticas prolongadas, como el trabajo con brazos elevados o la flexión sostenida del tronco (Ashta et al., 2023).

- Los exoesqueletos activos se caracterizan porque incorporan motores, actuadores y una fuente de energía como baterías lo que proporciona asistencia activa, potenciando el movimiento del trabajador usuario, ofreciendo mayor soporte y adaptabilidad (Ali et al., 2021), y a nivel laboral se utilizan en tareas que requieren una fuerza asistida considerable y continua o en movimientos dinámicos que superan la capacidad humana (Walter et al., 2023).

Desde una perspectiva de ergonomía, los exoesqueletos pasivos resultan particularmente relevantes porque su diseño prioriza la reducción de la carga muscular y articular, más que el aumento del rendimiento físico. Esto los posiciona como una alternativa potencialmente útil en estrategias de prevención primaria de trastornos musculoesqueléticos, especialmente en segmentos corporales como la región lumbar y los hombros, donde la exposición a cargas posturales sostenidas constituye un factor de riesgo bien establecido (Bär et al., 2021; Kermavnar et al., 2021).

Por otro lado, los exoesqueletos activos permiten proporcionar asistencia activa al movimiento, amplificando la fuerza generada por el usuario y adaptándose dinámicamente a diferentes patrones de movimiento (Ali et al., 2021). Este tipo de exoesqueletos ofrece mayores niveles de soporte y versatilidad, lo que los hace adecuados para tareas que requieren fuerza asistida continua, levantamiento repetitivo de cargas elevadas o movimientos dinámicos complejos que

superan la capacidad física humana sin apoyo tecnológico (Walter et al., 2023).

No obstante, en contextos laborales reales, la aplicación de exoesqueletos activos enfrenta importantes limitaciones, como el aumento del peso total del sistema, la dependencia energética, la complejidad de mantenimiento y posibles restricciones a la movilidad natural del trabajador. Estas características han limitado su implementación a escenarios específicos y controlados, y han generado un debate en la literatura sobre su viabilidad como herramienta preventiva a gran escala en salud ocupacional (Schwerha et al., 2021).

En este sentido, el análisis comparativo entre exoesqueletos pasivos y activos pone de manifiesto una tensión central en su aplicación laboral: mientras los dispositivos activos priorizan el aumento del rendimiento, los pasivos se orientan principalmente a la reducción de la exposición biomecánica, aspecto directamente vinculado con la prevención de lesiones (Govaerts et al., 2024; Knafo et al., 2025). Esta diferenciación resulta clave para el presente trabajo de investigación, ya que permite contextualizar el análisis posterior de los exoesqueletos como dispositivos con mayor potencial de implementación real y relevancia preventiva en actividades laborales que implican carga postural sostenida.

Otra clasificación ampliamente utilizada en el ámbito laboral se basa en la zona corporal asistida, dado que la región anatómica de intervención determina tanto el tipo de carga biomecánica mitigada como el potencial impacto preventivo sobre los trastornos musculoesqueléticos. Desde este enfoque, los exoesqueletos pueden agruparse en aquellos destinados al soporte de la espalda lumbar, de las extremidades superiores (hombros y brazos) y de las manos, categorías que reflejan las principales áreas de sobrecarga en múltiples sectores productivos (Crea et al., 2021; De Bock, Ghillebert, et al., 2022):

- Los exoesqueletos de soporte lumbar están diseñados para asistir posturas de flexión del tronco, redistribuyendo parte del peso de la porción superior del cuerpo y reduciendo la demanda mecánica sobre la columna lumbar (Reimeir et al., 2023). Estos dispositivos resultan especialmente relevantes en tareas que implican manipulación manual de cargas a nivel del suelo o posturas inclinadas prolongadas, situaciones frecuentemente asociadas a un mayor riesgo de dolor lumbar y lesiones por sobrecarga (Koopman et al., 2020). La evidencia experimental sugiere que este tipo de exoesqueletos puede disminuir la activación muscular lumbar y la percepción de esfuerzo durante tareas estáticas o semiestáticas, aunque su efectividad puede variar en contextos dinámicos (Kermavnar et al., 2021). Desde una perspectiva ergonómica, su interés radica en el potencial para reducir la exposición acumulativa a cargas posturales, uno de los principales determinantes del dolor lumbar relacionado con el trabajo (Baldassarre et al., 2022).

- Por su parte, los exoesqueletos destinados a las extremidades superiores, con acción principalmente en hombros y brazos, tienen como objetivo asistir la elevación sostenida de los miembros superiores, descargando la musculatura del cuello y del complejo escapulohumeral. Estos dispositivos han sido desarrollados para actividades industriales que requieren trabajo con los brazos por encima del nivel de los hombros, como la manufactura, la aeronáutica o el ensamblaje en líneas de producción. No obstante, la literatura también señala la necesidad de evaluar cuidadosamente su impacto sobre la movilidad y la adaptación a tareas dinámicas.
- Finalmente, los exoesqueletos para manos y dedos están orientados a proporcionar asistencia en tareas que requieren fuerza de agarre, pinza o manipulación fina, ya sea para compensar déficits funcionales o para reducir la carga muscular durante actividades repetitivas. Su aplicación es particularmente relevante en procesos de rehabilitación y en escenarios laborales posteriores a eventos adversos a la salud, como lesiones musculoesqueléticas o neurológicas, donde la recuperación de la función manual resulta crítica. La evidencia disponible sugiere que estos dispositivos pueden mejorar la capacidad de prensión y disminuir el esfuerzo percibido, aunque su implementación en entornos laborales aún es limitada y requiere mayor validación funcional (Huamanchahua et al., 2022; Kabir et al., 2022).

Según su finalidad y contexto de aplicación, los exoesqueletos pueden agruparse en aquellos destinados al ámbito industrial, la rehabilitación clínica,

el uso militar y la asistencia en la vida cotidiana, categorías que reflejan diferencias en sus objetivos funcionales, criterios de evaluación y expectativas de impacto (Ahmad et al., 2024; Chao et al., 2024).

- En el contexto industrial, la literatura reciente coincide en la necesidad de un enfoque de evaluación armonizado y multicriterio previo a la adopción rutinaria de exoesqueletos. Dicho enfoque integra indicadores objetivos de carga biomecánica y fisiológica con medidas de desempeño funcional, complementadas por variables subjetivas relacionadas con el confort, la usabilidad y la aceptación del usuario. La utilización de protocolos estandarizados se plantea como un requisito esencial para mejorar la comparabilidad entre tareas y entornos productivos, así como para sustentar decisiones de implementación basadas en evidencia (Hoffmann et al., 2022; Ralfs et al., 2021).
- Desde la rehabilitación clínica, la evaluación de exoesqueletos se orienta principalmente a su impacto sobre la función motora y la eficiencia de la marcha (Bunge et al., 2021). Estudios recientes han analizado los efectos de exoesqueletos motorizados de cadera de una sola articulación, reportando cambios en parámetros espaciotemporales de la marcha (velocidad, longitud de paso y zancada), así como en variables metabólicas y neuromusculares, incluyendo consumo de oxígeno, costo energético y actividad electromiográfica. Estos hallazgos respaldan el potencial terapéutico de los exoesqueletos, aunque también evidencian la necesidad de una evaluación integral que considere la simetría y la calidad del movimiento (Daliri et al., 2024).

- En el ámbito militar, los exoesqueletos se han desarrollado con el objetivo de mejorar el rendimiento físico del soldado y reducir la carga biomecánica asociada a entrenamientos y operaciones en condiciones exigentes, caracterizadas por el porte de cargas externas, terrenos irregulares y jornadas prolongadas. La evidencia disponible sugiere beneficios en términos de reducción de la demanda física en determinadas condiciones; sin embargo, estudios recientes también muestran que la efectividad de los exoesqueletos pasivos puede diferir entre situaciones estáticas y dinámicas, particularmente durante la marcha con carga, lo que pone de manifiesto la complejidad de su aplicación en escenarios reales (Kong et al., 2023; Ma et al., 2025).

En conjunto, esta clasificación por finalidad permite evidenciar que la evaluación y el impacto de los exoesqueletos dependen estrechamente del contexto de uso, y refuerza la necesidad de análisis específicos para cada ámbito. Desde la perspectiva de la presente investigación, esta diferenciación resulta clave para delimitar el enfoque de estudio y fundamentar la selección del tipo de exoesqueleto analizado, priorizando aquellos con mayor pertinencia y aplicabilidad en el problema de investigación planteado

4.2. Características de uso de exoesqueleto en la actividad laboral

4.2.1. Exoesqueletos de espalda baja

a) Exoesqueletos lumbares pasivos rígidos

- La evidencia experimental disponible indica de manera consistente que los exoesqueletos lumbares pasivos pueden reducir la carga biomecánica durante tareas de flexión anterior del tronco, medido mediante la disminución de la actividad electromiográfica de la musculatura lumbar y de los extensores de la cadera (Kermavnar et al., 2021). Los primeros estudios cuantitativos demostraron este efecto en adultos sanos durante posturas sostenidas, estableciendo una base experimental para su aplicación en tareas predominantemente estáticas (Bosch et al., 2016).
- Investigaciones posteriores ampliaron estos hallazgos a escenarios más dinámicos, como el levantamiento repetitivo de cargas, mostrando que dispositivos como BackX™ y Laevo™ reducen los picos de activación de los extensores del tronco y el gasto energético, con efectos más pronunciados en tareas simétricas que en asimétricas (Madinei et al., 2020). No obstante, estudios de laboratorio más recientes evidencian que estos beneficios pueden acompañarse de ajustes compensatorios (trade off), incluyendo mayor activación de musculatura no objetivo y cambios en la cinemática de cadera y rodilla, lo que sugiere una redistribución de cargas hacia otros segmentos corporales y posibles implicancias funcionales (Luger et al., 2023).

- En contraste, desarrollos más recientes de exoesqueletos pasivos textiles han mostrado una asistencia más focalizada. En particular, el LiftSuit 2.0 logró reducciones significativas de la actividad electromiográfica en músculos objetivo del tronco durante flexión estática y levantamientos repetitivos, sin incrementos relevantes en musculatura no objetivo ni alteraciones sustanciales del rango de movimiento, aunque con una marcada variabilidad interindividual asociada a características antropométricas (Van Sluijs et al., 2023).
- Desde un enfoque comparativo, los exoesqueletos activos han demostrado una mayor capacidad para reducir la actividad electromiográfica de los extensores del tronco que los pasivos, especialmente en tareas dinámicas; sin embargo, esta mayor asistencia se acompaña de modificaciones cinemáticas, como incrementos en la flexión lumbar y de cadera, que podrían implicar desplazamiento de cargas hacia otras regiones corporales (Schwartz et al., 2023). En conjunto, estos hallazgos sugieren que, si bien los exoesqueletos lumbares pasivos ofrecen beneficios claros en la reducción de la carga muscular lumbar en determinadas condiciones, su efectividad depende del tipo de tarea, del diseño del dispositivo y de las características del usuario, lo que refuerza la necesidad de evaluaciones críticas orientadas a su aplicación preventiva en contextos laborales reales

b) Exoesqueletos lumbares pasivos tipo exo-traje blando o “soft exosuit”

- La evidencia experimental reciente pone de manifiesto que la efectividad de los exoesqueletos lumbares pasivos depende de su diseño, del tipo de tarea y del contexto de uso, mostrando resultados heterogéneos en términos biomecánicos, fisiológicos y funcionales. Estudios comparativos iniciales entre estructuras rígidas y exotrajes textiles indican que los exosuits pasivos tienden a ofrecer una asistencia más favorable durante tareas de flexión del tronco, al reducir de forma moderada la actividad electromiográfica de los erectores espinales, mientras que algunos exoesqueletos rígidos pueden incluso incrementar la activación muscular o inducir mayores inclinaciones del tronco en determinadas fases del movimiento, lo que sugiere posibles interferencias biomecánicas (Schwartz et al., 2021).
- En contextos de manipulación manual de cargas, la evidencia es mixta. Ensayos experimentales en población militar han mostrado que el uso de exotrajes lumbares pasivos, como el Auxivo LiftSuit 2.0, no genera beneficios consistentes durante levantamientos verticales, pero sí puede reducir significativamente la activación del erector espinal en tareas laterales confinadas, aunque con una marcada variabilidad interindividual (Johns et al., 2025; Kang, 2025; Marican et al., 2025). Estos hallazgos refuerzan la idea de que la efectividad del exoesqueleto está fuertemente condicionada por la dirección de la carga y la estrategia motora requerida por la tarea.
- Desde una perspectiva más aplicada, estudios en el sector de la construcción han incorporado la evaluación de usabilidad, aceptación y discomfort

percibido, reconociendo el elevado peso de los trastornos musculoesqueléticos lumbares en este ámbito. En tareas de colocación de pisos, los exoesqueletos pasivos fueron percibidos como fáciles de usar y se asociaron con reducciones del discomfort en la región lumbar y en extremidades inferiores; sin embargo, también se identificaron incrementos significativos del discomfort torácico, evidenciando efectos no intencionados derivados de la redistribución de cargas (Ogunseiju et al., s. f.). Este tipo de resultados subraya la necesidad de evaluar los exoesqueletos más allá de su efecto local sobre la región lumbar.

- Otros estudios de laboratorio han reportado resultados más consistentes en condiciones controladas. En particular, el uso de exoesqueletos lumbares pasivos como Angel X se asoció con reducciones significativas de la activación electromiográfica y de la fatiga muscular, así como con descensos relevantes del consumo de oxígeno y del gasto energético durante levantamientos repetitivos, acompañados de una disminución del esfuerzo percibido y del discomfort musculoesquelético (Ahn et al., 2025). Estos hallazgos respaldan el potencial de los exoesqueletos pasivos para reducir la carga biomecánica y fisiológica aguda, aunque su extrapolación a entornos laborales reales requiere cautela.
- La incorporación de modelos biomecánicos avanzados ha permitido profundizar en la comprensión de los mecanismos de asistencia. El uso de mapas biomecánicos corporales y modelos musculoesqueléticos impulsados por electromiografía en tiempo real ha demostrado que ciertos exoesqueletos pasivos pueden reducir de manera significativa la compresión

y la cizalla a nivel lumbosacro, así como los momentos articulares, detectando cambios biomecánicos atribuibles al soporte del dispositivo con alta concordancia respecto a métodos de referencia (Moya-Esteban et al., 2023; Tröster et al., 2025). No obstante, estos efectos varían sustancialmente entre dispositivos, observándose una mayor capacidad de descarga lumbar en algunos diseños frente a otros.

- La evidencia más robusta desde el punto de vista ergonómico proviene de estudios en condiciones reales de trabajo. Un ensayo clínico aleatorizado en trabajadores logísticos seguidos por 24 semanas mostró que el uso prolongado de un exoesqueleto pasivo de soporte lumbar se asoció con reducciones consistentes de la actividad electromiografía de los erectores espinales durante tareas de levantamiento, sin incrementos compensatorios relevantes en otros músculos. Sin embargo, no se evidenció un efecto acumulativo adicional del uso prolongado, y los cambios en discomfort musculoesquelético fueron poco concluyentes, pese a una aceptación y usabilidad moderadamente positivas (Jakobsen et al., 2025).
- Finalmente, estudios recientes han explorado el impacto de los exoesqueletos pasivos sobre la fatiga y el desempeño en tareas repetitivas complejas, como el paletizado. En estos escenarios, el uso de exoesqueletos se asoció con reducciones significativas del esfuerzo percibido y de la actividad electromiográfica lumbar, mejoras modestas en el tiempo de ejecución y cambios en los patrones de coordinación intersegmentaria, lo que sugiere una redistribución de la carga hacia otros segmentos corporales (Ratke et al., 2025).

- De manera complementaria, análisis cinemáticos detallados han mostrado que parte de la reducción de momentos lumbosacros observada con exoesqueletos pasivos puede explicarse por cambios en la estrategia de movimiento, como una mayor rotación pélvica hacia la carga, más que por el soporte mecánico directo, además de evidenciar problemas de desalineación entre el dispositivo y la anatomía del usuario (Johns et al., 2025)
- En conjunto, estos estudios muestran que los exoesqueletos lumbares pasivos pueden reducir la carga biomecánica lumbar y el esfuerzo percibido en determinadas condiciones, pero también ponen en evidencia efectos compensatorios (trade off), variabilidad interindividual y limitaciones de diseño. Desde la perspectiva del presente trabajo de investigación, estos hallazgos refuerzan la necesidad de una evaluación crítica e integral que considere no solo la reducción de la carga lumbar, sino también la redistribución global de cargas, la fatiga, la aceptación del usuario y la aplicabilidad real en contextos laborales específicos.

c) Exoesqueletos lumbares activos

La evidencia experimental reciente sobre exoesqueletos lumbares activos sugiere que estos dispositivos pueden reducir de manera relevante la carga biomecánica lumbar durante tareas de manipulación manual de cargas, aunque con efectos dependientes de la magnitud de la carga y con posibles costos biomecánicos en otros segmentos corporales.

- En laboratorio con un diseño intra-sujeto, Marican et al. evaluaron el exoesqueleto lumbar activo XoTrunk —con un torque total de 20 Nm distribuido en dos motores— en nueve varones sanos durante el transporte de cargas de distinta magnitud (ligera, media y pesada) a lo largo de un trayecto de 7,5 m. Mediante electromiografía y unidades de medición inercial, los autores observaron que el beneficio lumbar fue dependiente de la carga, con una reducción de la demanda muscular de hasta 12 % durante el transporte de cargas pesadas, mientras que en cargas ligeras se evidenció incluso un posible incremento de la demanda. Aunque la mayoría refirió una percepción subjetiva de alivio en la región lumbar, el uso del exoesqueleto se asoció con costos biomecánicos en las extremidades inferiores, incluyendo una reducción del rango de movimiento de cadera y rodilla cercana al 10 %, un incremento del tiempo de zancada del 6 % y sensaciones de restricción en las piernas (Marican et al., 2025). Estos hallazgos sugieren que la disminución de la carga lumbar puede lograrse a expensas de una redistribución de cargas hacia los miembros inferiores, aspecto crítico desde una perspectiva ergonómica integral.
- Resultados complementarios fueron reportados por Walter et al. quienes analizaron el efecto del exoesqueleto lumbar activo Cray X durante una tarea de levantamiento tipo *stoop* con carga de 15 kg en catorce jóvenes sanos. En este estudio se compararon condiciones con y sin exoesqueleto, incorporando mediciones de electromiografía y de esfuerzo percibido. Bajo condiciones de soporte máximo (100 %), se observó una reducción significativa de la actividad electromiográfica del erector espinal medial, y

disminución del esfuerzo percibido. Al evaluar once niveles progresivos de asistencia (0–100 %), la reducción promedio de la activación muscular respecto a la condición sin exoesqueleto osciló entre aproximadamente 8 % y 22 %, evidenciándose una marcada variabilidad interindividual en la magnitud del beneficio. Estos resultados refuerzan la idea de que la asistencia activa puede ser eficaz para disminuir la carga lumbar en tareas específicas, pero que su efecto no es uniforme entre usuarios, lo que plantea interrogantes sobre la personalización del nivel de soporte (Walter et al., 2023).

- Desde un enfoque laboral, Ojha et al. evaluaron el desempeño del exoesqueleto lumbar activo Cray-X (8 kg) mediante un diseño experimental cruzado y aleatorizado en dieciocho trabajadores jóvenes y sanos durante tareas representativas del sector construcción, incluyendo manipulación manual de cargas de 13,6 kg y actividades de amarre de fierro. Las tareas tuvieron duraciones cercanas a diez minutos, lo que permitió analizar respuestas biomecánicas, metabólicas y posturales en condiciones de mayor complejidad funcional. Los resultados mostraron una reducción promedio del 60 % en la activación electromiográfica de los principales músculos de la espalda y del abdomen al utilizar el exoesqueleto, alcanzando reducciones de hasta 66,7 % y 58,8 % en el erector espinal lumbar izquierdo y derecho, respectivamente, durante subtareas de levantamiento. Asimismo, el costo metabólico disminuyó en un 17 % en comparación con la condición sin exoesqueleto. Desde el punto de vista ergonómico, los índices posturales evidenciaron una reducción cercana al 50 % del riesgo ergonómico, sin

observarse diferencias significativas en métricas de estabilidad y balance (Ojha et al., 2024). En conjunto, estos hallazgos sugieren que, en condiciones experimentales de corto plazo, los exoesqueletos lumbares activos pueden reducir de manera sustancial la demanda muscular, metabólica y el riesgo postural, sin comprometer la estabilidad del trabajador.

No obstante, al integrar estos estudios, emerge una tensión conceptual relevante: mientras los exoesqueletos lumbares activos muestran una alta capacidad para disminuir la carga lumbar y el esfuerzo percibido, especialmente en tareas exigentes y de corta duración, su uso también puede inducir ajustes cinemáticos y redistribuciones de carga hacia otros segmentos corporales, como las extremidades inferiores, y presentar una elevada variabilidad interindividual (Chung et al., 2024; Panero et al., 2025; Walter et al., 2023). Desde la perspectiva del presente trabajo de investigación, estos hallazgos subrayan la necesidad de evaluar los exoesqueletos activos no solo en términos de reducción de la actividad muscular lumbar, sino también considerando sus efectos sistémicos, la adaptación del movimiento y su viabilidad como estrategia preventiva sostenible en contextos laborales reales, lo que refuerza la pertinencia de estudios longitudinales y de evaluaciones integrales en campo.

4.2.2. Exoesqueletos hombro y extremidad superior

La evidencia disponible sobre exoesqueletos pasivos para hombro y extremidad superior converge en un punto central: estos dispositivos pueden

disminuir de manera significativa la carga muscular del complejo escapulohumeral durante tareas con brazos elevados, especialmente en actividades por encima de la cabeza (Pacífico et al., 2022); sin embargo, sus beneficios no son uniformes y pueden acompañarse de trade-offs en comodidad, desempeño, control postural o redistribución de cargas hacia otros segmentos. Bajo esta lógica, el análisis de estudios controlados y de campo permite identificar, por un lado, un efecto biomecánico consistente sobre músculos objetivo y, por otro, condiciones de tarea y diseño del exoesqueleto que modulan la magnitud del beneficio y sus consecuencias no intencionadas.(Brandt et al., 2025; Ma & Xiong, 2024; Van Der Have et al., 2022)

En condiciones controladas de laboratorio, Yin et al. evaluaron el efecto agudo del exoesqueleto pasivo de miembro superior PULE (1,9 kg) durante una tarea simulada de instalación de pernos por encima de la cabeza, en 15 varones jóvenes. Cada participante completó ciclos estandarizados de 10 minutos en tres alturas de trabajo (baja, media y alta) bajo condiciones con y sin exoesqueleto. Los desenlaces principales incluyeron la actividad electromiográfica de músculos del hombro y miembro superior (deltoides, trapecio y tríceps) y el discomfort percibido (RPD). El estudio mostró reducciones relevantes en la carga muscular: la EMG inicial del deltoides anterior derecho disminuyó en 38,5% y la EMG media del deltoides se redujo en 45,1%, acompañándose de una disminución del discomfort total de 52,4% respecto a la condición sin exoesqueleto. El mayor beneficio se observó a la mayor altura de trabajo, lo que sugiere un mecanismo de efecto

dependiente del ángulo de elevación del brazo y de la demanda gravitacional asociada (Yin et al., 2020).

- Una línea de investigación relacionada Desbrosses et al. evaluaron, en un estudio intra-sujeto con 29 participantes, dos exoesqueletos pasivos de miembro superior con distinto nivel de asistencia durante tareas por encima de la cabeza con cargas de 2 y 8 kg. Ambos dispositivos redujeron de forma marcada la actividad de los músculos elevadores del hombro (~58 %) y de extensores del hombro y muñeca, sin ventaja consistente del mayor torque sobre la musculatura objetivo. Sin embargo, se observaron redistribuciones de carga, con mayor reducción de actividad de los erectores espinales en el exoesqueleto de mayor asistencia, y alteraciones del equilibrio, evidenciadas por desplazamiento posterior del centro de presión y mayor oscilación antero-posterior, especialmente bajo cargas específicas. d (Desbrosses et al., 2021).
- De manera consistente con esta tensión entre beneficio biomecánico y efectos colaterales, De Bock, Rossini, et al. evaluaron el exoesqueleto pasivo de hombro Exo4Work (tipo “backpack”, 3,8 kg; asistencia objetivo 3 Nm) en 22 varones jóvenes sanos, mediante un diseño cruzado aleatorizado y contrabalanceado. Los autores reportaron un beneficio fisiológico moderado y relativamente consistente, con disminución de la actividad del deltoides anterior y atenuación de indicadores de fatiga, pero acompañados de efectos subjetivos y funcionales relevantes: mayor frustración, incremento del discomfort en las zonas de interfaz y, en determinadas tareas, penalización del desempeño (mayor lentitud), pese a

una usabilidad global calificada como “buena” (SUS=72). Este patrón refuerza un punto clave para la implementación: la reducción de carga muscular no garantiza aceptación ni eficiencia operacional, y la interfaz hombre–dispositivo puede convertirse en el principal determinante de factibilidad.(De Bock, Rossini, et al., 2022).

- Los hallazgos de laboratorio se complementan con evidencia en campo que, aunque limitada a efectos agudos, aporta validez ecológica. Pentenga et al. realizaron un ensayo cruzado aleatorizado en condiciones reales en 10 trabajadores de una empresa gasífera, comparando tareas habituales con y sin un exoesqueleto pasivo de soporte de brazos. El dispositivo se asoció con reducción de la actividad muscular en hombro y cintura escapular sin cambios relevantes en la carga cardiovascular, y permitió mantener mayores niveles de elevación del brazo, lo que sugiere apoyo funcional en tareas con brazos elevados. Sin embargo, los autores advierten posibles trade-offs posturales y una aceptabilidad variable, con molestias reportadas en algunos casos (Pentenga et al., 2024).
- En el sector de construcción, Brandt et al. evaluaron el exoesqueleto pasivo Hilti EXO-01 en 20 carpinteros durante trabajo sobre cabeza mediante un diseño randomizado cruzado. El dispositivo redujo de forma significativa la actividad muscular de hombro y antebrazo (deltoides anterior, trapecio superior y extensores del antebrazo; $p<0,001$), sin afectar la duración de la tarea. Sin embargo, se observó un aumento pequeño pero significativo de la actividad del erector espinal ($p<0,001$), y leves cambios cinemáticos, lo que sugiere una redistribución de la carga hacia la región lumbar. En conjunto,

el estudio indica que estos exoesqueletos alivian consistentemente la carga en hombro/antebrazo, pero pueden incrementar modestamente la demanda lumbar, planteando un posible trade-off más que una reducción neta del riesgo, especialmente en trabajadores con carga lumbar previa (Brandt et al., 2025).

- En la misma línea, Vries et al. evaluaron en 11 personas, con diseño intra-sujeto, la efectividad de un exoesqueleto pasivo de soporte de brazos durante tareas reales de enlucido/yeserías caracterizadas por movimientos dinámicos y repetidos. Se observó una reducción consistente de la actividad muscular en los principales agonistas del hombro, sin evidencia de compensaciones desfavorables en antagonistas, y una disminución del esfuerzo percibido en la mayoría de las tareas (de Vries et al., 2021).
- La evidencia reciente destaca la necesidad de optimizar la asistencia de exoesqueletos de hombro en rangos elevados de elevación del brazo, dado que muchos diseños convencionales presentan soporte limitado por encima de los 90°. En este contexto, Aronis et al. evaluaron un exoesqueleto pasivo de hombro optimizado para elevaciones de 90°–135° en un estudio intra-sujeto con 10 varones sanos durante una tarea sobre cabeza con 2,5 kg. El dispositivo logró reducciones significativas de la activación muscular del deltoides anterior (20–33 % MVC) y del bíceps braquial (25–31 % MVC), junto con indicadores de disminución de estrés metabólico ($\dot{V}CO_2$ 10 %, RER 5,2 %). En conjunto, los resultados muestran que alinear el perfil de asistencia con los ángulos reales de trabajo puede generar beneficios musculares y metabólicos relevantes (Aronis et al., 2025).

- Kong et al. evaluaron en 20 varones jóvenes sanos dos exoesqueletos pasivos de hombro (VEX y Airframe) durante tareas de taladrado sobre cabeza a 160 y 205 cm. Ambos dispositivos redujeron de forma significativa la actividad muscular del trapecio superior, deltoides medio y tríceps (29,3–58,1 %; $p < 0,001$), con mayores beneficios a 205 cm ($p < 0,05$) y sin compensaciones evidentes en otros segmentos. En desenlaces subjetivos, solo el VEX redujo significativamente el discomfort cervical ($p < 0,001$), mostrando que los beneficios dependen del diseño y la altura de trabajo, y que la mejora subjetiva no siempre acompaña a la reducción electromiográfica (Kong et al., 2023).
- Finalmente, un aspecto central para la aplicabilidad ocupacional es la interacción entre exoesqueleto y fatiga, dado que el trabajo por encima del hombro suele realizarse en condiciones de esfuerzo sostenido. De Bock et al. evaluaron un exoesqueleto pasivo de hombro (Exo4Work, 3,0 Nm) en 16 varones sanos mediante un diseño aleatorizado y cruzado, bajo condiciones con y sin fatiga inducida. El exoesqueleto no mejoró la precisión de la tarea ni la carga de trabajo percibida, pero redujo significativamente la actividad electromiográfica del deltoides anterior y medio ($p < 0,01$) y atenuó compensaciones cinemáticas asociadas a la fatiga. En conjunto, los resultados sugieren que el dispositivo mitiga parcialmente la carga biomecánica, apoyando su uso como medida de control de carga física, aunque sin impacto directo en el desempeño (De Bock et al., 2023).
- En síntesis, crítica, la literatura revisada sostiene que los exoesqueletos pasivos de hombro y extremidad superior disminuyen de forma consistente

la activación de músculos elevadores del hombro durante tareas por encima de la cabeza, con efectos que suelen amplificarse con mayores alturas o demandas de elevación. Sin embargo, los estudios también muestran que este beneficio puede acompañarse de alteraciones del control postural, molestias en zonas de interfaz, penalizaciones de desempeño y, en entornos reales, incrementos modestos de la demanda lumbar, lo que sugiere redistribución de cargas. Desde la perspectiva del presente trabajo, estos hallazgos refuerzan que la evaluación de exoesqueletos de miembro superior debe ser necesariamente multidimensional (biomecánica, fisiológica, postural, subjetiva y de desempeño) y contextualizada a la tarea, evitando interpretar la reducción electromiográfica en músculos objetivo como un beneficio neto sin considerar efectos no intencionados y condiciones de implementación.

4.2.3. Exoesqueletos de extremidad inferior

Los exoesqueletos de extremidad inferior han sido desarrollados principalmente con el objetivo de reducir la carga biomecánica y la fatiga asociadas a posturas exigentes, como la postura de cuclilla prolongada, la bipedestación sostenida y la marcha entre estaciones de trabajo. Desde una perspectiva deductiva, la evidencia experimental muestra que estos dispositivos pueden disminuir de forma sustancial la activación muscular y mejorar la estabilidad postural; sin embargo, también revela efectos dependientes del diseño, de la tarea y del usuario, así como posibles compensaciones biomecánicas.

- En estudios de laboratorio, los exoesqueletos semi-pasivos y semi-activos orientados a tareas de cuclillas han mostrado reducciones marcadas de la demanda muscular del miembro inferior. El exoesqueleto E-LEG, diseñado para cuclillas prolongadas, logró disminuciones extremas de la actividad muscular (hasta -92% en recto femoral), junto con menor variabilidad electromiográfica y reducción significativa de la presión plantar, lo que indica una transferencia efectiva de carga hacia el dispositivo (Tu et al., 2022).
- De manera coherente, Wang et al. demostraron que un exoesqueleto semi-activo, cuyo diseño se fundamentó en simulaciones musculoesqueléticas, redujo de forma relevante la activación electromiográfica de glúteos, cuádriceps, sóleo y gastrocnemio durante tareas de ensamblaje en cuclillas, además de disminuir la presión plantar hasta en 66% en altos grados de flexión de rodilla, con un costo metabólico bajo durante la marcha. Estos hallazgos respaldan la hipótesis de que los exoesqueletos pueden descargar eficazmente las extremidades inferiores en posturas estáticas o semi-estáticas exigentes (Wang et al., 2021).
- Más allá de la reducción muscular, algunos estudios han incorporado el control postural como desenlace clave. Ramadurai et al. mostraron que un exoesqueleto ajustado a una rigidez óptima redujo la variabilidad del centro de presión durante la sentadilla, sugiriendo una mejora del equilibrio y de la estabilidad antero-posterior. De forma complementaria (Ramadurai et al., 2022).

- De forma complementaria, Lin et al. validaron un asiento-exoesqueleto pasivo con soporte medial para bipedestación prolongada, evidenciando reducciones sustanciales de la actividad muscular (49–73%) y una disminución del desplazamiento del centro de presión cercana al 40%, lo que apunta a un beneficio combinado de descarga muscular y estabilidad postural en entornos laborales (Lin et al., 2025).
- No obstante, la literatura también documenta limitaciones y efectos no intencionados, especialmente durante la marcha o cuando se combinan posturas estáticas con desplazamientos. Li et al, al analizar un “wearable chair” pasivo, observaron que si bien la carga rotacional se concentra eficazmente en el anclaje del muslo durante la postura semi-sentada, durante la marcha emergen incrementos de momentos articulares no deseados en cadera, rodilla y tobillo, junto con adaptaciones del patrón de marcha orientadas a mayor estabilidad (Li et al., 2025).
- En una línea similar, Shim et al. demostraron que los beneficios de los exoesqueletos de extremidad inferior son altamente dependientes de la altura de trabajo: mientras que a alturas bajas se reduce la actividad muscular de miembros inferiores, a alturas mayores se incrementa la activación de músculos del miembro superior, evidenciando compensaciones posturales.(Shim et al., 2023).
- Desde una visión integradora, las revisiones recientes refuerzan estos hallazgos experimentales. Hasan y Alam, al analizar 128 sistemas de exoesqueletos de extremidad inferior y cuerpo completo, destacan que los dispositivos orientados a “industrial load bearing” muestran avances

relevantes en diseño y control, pero aún presentan desafíos en interacción humano-robot y adaptación a tareas reales (Hasan & Alam, 2025).

- De manera específica, Kuber et al. (2023) sintetizan evidencia sobre “wearable chairs” y sistemas de asistencia a la cuclilla, reportando reducciones consistentes de la demanda muscular (30–90%), disminución de la carga lumbar (37%) y reducción de la presión plantar (54–80%), lo que confirma su potencial para mitigar la fatiga en bipedestación prolongada y cuclillas, aunque subraya la necesidad de evaluaciones contextuales (Kuber et al., 2023).
- Finalmente, los estudios sobre exoesqueletos activos de tobillo aportan una dimensión adicional al mostrar que la respuesta neuromuscular es altamente heterogénea entre individuos. Acosta-Sojo y Stirling evidenciaron que, incluso en adultos jóvenes sanos, la activación muscular y la co-contracción durante la marcha varían ampliamente entre participantes, con patrones de adaptación y desadaptación que no siempre retornan a valores basales tras retirar la asistencia. Este hallazgo introduce un elemento crítico para la ergonomía aplicada: la efectividad de los exoesqueletos de extremidad inferior no solo depende del dispositivo y de la tarea, sino también de la capacidad individual de adaptación neuromuscular (Acosta-Sojo & Stirling, 2022).
- En conjunto, la evidencia revisada sugiere que los exoesqueletos de extremidad inferior ofrecen beneficios claros en la reducción de carga muscular y mejora de estabilidad en tareas específicas, particularmente

cuclillas y bipedestación prolongada. Sin embargo, estos beneficios pueden verse atenuados o compensados por alteraciones durante la marcha, redistribución de cargas o variabilidad interindividual. Desde la perspectiva del presente trabajo, estos hallazgos refuerzan la necesidad de evaluaciones ergonómicas integrales y contextualizadas, que consideren no solo la descarga local, sino también los efectos globales sobre la biomecánica, el control postural y la adaptación del trabajador.

4.3. Ventajas del uso del exoesqueleto en la prevención de trastornos musculoesqueléticos.

Desde una perspectiva de control de riesgos, los exoesqueletos ocupacionales emergen como una medida de ingeniería complementaria orientada a reducir la exposición biomecánica aguda asociada a tareas físicamente demandantes. La evidencia disponible, aunque predominantemente experimental y de corto plazo, converge en señalar beneficios localizados y medibles sobre la carga musculoesquelética, lo que sustenta su potencial preventivo dentro de un enfoque jerárquico de control de riesgos ergonómicos (Bär et al., 2021; Cardoso et al., 2024; Zelik et al., 2022).

Se realizó una revisión que incluyó 63 estudios (48 en el metaanálisis) con unos 700 participantes, evaluados principalmente en laboratorio mediante tareas ocupacionales simuladas de corta duración. Los desenlaces fueron exclusivamente agudos, sin seguimiento longitudinal, y los exoesqueletos se agruparon por región corporal asistida (Bär et al., 2021).

En primer lugar, a nivel lumbar el metaanálisis muestra que el uso de exoesqueletos se asocia con una reducción moderada de la actividad muscular de los extensores del tronco ($SMD = 0,58$; IC 95%: 0,28–0,88), aunque con una heterogeneidad moderada ($I^2 = 54\%$), lo que sugiere variabilidad del efecto según la tarea y el dispositivo. Asimismo, se observa una reducción moderada a alta de los momentos lumbosacros ($SMD = 0,78$; IC 95%: 0,15–1,41), con una consistencia aceptable entre estudios ($I^2 = 32\%$), indicando un efecto biomecánico favorable relativamente robusto en tareas específicas (Bär et al., 2021). El metaanálisis indica que los exoesqueletos de soporte lumbar reducen

de manera consistente la actividad muscular y la carga percibida en la espalda, así como los momentos lumbosacros, aunque sin efectos claros sobre las fuerzas compresivas y con posible redistribución de carga hacia el tórax (Bär et al., 2021). Estos hallazgos son coherentes con revisiones posteriores que confirman una disminución de la demanda muscular lumbar, lo cual constituye un mecanismo biomecánico plausible para reducir la exposición a factores de riesgo asociados a dolor lumbar ocupacional (Cardoso et al., 2024; Kermavnar et al., 2021).

El estudio de Cardoso et al. analizo de manera sistemática descriptiva la efectividad de los exoesqueletos ocupacionales como intervención ergonómica para la reducción de la carga biomecánica y la prevención de trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo. A partir de la revisión de estudios experimentales en laboratorio y evaluaciones en contextos laborales simulados, el documento examina principalmente exoesqueletos pasivos y semi-activos, con énfasis en dispositivos para espalda y extremidad superior utilizados en tareas de levantamiento y trabajo por encima del hombro. Los resultados muestran reducciones consistentes de la actividad electromiografía en los músculos objetivo y mejoras en indicadores de carga física aguda, aunque con variabilidad interindividual y evidencia de redistribución de cargas hacia segmentos no asistidos. El estudio concluye que los exoesqueletos tienen potencial preventivo como medida de control de ingeniería, pero subraya la necesidad de estudios longitudinales en condiciones reales, con seguimiento clínico y evaluación de aceptabilidad, para confirmar su efectividad poblacional (Cardoso et al., 2024).

Kermavnar et al. realizaron una revisión sistemática sobre exoesqueletos industriales de soporte lumbar, enfocada en su efectividad ergonómica y posibles efectos secundarios. La evidencia analizada muestra que estos dispositivos reducen la actividad electromiográfica de los extensores del tronco y la carga percibida en la región lumbar durante tareas de levantamiento y flexión, lo que sugiere una disminución de la exposición biomecánica aguda. Sin embargo, los estudios también reportan efectos compensatorios, como aumento de la carga en caderas, muslos o tórax, además de discomfort en puntos de contacto y posibles restricciones del movimiento. Metodológicamente, predominaron estudios de laboratorio, con muestras pequeñas, participantes jóvenes y sanos y desenlaces intermedios, lo que limita la validez externa. En conjunto, la revisión concluye que los exoesqueletos lumbares tienen potencial preventivo, pero la evidencia es aún insuficiente para confirmar una reducción de trastornos musculoesqueléticos a largo plazo, siendo necesarios estudios de campo longitudinales con evaluación clínica y funcional (Kermavnar et al., 2021)

En segundo lugar, los exoesqueletos de extremidad superior, particularmente aquellos diseñados para tareas a nivel o por encima del hombro, muestran ventajas claras en términos de reducción de la actividad muscular del hombro y del esfuerzo percibido. Revisiones sistemáticas recientes reportan disminuciones consistentes de la actividad electromiográfica del deltoides y trapecio, junto con reducciones del gasto energético y de la percepción de fatiga durante tareas estáticas o repetitivas (Brunelli et al., 2025; Moeller et al., 2022; Tian et al., 2024).

Moeller et al realizó una revisión sistemática sobre exoesqueletos de extremidad superior en el entorno laboral, principalmente en tareas a la altura del hombro o por encima de la cabeza, a partir de 35 estudios que evaluaron 18 dispositivos. La mayoría se centró en desenlaces fisiológicos y de percepción, mostrando en 16 estudios una reducción de la actividad muscular del deltoides y trapecio, lo que sugiere menor carga muscular, aunque se trata de desenlaces intermedios sin evidencia directa de prevención de trastornos musculoesqueléticos. Algunos exoesqueletos modificaron el patrón de movimiento, con restricciones leves del rango articular y redistribución de cargas hacia otros segmentos, evidenciando *trade-offs* biomecánicos que requieren evaluación específica por tarea. Desde la perspectiva del usuario, se reportó menor esfuerzo percibido y discomfort, pero con resultados heterogéneos en condiciones reales, y solo mejoras funcionales puntuales, lo que impide concluir un beneficio funcional global en el trabajo (Moeller et al., 2022).

Brunelli et al. presentan una revisión integral sobre exoesqueletos ocupacionales de extremidad superior que vincula las características tecnológicas y de diseño de estos dispositivos con los enfoques de evaluación necesarios para su implementación segura en entornos industriales. A partir del análisis de 59 estudios empíricos incluidos, los autores examinan distintos modelos de exoesqueletos en función de su estructura cinemática, modo de actuación y tareas objetivo, destacando que, si bien estos dispositivos se proponen para reducir la carga musculoesquelética asociada a movimientos repetitivos del brazo y, en particular, a tareas realizadas por encima del nivel de los hombros, su efectividad no puede valorarse únicamente mediante

reducciones de la actividad electromiográfica. Ello se debe a la presencia de efectos secundarios, procesos de adaptación del usuario y a la escasez de evidencia derivada de uso prolongado y en condiciones reales de trabajo (Brunelli et al., 2025).

Una tercera ventaja clave es la reducción de la exposición biomecánica aguda, evidenciada de forma transversal en distintos tipos de exoesqueletos y sectores productivos. La revisión de Ahmad et al. donde realizaron una revisión sistemática sobre la adopción e impacto de los exoesqueletos ocupacionales (TRL 5–7) en la prevención de trastornos musculoesqueléticos laborales, destacando su relevancia ante la alta carga de trastornos musculoesqueléticos. La revisión incluyó 45 estudios en diversos sectores productivos, evidenciando una mayor evaluación y adopción en manufactura, pese a que otros sectores con alta incidencia de trastornos musculoesqueléticos permanecen subrepresentados. La mayoría de los estudios reportó reducciones significativas de la actividad muscular, especialmente con exoesqueletos lumbares y de extremidad superior, lo que indica disminución de la exposición biomecánica aguda. Asimismo, se observó buena aceptabilidad y utilidad percibida en la mayoría de las evaluaciones avanzadas, aunque con discrepancias entre medidas objetivas y subjetivas. En conjunto, el estudio respalda el potencial preventivo de los exoesqueletos, pero subraya la necesidad de investigaciones longitudinales en contextos reales que permitan evaluar su impacto sobre desenlaces clínicos y su efectividad poblacional (Ahmad et al., 2024).

De Bock et al. analizó de manera exhaustiva la evidencia disponible sobre exoesqueletos mediante un enfoque de mapeo. Se identificaron 139 estudios

elegibles que evaluaron 76 dispositivos distintos, principalmente exoesqueletos de espalda, hombro y otros segmentos corporales. La evidencia sobre exoesqueletos de soporte lumbar se concentró en estudios de validación en laboratorio, con énfasis en medidas biomecánicas y electromiográficas durante tareas controladas, mostrando efectos agudos sobre la carga físicas. De forma similar, los exoesqueletos de hombro fueron evaluados mayoritariamente en tareas simuladas con mediciones de actividad muscular y, en menor medida, variables de aceptabilidad y desempeño, evidenciando efectos agudos (De Bock, Ghillebert, et al., 2022).

Esta disminución de la exposición inmediata constituye un argumento sólido para su uso como herramienta preventiva, en particular cuando se integra dentro de programas ergonómicos más amplios y no como intervención aislada.

Adicionalmente, desde la perspectiva de aceptabilidad y adopción, los exoesqueletos presentan ventajas operativas relevantes. Estudios de percepción y aceptación reportan, en general, alta utilidad percibida, buena aceptación por parte de los usuarios y expectativas positivas en términos de reducción de fatiga y mejora del desempeño (Du et al., 2024). Esto también se evidencio en Malasia en el sector autormotriz donde se realizó un estudio transversal, no experimental, mediante una encuesta online, con el objetivo de analizar la aceptación y percepción del uso de exoesqueletos en la industria de ensamble automotriz en 52 practicantes industriales, seleccionados por muestreo por conveniencia, procedentes de 18 de 34 fabricantes automotrices. Los resultados mostraron una alta aceptabilidad, con 86,5% de los participantes considerando viable la aplicación de exoesqueletos y 55,8% calificándolos como muy o

extremadamente necesarios. Los beneficios percibidos más relevantes fueron la reducción del tiempo perdido por lesiones (86,6%), la disminución de la fatiga muscular (92,3%) y el incremento de la productividad (90,4%). Las principales barreras identificadas incluyeron el alto costo de implementación y mantenimiento (82,7%), las limitaciones de movimiento (80,7%), el riesgo de accidentes por restricción de flexibilidad (82,7%) y las preocupaciones por higiene e infecciones asociadas al uso compartido (63,4%). Las tareas con mayor potencial de aplicación fueron la manipulación manual de materiales (26,9%), la soldadura (15,4%) y el ensamble (13,5%) (Gan et al., 2024). Esta aceptación inicial facilita la implementación piloto y la integración progresiva de la tecnología en entornos reales de trabajo. Otra ventaja relevante radica en el uso del modelado y la simulación biomecánica como soporte para la selección y diseño de exoesqueletos. El análisis de Ma et al donde en una revisión sistemática sobre el uso del modelado y la simulación en el diseño y evaluación de exoesqueletos industriales, analizando 33 estudios publicados entre 2003 y 2022. Los modelos permiten estimar efectos biomecánicos y fisiológicos relevantes, como cargas articulares, actividad muscular y cinemática, predominando los enfoques biomecánicos musculoesqueléticos mediante plataformas como MATLAB, AnyBody y OpenSim. La evidencia se concentra principalmente en exoesqueletos de extremidad superior, evaluados en tareas de levantamiento y trabajo por encima de la cabeza, con validación parcial en alrededor del 60% de los estudios. No obstante, los modelos actuales presentan limitaciones importantes al no integrar variables funcionales, perceptivas y metabólicas, además de alta heterogeneidad metodológica y evaluación

restringida a efectos agudos. (Ma et al., 2023). En conjunto, el modelado computacional constituye una herramienta valiosa para la evaluación inicial de exoesqueletos, pero requiere mayor estandarización y complementarse con estudios empíricos para respaldar decisiones en ergonomía ocupacional

En síntesis, la principal ventaja del uso de exoesqueletos en la prevención de trastornos musculoesqueléticos reside en su capacidad para reducir de forma inmediata y localizada la carga biomecánica, especialmente en espalda y hombros, con buena aceptabilidad por parte de los trabajadores y potencial integración como medida de control de ingeniería. No obstante, estas ventajas deben interpretarse de manera crítica y contextualizada, reconociendo que la evidencia actual se basa mayoritariamente en desenlaces agudos, con heterogeneidad metodológica y ausencia de resultados longitudinales. Desde el aporte del presente trabajo, se propone que el valor preventivo de los exoesqueletos no radica en su uso aislado, sino en su incorporación estratégica dentro de programas ergonómicos integrales, acompañados de evaluación clínica, seguimiento longitudinal y análisis epidemiológico que permitan confirmar su efectividad poblacional a largo plazo (Golabchi et al., 2023; National Institute for Occupational Safety and Health, 2024). Así como la evaluación de exoesqueletos en cuatro dominios complementarios: función del dispositivo, impacto ergonómico, desempeño laboral y usabilidad. En conjunto, evidencian que ninguna métrica aislada es suficiente y que la evaluación integral requiere instrumentación multimodal, estandarización y validación en contextos reales de trabajo (Li-Baboud et al., 2023).

4.4. Limitaciones del uso del exoesqueleto en la prevención de trastornos musculoesqueléticos.

A pesar del creciente interés en los exoesqueletos ocupacionales como estrategia de prevención de los trastornos musculoesqueléticos (TME), el cuerpo de evidencia disponible presenta limitaciones sustantivas que restringen la inferencia causal y la extrapolación de resultados hacia contextos reales de trabajo (Bhat et al., 2025; Kopp et al., 2022). De manera consistente, los estudios publicados se concentran en evaluaciones de corto plazo, con diseños experimentales predominantemente de laboratorio, muestras pequeñas y poblaciones compuestas mayoritariamente por varones jóvenes y sanos, lo que compromete tanto la validez externa como la evaluación de efectos acumulativos o crónicos (Golabchi et al., 2022). En este contexto, la revisión sistemática de Kranenborg et al. basada en 36 estudios y 655 participantes mayoritariamente de laboratorio y varones jóvenes, analiza los efectos no deseados de exoesqueletos pasivos de hombro y espalda a corto plazo. El discomfort fue el efecto más frecuente (30 estudios), seguido de limitaciones de usabilidad (16 estudios), junto con alteraciones en actividad muscular, movilidad, desempeño, balance y otros parámetros funcionales. Aunque identifica patrones consistentes de discomfort y problemas de usabilidad, la evidencia no permite estimar incidencia ni comparar riesgos, resaltando la necesidad de estudios longitudinales en campo con definiciones estandarizadas y mejor reporte de eventos (Kranenborg et al., 2023).

Desde una perspectiva cuantitativa, el metaanálisis de Bär et al. integra resultados mediante diferencias de medias estandarizadas (SMD) para estimar

efectos agudos del uso de exoesqueletos sobre desenlaces continuos. Este enfoque metodológico permite combinar medidas heterogéneas, la evidencia analizada se apoya principalmente en marcadores intermedios biomecánicos y perceptuales, lo que limita su traducción a desenlaces clínicamente relevantes y, en particular, a la prevención de TME. Adicionalmente, el alto riesgo de sesgo, la marcada heterogeneidad entre dispositivos, tareas y regiones corporales, y la identificación de efectos fuera del área asistida —interpretados como redistribución de carga— debilitan la interpretación de los beneficios observados. La ausencia de seguimiento longitudinal en condiciones reales de trabajo impide inferir efectos preventivos sostenidos sobre la salud del trabajador (Bär et al., 2021).

Los hallazgos concuerdan con la revisión sistemática de Kermavnar et al. sobre exoesqueletos lumbares, que muestra reducciones biomecánicas en tareas específicas, pero un potencial preventivo limitado por efectos no deseados y debilidades metodológicas. La evidencia se basa en muestras pequeñas, sujetos jóvenes y sanos y diseños de laboratorio, lo que restringe la validez externa. Además, se describen compensaciones biomecánicas (redistribución de carga, cambios posturales), junto con discomfort, restricción de movilidad y deterioro del desempeño, factores que afectan la aceptabilidad, adherencia y efectividad real de la intervención (Kermavnar et al., 2021).

La evidencia experimental específica refuerza esta noción de trade-off. Bosch et al., en un estudio experimental con 18 participantes, observaron que un exoesqueleto pasivo redujo de manera significativa la actividad muscular lumbar y el discomfort en tareas dinámicas, además de incrementar el tiempo de

resistencia en flexión sostenida. No obstante, estos beneficios se acompañaron de un aumento del discomfort en la región torácica, atribuible a la presión del arnés, lo que introduce una limitación relevante para la aceptabilidad y el uso prolongado del dispositivo (Bosch et al., 2016). Este tipo de compensaciones pone de manifiesto que la reducción de carga en un segmento corporal puede lograrse a expensas de incrementar molestias o riesgos en otras regiones.

En una revisión más amplia de exoesqueletos de extremidad superior, Brunelli et al. identifican brechas críticas en la literatura, particularmente la escasez de información sobre efectos a largo plazo y eventos adversos, así como dificultades para transferir los resultados al trabajo real (Brunelli et al., 2025).

De forma consistente, no se identificó evidencia objetiva de prevención de trastornos musculoesqueléticos asociada al uso de exoesqueletos. En un estudio cuasi-experimental en condiciones reales, el uso de un exoesqueleto lumbar se asoció a reducción del dolor solo en trabajadores con dolor lumbar específico, sin efectos en dolor no específico, evidenciando heterogeneidad según el perfil clínico. No obstante, la falta de aleatorización y cegamiento, el uso de desenlaces subjetivos y el seguimiento corto limitan la inferencia causal, por lo que los hallazgos deben interpretarse como alivio sintomático preliminar, más que como prueba de prevención sostenida (Moulart et al., 2022).

Un aspecto emergente en la evaluación de exoesqueletos es la carga cognitiva. En un estudio experimental intra-sujeto, Akanmu et al. evaluaron un exoesqueleto lumbar activo en 16 varones jóvenes sanos durante una tarea de carpintería mediante EEG de 32 canales. El uso del dispositivo se asoció a un

incremento significativo de la carga cognitiva, evidenciado por aumentos de la potencia alfa (8–12 Hz) en regiones frontales y occipitales (hasta +129 %, $p<0,05$). Los mayores incrementos se observaron en subtareas dinámicas y complejas (hasta +175 %), sin cambios en tareas estáticas. En conjunto, los resultados indican que, aunque los exoesqueletos activos reducen la carga física, incrementan de manera relevante la demanda cognitiva (Akanmu et al., 2024).

De forma complementaria el estudio de Afolabi et al. evaluó la carga cognitiva asociada al uso de un exoesqueleto lumbar activo en ocho varones jóvenes sanos durante tareas simuladas de construcción, mediante EEG continuo y un diseño intra-sujeto. La carga cognitiva se estimó con un índice theta frontal/alfa parieto-occipital, y su predicción se realizó con un modelo LSTM, que mostró alto desempeño explicando 75 % de la variabilidad. En conjunto, los resultados confirman que la carga cognitiva inducida por exoesqueletos activos es medible y predecible, constituyendo un riesgo emergente complementario a la carga física en entornos laborales complejos (Afolabi et al., 2025).

Estos hallazgos neurocognitivos se refuerzan con el estudio de Okunola et al. quien evaluó, en 16 varones jóvenes sanos, los efectos de un exoesqueleto lumbar activo durante una tarea de carpintería simulada mediante eye-tracking, EEG y SART, comparando condiciones con y sin exoesqueleto. Aunque no se observaron diferencias significativas en la duración y número de fijaciones, se registraron reducciones consistentes del escaneo visual y alteraciones sacádicas significativas, con disminución de la amplitud y de la velocidad pico. Entre el 60–70 % de los participantes reportó menor conciencia situacional, con reducciones individuales del 26–80 %. Además, se evidenció un aumento

significativo de la carga cognitiva visual, reflejado por dilatación pupilar ($p<0,001$; $d=1,31$) y mayor potencia theta occipital ($p=0,002$). En conjunto, los resultados indican que el uso del exoesqueleto lumbar activo se asocia a mayor carga cognitiva y cambios relevantes en el procesamiento visual (Okunola et al., 2025).

También se debe mencionar que los estudios de campo disponibles muestran que incluso cuando se observan beneficios biomecánicos, estos coexisten con limitaciones de usabilidad y adherencia. El estudio de Schrøder et al. evaluó en 20 trabajadores asintomáticos, en condiciones reales de trabajo, el impacto de un exoesqueleto pasivo de hombro durante tareas logísticas de manipulación manual. El uso del dispositivo se asoció con reducciones significativas de la actividad muscular del deltoides anterior y trapecio superior ($p<0,05$; tamaños de efecto moderados–altos) y con menor esfuerzo percibido en tareas a alturas elevadas del hombro ($p=0,003$ a $p<0,001$). No obstante, se observaron cambios cinemáticos relevantes, con aumento de la flexión y abducción del hombro ($p<0,05$), y baja adherencia, ya que el tiempo real de uso fue en promedio 22,4 % del planificado, lo que limitó efectos de familiarización y la interpretación del impacto sostenido (Schrøder Jakobsen et al., 2023).

Finalmente, McGibbon et al. evaluaron en un ensayo multicéntrico aleatorizado el exoesqueleto robótico Keeego™ en 27 personas con osteoartritis de rodilla (24 completaron), mediante un diseño abierto y cruzado (2×2). El dispositivo no mejoró de forma inmediata la marcha y se asoció inicialmente a peor desempeño funcional, probablemente por un periodo de adaptación. No obstante, se observaron beneficios modestos en dolor y calidad de vida, aunque

sin evidencia concluyente que permita atribuir estos cambios directamente al exoesqueleto (McGibbon et al., 2022).

4.5. Limitaciones del estudio

a) La principal limitación del estudio es su baja validez externa, ya que se basa en participantes jóvenes y sanos evaluados en laboratorio y por periodos cortos, lo que no representa a la población laboral real.

b) La evidencia en entornos laborales reales es escasa, debido a la limitada disponibilidad de ensayos controlados aleatorizados en campo, generalmente con muestras pequeñas, tareas específicas y desenlaces centrados en biomecánica y discomfort. (Baldassarre et al., 2022; Jakobsen et al., 2025).

c) Ausencia de estudios de cohorte con desenlaces clínicos.

La evidencia disponible se apoya principalmente en diseños transversales, crossovers agudos, series de casos o intervenciones breves, con poca presencia de cohortes prospectivas que sigan a trabajadores a lo largo del tiempo para medir riesgo de desarrollar TME.

d) No se evalúa incidencia/prevalencia de TME como desenlace principal.

Un problema metodológico central es que la mayoría de los estudios evalúa marcadores intermedios (EMG, cinemática, carga musculoesquelética, esfuerzo o discomfort), sin medir desenlaces epidemiológicos relevantes como incidencia de TME, prevalencia a mediano plazo, ausentismo o lesiones registrables con el uso de estos dispositivos (Bär et al., 2021).

e) No se cuantifica riesgo relativo ni efecto preventivo neto (RR/HR, ARR, NNT).

La falta de estudios prospectivos con desenlaces clínicos impide estimar medidas de efectividad preventiva (RR, HR, ARR, NNT), lo que limita el

cálculo del beneficio neto, la comparación con otras intervenciones y la modelización del impacto poblacional. (Cardoso et al., 2024).

- f) No se evalúa adecuadamente la interacción por edad, sexo y comorbilidades.

Existe evidencia de que edad, sexo y condición física pueden influir en aceptación, percepción, discomfort y potencialmente en eventos adversos; sin embargo, muchos estudios no están diseñados ni tienen potencia para análisis estratificados o modelos con interacción. (Kranenborg et al., 2023).

- g) La investigación sobre exoesqueletos presenta una alta heterogeneidad, que limita la comparabilidad, interpretación y generalización de los resultados. Esta se debe a la diversidad de dispositivos (pasivos/activos, rígidos/blandos, distintos segmentos), a la interacción compleja trabajador–tarea–dispositivo, a tamaños muestrales pequeños, a la falta histórica de protocolos estandarizados y a las diferencias entre estudios de laboratorio y de campo.
- h) Los estudios no tienen toda la información de evaluación como métricas funcionales (características mecánicas y fisiológicas), ergonómicas (exposición biomecánica), desempeño de la tarea (capacidad y calidad de ejecución) y usabilidad (aceptabilidad, confort, seguridad y facilidad de uso en el trabajo real). (Li-Baboud et al., 2023).

V. CONCLUSIONES

- a) La evidencia clasifica los exoesqueletos ocupacionales en pasivos y activos, y según la región corporal asistida. Los pasivos son los más estudiados y muestran beneficios agudos y dependientes de la tarea, como reducción de actividad muscular y esfuerzo percibido en soporte lumbar y de hombro, aunque acompañados de trade-offs (discomfort, cambios posturales y redistribución de carga) que limitan su valor preventivo sostenido. Los activos, con evidencia ocupacional más limitada, ofrecen asistencia ajustable pero pueden incrementar la carga cognitiva y generar riesgos emergentes para la seguridad.
- b) La revisión de la evidencia indica que el desempeño de los exoesqueletos depende del tipo de tecnología y la región corporal asistida. Los lumbares pasivos rígidos son los más estudiados y reducen de forma aguda la actividad muscular y el esfuerzo percibido en flexión y manipulación de cargas, aunque con compensaciones biomecánicas y discomfort que limitan su uso prolongado. Los exotrajes blandos presentan mayor aceptabilidad, pero una asistencia biomecánica modesta y sin evidencia de prevención sostenida. Los lumbares activos ofrecen asistencia motorizada, pero se asocian a mayor carga cognitiva y riesgos de seguridad, especialmente en tareas dinámicas. En hombro/extremidad superior se observan reducciones musculares con restricciones de movilidad y baja adherencia, mientras que en extremidad inferior los beneficios son variables y dependientes de la adaptación.

- c) La evidencia muestra sobre las ventajas que los exoesqueletos, en especial los lumbares y de extremidad superior tanto pasivos como activos, ofrecen reducciones agudas de la actividad muscular, del esfuerzo percibido y de ciertos momentos articulares durante tareas específicas. Estos beneficios, documentados principalmente en estudios de laboratorio y en algunos estudios de campo de corta duración, respaldan su utilidad como herramientas de asistencia biomecánica puntual, proporcionando alivio inmediato de la carga física y, en contextos clínicos u ocupacionales seleccionados, un potencial alivio sintomático del dolor en subgrupos específicos de trabajadores.
- d) Las limitaciones para la prevención real de TME. La evidencia disponible indica que, aunque los exoesqueletos ofrecen beneficios biomecánicos agudos, estos no se traducen en una prevención demostrable de los trastornos musculoesqueléticos. La falta de estudios longitudinales con desenlaces clínicos objetivos limita establecer una relación causal con la reducción del riesgo a largo plazo. Además, se observan compensaciones biomecánicas y redistribución de cargas hacia regiones no asistidas, junto con discomfort, problemas de usabilidad y baja adherencia, que restringen su efectividad en el trabajo real. Finalmente, la carga cognitiva y los riesgos emergentes para la seguridad, especialmente en exoesqueletos activos, amplían las limitaciones más allá de la carga física y refuerzan la necesidad de evaluaciones integrales
- e) Propuesta de solución y enfoque aplicado. Los hallazgos indican que los exoesqueletos deben considerarse herramientas complementarias dentro de

programas ergonómicos multifactoriales, respetando la jerarquía clásica de control del riesgo y evitando su adopción como soluciones universales. Su implementación requiere evaluaciones caso a caso, según la tarea, el perfil del trabajador y los riesgos físicos y cognitivos. Asimismo, la evidencia disponible justifica la necesidad de investigación adicional para definir las condiciones de uso que permitan reducir la incidencia de TME, comprender la interacción entre carga física y cognitiva, e identificar los perfiles y contextos laborales con mayor beneficio y menor riesgo

VI. RECOMENDACIONES

- a) No posicionar al exoesqueleto como medida primaria de control del riesgo con la evidencia disponible. Su uso debe ubicarse como medida complementaria
- b) Se recomienda implementar exoesqueletos solo cuando exista un “caso de uso” claramente definido, en especial en tareas con: posturas sostenidas (flexión de tronco, elevación de hombro), ciclos repetitivos con demanda muscular alta, duración limitada y predecible, y donde la literatura muestra beneficios agudos más consistentes (p. ej., reducción de EMG y esfuerzo percibido en soporte lumbar o de hombro). En paralelo, debe explicitarse que el beneficio es tarea-dependiente y no generalizable.

- c) Exigir una evaluación previa de trade-offs biomecánicos

Antes de adoptar un dispositivo, se recomienda evaluar de forma obligatoria las compensaciones biomecánicas (redistribución de carga hacia segmentos no asistidos, offset postural, cambios cinemáticos) mediante una matriz de riesgos por segmentos corporales. Incorporar la carga cognitiva como criterio formal de seguridad operacional. Dado que estudios recientes muestran aumento de carga cognitiva y cambios en atención visual/escaneo, se recomienda incluir en el protocolo de implementación una evaluación mínima de: complejidad de tarea, entorno dinámico (tráfico interno, equipos móviles, maniobras), demanda de vigilancia situacional. En tareas críticas de seguridad, se sugiere priorizar pilotos controlados o restringir el uso si se evidencia impacto negativo en desempeño atencional.

- d) Implementar un piloto escalonado con criterios de decisión predefinidos
Se recomienda un modelo de implementación por etapas: (i) preselección, (ii) piloto, (iii) escalamiento, con criterios “go/no-go” claros. El piloto debe incluir métricas objetivas y subjetivas, y un periodo suficiente de familiarización, evitando conclusiones basadas solo en pruebas de laboratorio o sesiones únicas.
- e) Establecer un set mínimo de indicadores de efectividad y seguridad
Para que el uso del exoesqueleto sea defendible como intervención ergonómica, se recomienda monitorear de forma integral la carga física, los efectos no deseados, la usabilidad y aceptación, la adherencia real y las señales clínicas tempranas. El criterio clave es no considerar exitosa la intervención si no existe un balance favorable entre beneficios y efectos adversos, ni una adherencia suficiente en condiciones reales de trabajo.
- f) Se recomienda incluir que la efectividad depende de: ajuste antropométrico correcto, entrenamiento en postura y técnica de movimiento con el dispositivo, protocolos de colocación/retiro y pausas. Dado que el discomfort y la baja adherencia son limitantes recurrentes, se sugiere estandarizar un programa breve de capacitación y supervisión, con re-evaluaciones periódicas.
- g) Se recomienda que la selección del dispositivo priorice: calidad de interfaces de contacto (arnés/zonas de apoyo), distribución de presión, libertad de movimiento y compatibilidad con EPP. El estudio sugiere que, si el dispositivo genera discomfort torácico, restricción o interferencia, la probabilidad de uso real disminuye, anulando cualquier beneficio potencial.

- h) Se recomienda diferenciar explícitamente entre: alivio sintomático (p. ej., reducción de dolor al final de jornada en subgrupos), y prevención primaria (reducción de incidencia de TME). Los hallazgos actuales sustentan mejor el rol del exoesqueleto como apoyo de tolerancia a la tarea o medida transicional, no como estrategia definitiva de prevención.
- i) Se recomienda que en el proceso de implementación de exoesqueletos se evalúa las directrices del Comité ASTM F48 siguiendo los estándares en seis áreas principales como: diseño y manufactura, factores humanos y ergonomía, desempeño en tareas y ambiente, mantenimiento y disposición, seguridad informática y terminología. Con ello se busca el uso de exoesqueletos certificados y con criterios de desempeño comparables, similares a los existentes para otros dispositivos de seguridad laboral.
- j) Como recomendación final, se sugiere plantear líneas futuras: ensayos pragmáticos en campo con seguimiento ≥ 6 –12 meses, desenlaces clínicos y ocupacionales (incidencia de TME, ausentismo, restricciones, productividad segura), estratificación por fenotipo clínico (dolor específico/no específico), edad, experiencia, condición física, evaluación conjunta biomecánica–cognitiva–organizacional. Esto se justifica porque el principal vacío identificado es la falta de evidencia prospectiva y de impacto real en salud.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta-Sojo, Y., & Stirling, L. (2022). Individuals differ in muscle activation patterns during early adaptation to a powered ankle exoskeleton. *Applied Ergonomics*, 98, 103593. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103593>
- Afolabi, A., Yusuf, A., & Akanmu, A. (2025). Predicting mental workload of using exoskeletons for construction work: A deep learning approach. *Journal of Information Technology in Construction*, 30, 1-21. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2025.001>
- Ahmad, J., Fanti, V., Caldwell, D. G., & Di Natali, C. (2024). Framework for the adoption, evaluation and impact of occupational Exoskeletons at different technology readiness levels: A systematic review. *Robotics and Autonomous Systems*, 179, 104743. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2024.104743>
- Ahn, Jangwhan, Jung, H., Moon, J., Kwon, C., & Ahn, Joeeun. (2025). A comprehensive assessment of a passive back support exoskeleton for load handling assistance. *Scientific Reports*, 15(1), 3926. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88471-w>
- Akanmu, A., Okunola, A., Jebelli, H., Ammar, A., & Afolabi, A. (2024). Cognitive load assessment of active back-support exoskeletons in construction: A case study on construction framing. *Advanced Engineering Informatics*, 62, 102905. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102905>

- Ali, A., Fontanari, V., Schmoelz, W., & Agrawal, S. K. (2021). Systematic Review of Back-Support Exoskeletons and Soft Robotic Suits. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 765257. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.765257>
- Aronis, G., Kurz, M., Angeli, T., & Gföhler, M. (2025). Development and EMG/metabolic assessment of a passive shoulder exoskeleton providing adjustable support for high arm elevation. *Applied Ergonomics*, 132, 104681. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2025.104681>
- Ashta, G., Finco, S., Battini, D., & Persona, A. (2023). Passive Exoskeletons to Enhance Workforce Sustainability: Literature Review and Future Research Agenda. *Sustainability*, 15(9), 7339. <https://doi.org/10.3390/su15097339>
- Baldassarre, A., Lulli, L. G., Cavallo, F., Fiorini, L., Mariniello, A., Mucci, N., & Arcangeli, G. (2022). Industrial exoskeletons from bench to field: Human-machine interface and user experience in occupational settings and tasks. *Frontiers in Public Health*, 10, 1039680. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1039680>
- Bär, M., Steinhilber, B., Rieger, M. A., & Luger, T. (2021). 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*, 94, 103385. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103385>
- Bhat, S., Gavin, J., Warner, M., & Myall, M. (2025). Mapping the evidence on occupational exoskeleton use for the workforce in healthcare, social care,

- and industry: A systematic scoping review. *Wearable Technologies*, 6, e53. <https://doi.org/10.1017/wtc.2025.10033>
- Bosch, T., Van Eck, J., Knitel, K., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.12.003>
- Botti, L., & Melloni, R. (2023). Occupational Exoskeletons: Understanding the Impact on Workers and Suggesting Guidelines for Practitioners and Future Research Needs. *Applied Sciences*, 14(1), 84. <https://doi.org/10.3390/app14010084>
- Brandt, M., Jacobsen, S. S., Skals, S., Nimb, I., Ajslev, J. Z. N., Sundstrup, E., Andersen, L. L., & Jakobsen, M. D. (2025). Technical field-evaluation of exoskeleton-assisted overhead work among carpenters. *Applied Ergonomics*, 129, 104582. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2025.104582>
- Brunelli, G., Dubois, O., Tiboni, M., & Jarrassé, N. (2025). Review of upper-limb occupational exoskeletons: From technology to assessment. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 110, 103815. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2025.103815>
- Brunner, A., Van Sluijs, R., Luder, T., Camichel, C., Kos, M., Bee, D., Bartenbach, V., & Lamercy, O. (2023). Effect of passive shoulder exoskeleton support during working with arms over shoulder level. *Wearable Technologies*, 4. <https://doi.org/10.1017/wtc.2023.21>
- Bunge, L. R., Davidson, A. J., Helmore, B. R., Mavrandonis, A. D., Page, T. D., Schuster-Bayly, T. R., & Kumar, S. (2021). Effectiveness of powered

exoskeleton use on gait in individuals with cerebral palsy: A systematic review. *PLOS ONE*, 16(5), e0252193.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252193>

Cardoso, A., Ribeiro, A., Carneiro, P., & Colim, A. (2024). Evaluating Exoskeletons for WMSD Prevention: A Systematic Review of Applications and Ergonomic Approach in Occupational Settings. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 21(12). <https://doi.org/10.3390/ijerph21121695>

Chao, G. T., Deal, C., & Novi Migliano, E. (2024). Occupational exoskeletons: Supporting diversity and inclusion goals with technology. *Journal of Vocational Behavior*, 153, 104016.

<https://doi.org/10.1016/j.jvb.2024.104016>

Chung, J., Quirk, D. A., Applegate, M., Rouleau, M., Degenhardt, N., Galiana, I., Dalton, D., Awad, L. N., & Walsh, C. J. (2024). Lightweight active back exosuit reduces muscular effort during an hour-long order picking task. *Communications Engineering*, 3(1), 35. <https://doi.org/10.1038/s44172-024-00180-w>

Crea, S., Beckerle, P., De Looze, M., De Pauw, K., Grazi, L., Kermavnar, T., Masood, J., O'Sullivan, L. W., Pacifico, I., Rodriguez-Guerrero, C., Vitiello, N., Ristić-Durrant, D., & Veneman, J. (2021). Occupational exoskeletons: A roadmap toward large-scale adoption. Methodology and challenges of bringing exoskeletons to workplaces. *Wearable Technologies*, 2, e11. <https://doi.org/10.1017/wtc.2021.11>

- Daliri, M., Ghorbani, M., Akbarzadeh, A., Negahban, H., Ebrahimzadeh, M. H., Rahmanipour, E., & Moradi, A. (2024). Powered single hip joint exoskeletons for gait rehabilitation: A systematic review and Meta-analysis. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 25(1), 80.
<https://doi.org/10.1186/s12891-024-07189-4>
- De Bock, S., Ampe, T., Rossini, M., Tassignon, B., Lefeber, D., Rodriguez-Guerrero, C., Roelands, B., Geeroms, J., Meeusen, R., & De Pauw, K. (2023). Passive shoulder exoskeleton support partially mitigates fatigue-induced effects in overhead work. *Applied Ergonomics*, 106, 103903.
<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103903>
- De Bock, S., Ghillebert, J., Govaerts, R., Tassignon, B., Rodriguez-Guerrero, C., Crea, S., Veneman, J., Geeroms, J., Meeusen, R., & De Pauw, K. (2022). Benchmarking occupational exoskeletons: An evidence mapping systematic review. *Applied Ergonomics*, 98, 103582.
<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103582>
- De Bock, S., Rossini, M., Lefeber, D., Rodriguez-Guerrero, C., Geeroms, J., Meeusen, R., & De Pauw, K. (2022). An Occupational Shoulder Exoskeleton Reduces Muscle Activity and Fatigue During Overhead Work. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 69(10), 3008-3020.
<https://doi.org/10.1109/TBME.2022.3159094>
- De La Tejera, J. A., Bustamante-Bello, R., Ramirez-Mendoza, R. A., & Izquierdo-Reyes, J. (2020). Systematic Review of Exoskeletons towards a General Categorization Model Proposal. *Applied Sciences*, 11(1), 76.
<https://doi.org/10.3390/app11010076>

- de Vries, A. W., Krause, F., & de Looze, M. P. (2021). The effectivity of a passive arm support exoskeleton in reducing muscle activation and perceived exertion during plastering activities. *Ergonomics*, 64(6), 712-721. <https://doi.org/10.1080/00140139.2020.1868581>
- Desbrosses, K., Schwartz, M., & Theurel, J. (2021). Evaluation of two upper-limb exoskeletons during overhead work: Influence of exoskeleton design and load on muscular adaptations and balance regulation. *European Journal of Applied Physiology*, 121(10), 2811-2823. <https://doi.org/10.1007/s00421-021-04747-9>
- Du, B. B., Somasundram, K. G., Johnston, A., Bigelow, P., Abdoli-Eramaki, M., Jordan, K. H., Yung, M., & Yazdani, A. (2024). Skilled Workers' Perspectives on Utilizing a Passive Shoulder Exoskeleton in Construction. *Applied Sciences*, 14(19), 8971. <https://doi.org/10.3390/app14198971>
- Farahbakhsh, S., Faryabi, R., Raesi, R., Hushmandi, K., Nasab, H. V., & Daneshi, S. (2025). Prevalence and Associated Factors of Musculoskeletal Disorders (MSDs) among Greenhouse Workers. *The Open Rheumatology Journal*, 19(1). <https://doi.org/10.2174/0118743129386825250430092404>
- Fox, S., Aranko, O., Heilala, J., & Vahala, P. (2019). Exoskeletons: Comprehensive, comparative and critical analyses of their potential to improve manufacturing performance. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(6), 1261-1280. <https://doi.org/10.1108/JMTM-01-2019-0023>
- Gan, W. Y., Raja Ghazilla, R. A., Yap, H. J., & Selvarajoo, S. (2024). Industrial practitioner's perception on the application of exoskeleton system in

- automotive assembly industries: A Malaysian case study. *Heliyon*, 10(4), e26183. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26183>
- Gao, G., C L So, B., Cheng, A. S. K., Man, S. S., & Ng, S. S. M. (2024). Effect of exoskeleton devices on work-related musculoskeletal disorders (WMSDs) among healthcare workers: A scoping review. *Ergonomics*, 1-13. <https://doi.org/10.1080/00140139.2024.2413150>
- Golabchi, A., Chao, A., & Tavakoli, M. (2022). A Systematic Review of Industrial Exoskeletons for Injury Prevention: Efficacy Evaluation Metrics, Target Tasks, and Supported Body Postures. *Sensors*, 22(7), 2714. <https://doi.org/10.3390/s22072714>
- Golabchi, A., Riahi, N., Fix, M., Miller, L., Rouhani, H., & Tavakoli, M. (2023). A framework for evaluation and adoption of industrial exoskeletons. *Applied Ergonomics*, 113, 104103. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2023.104103>
- Govaerts, R., De Bock, S., Provyn, S., Vanderborght, B., Roelands, B., Meeusen, R., & De Pauw, K. (2024). The impact of an active and passive industrial back exoskeleton on functional performance. *Ergonomics*, 67(5), 597-618. <https://doi.org/10.1080/00140139.2023.2236817>
- Hasan, S., & Alam, N. (2025). Comprehensive Comparative Analysis of Lower Limb Exoskeleton Research: Control, Design, and Application. *Actuators*, 14(7), 342. <https://doi.org/10.3390/act14070342>
- He, X., Xiao, B., Wu, J., Chen, C., Li, W., & Yan, M. (2023). Prevalence of work-related musculoskeletal disorders among workers in the automobile

- manufacturing industry in China: A systematic review and meta-analysis. *BMC Public Health*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s12889-023-16896-x>
- Hoffmann, N., Prokop, G., & Weidner, R. (2022). Methodologies for evaluating exoskeletons with industrial applications. *Ergonomics*, 65(2), 276-295. <https://doi.org/10.1080/00140139.2021.1970823>
- Huamanchahua, D., Toledo-Garcia, P., Aguirre, J., & Huacre, S. (2022). Hand Exoskeletons for Rehabilitation: A Systematic Review. *2022 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/IEMTRONICS55184.2022.9795786>
- Institute for Health Metrics and Evaluation. (2024). *Global Burden of Disease 2021: Findings from the GBD 2021 Study*. Institute for Health Metrics and Evaluation. https://www.healthdata.org/sites/default/files/2024-05/GBD_2021_Booklet_FINAL_2024.05.16.pdf
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), O. A., M. P., & Zubizarreta Molinuevo, J. (2021). *NTP 1162: Exoesqueletos I: Definición y clasificación* (Notas Técnicas de Prevención (NTP)). Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). <https://www.insst.es/documentacion/colecciones-tecnicas/ntp-notas-tecnicas-de-prevencion/34-serie-ntp-numeros-1152-a-1168-ano-2021/ntp-1162-exoesqueletos-i-definicion-y-clasificacion>
- Jakobsen, L. S., Samani, A., Desbrosses, K., De Zee, M., Steinhilber, B., & Madeleine, P. (2025). Effects of 24-weeks in-field use of a back-supporting exoskeleton on biomechanics, work intensity and

musculoskeletal discomfort: A randomized controlled trial among logistic workers. *Applied Ergonomics*, 125, 104469.

<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2025.104469>

Johns, J., Krämer, L., Heinrich, K., El-Edrissi, O., Potthast, W., & Glitsch, U.

(2025). The effects of body asymmetry in load handling with a back supporting exoskeleton on lumbar loading. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 107, 103739.

<https://doi.org/10.1016/j.ergon.2025.103739>

Kabir, R., Sunny, M., Ahmed, H., & Rahman, M. (2022). Hand Rehabilitation Devices: A Comprehensive Systematic Review. *Micromachines*, 13(7), 1033. <https://doi.org/10.3390/mi13071033>

Kang, S. H. (2025). Influence of individual flexibility on the effectiveness of a passive back-support exosuit in reducing erector spinae muscle activity: An exploratory study. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 110, 103843. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2025.103843>

Kermavnar, T., De Vries, A. W., De Looze, M. P., & O'Sullivan, L. W. (2021). Effects of industrial back-support exoskeletons on body loading and user experience: An updated systematic review. *Ergonomics*, 64(6), 685-711. <https://doi.org/10.1080/00140139.2020.1870162>

Kim, S., Nussbaum, M. A., Smets, M., & Ranganathan, S. (2021). Effects of an arm-support exoskeleton on perceived work intensity and musculoskeletal discomfort: An 18-month field study in automotive assembly. *American Journal of Industrial Medicine*, 64(11), 905-914. <https://doi.org/10.1002/ajim.23282>

- Knafo, Y., Zhou, Y., Manor, A., Osovizky, A., & Riemer, R. (2025). Toward an active exoskeleton with full energy autonomy. *Frontiers in Robotics and AI*, 12, 1597271. <https://doi.org/10.3389/frobt.2025.1597271>
- Kong, Y.-K., Kim, J. H., Shim, H.-H., Shim, J.-W., Park, S.-S., & Choi, K.-H. (2023). Efficacy of passive upper-limb exoskeletons in reducing musculoskeletal load associated with overhead tasks. *Applied Ergonomics*, 109, 103965. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2023.103965>
- Koopman, A. S., Näf, M., Baltrusch, S. J., Kingma, I., Rodriguez-Guerrero, C., Babič, J., De Looze, M. P., & Van Dieën, J. H. (2020). Biomechanical evaluation of a new passive back support exoskeleton. *Journal of Biomechanics*, 105, 109795. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2020.109795>
- Kopp, V., Holl, M., Schalk, M., Daub, U., Bances, E., García, B., Schalk, I., Siegert, J., & Schneider, U. (2022). Exoworkathlon: A prospective study approach for the evaluation of industrial exoskeletons. *Wearable Technologies*, 3, e22. <https://doi.org/10.1017/wtc.2022.17>
- Kranenborg, S. E., Greve, C., Reneman, M. F., & Roossien, C. C. (2023). Side-effects and adverse events of a shoulder- and back-support exoskeleton in workers: A systematic review. *Applied Ergonomics*, 111, 104042. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2023.104042>
- Kuber, P. M., Alemi, M. M., & Rashedi, E. (2023). A Systematic Review on Lower-Limb Industrial Exoskeletons: Evaluation Methods, Evidence, and Future Directions. *Annals of Biomedical Engineering*, 51(8), 1665-1682. <https://doi.org/10.1007/s10439-023-03242-w>

- Li, Q., Haraguchi, N., Yoshimura, B., Wang, S., Yoshida, M., & Hase, K. (2025). Biomechanical Effects of a Passive Lower-Limb Exoskeleton Designed for Half-Sitting Work Support on Walking. *Sensors*, 25(16), 4999. <https://doi.org/10.3390/s25164999>
- Li-Baboud, Y.-S., Virts, A., Bostelman, R., Yoon, S., Rahman, A., Rhode, L., Ahmed, N., & Shah, M. (2023). Evaluation Methods and Measurement Challenges for Industrial Exoskeletons. *Sensors*, 23(12), 5604. <https://doi.org/10.3390/s23125604>
- Lin, W., Xiong, Y., Zhang, C., Wang, X., & Han, B. (2025). Research and Design of a Medial-Support Exoskeleton Chair. *Biomimetics*, 10(5), 330. <https://doi.org/10.3390/biomimetics10050330>
- Luger, T., Bär, M., Seibt, R., Rieger, M. A., & Steinhilber, B. (2023). Using a Back Exoskeleton During Industrial and Functional Tasks—Effects on Muscle Activity, Posture, Performance, Usability, and Wearer Discomfort in a Laboratory Trial. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 65(1), 5-21. <https://doi.org/10.1177/00187208211007267>
- Ma, T., & Xiong, S. (2024). Effects of passive shoulder-support exoskeleton entity and support force on user range of motion under external loads. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 104, 103655. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2024.103655>
- Ma, T., Zhang, Y., Choi, S. D., & Xiong, S. (2023). Modelling for design and evaluation of industrial exoskeletons: A systematic review. *Applied Ergonomics*, 113, 104100. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2023.104100>

- Ma, X., Lv, L., Liu, W., Niu, F., Wang, Haihang, Wang, Haoyu, Zhao, L., Wang, Zihao, & Wang, Zhipu. (2025). Exoskeletons in the context of soldiers: Current status and future research trends. *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 5(3), 100254. <https://doi.org/10.1016/j.birob.2025.100254>
- Madinei, S., Alemi, M. M., Kim, S., Srinivasan, D., & Nussbaum, M. A. (2020). Biomechanical assessment of two back-support exoskeletons in symmetric and asymmetric repetitive lifting with moderate postural demands. *Applied Ergonomics*, 88, 103156. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103156>
- Marican, M. A., Chandra, L. D., Tang, Y., Iskandar, M. N. S., Lim, C. X. E., & Kong, P. W. (2025). Biomechanical Effects of a Passive Back-Support Exosuit During Simulated Military Lifting Tasks—An EMG Study. *Sensors*, 25(10), 3211. <https://doi.org/10.3390/s25103211>
- McGibbon, C., Sexton, A., Jayaraman, A., Deems-Dluhy, S., Fabara, E., Adans-Dester, C., Bonato, P., Marquis, F., Turmel, S., & Belzile, E. (2022). Evaluation of a lower-extremity robotic exoskeleton for people with knee osteoarthritis. *Assistive Technology*, 34(5), 543-556. <https://doi.org/10.1080/10400435.2021.1887400>
- Moeller, T., Krell-Roesch, J., Woll, A., & Stein, T. (2022). Effects of Upper-Limb Exoskeletons Designed for Use in the Working Environment—A Literature Review. *Frontiers in Robotics and AI*, 9, 858893. <https://doi.org/10.3389/frobt.2022.858893>
- Moulart, M., Olivier, N., Giovanelli, Y., & Marin, F. (2022). Subjective assessment of a lumbar exoskeleton's impact on lower back pain in a real

work situation. *Heliyon*, 8(11), e11420.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11420>

Moya-Esteban, A., Durandau, G., Van Der Kooij, H., & Sartori, M. (2023). Real-time lumbosacral joint loading estimation in exoskeleton-assisted lifting conditions via electromyography-driven musculoskeletal models. *Journal of Biomechanics*, 157, 111727.

<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2023.111727>

National Institute for Occupational Safety and Health. (2024, febrero 26).

Elements of Ergonomics Programs. Centers for Disease Control and Prevention (CDC). <https://www.cdc.gov/niosh/ergonomics/ergo-programs/index.html>

Oficina de Inteligencia e Información Sanitaria. (2024). *Estimación de carga de enfermedad y lesiones en la población asegurada – EsSalud 2023*. Seguro Social de Salud del Perú (EsSalud).

<https://repositorio.essalud.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12959/5791/Estimaci%C3%B3n%20de%20carga%20de%20enfermedad%20y%20lesiones%20en%20la%20poblaci%C3%B3n%20asegurada.%20EsSalud%202023.pdf?isAllowed=y&sequence=1>

Ogunseiju, O., Gonsalves, N., Akanmu, A., & Nnaji, C. (s. f.). *Subjective Evaluation of Passive Back-Support Exoskeleton for Flooring Work*. 10-11. <https://doi.org/10.29007/3jk9>

Ojha, A., Gautam, Y., Jebelli, H., & Akanmu, A. (2024). Physiological impact of powered back-support exoskeletons in construction: Analyzing muscle

- fatigue, metabolic cost, ergonomic risks, and stability. *Automation in Construction*, 168, 105742. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105742>
- Okunola, A., Akanmu, A., Jebelli, H., Ammar, A., Shojaei, A., & Agee, P. (2025). Visual attention and situational awareness during exoskeleton use in construction work. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 110, 103838. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2025.103838>
- Pacifico, I., Parri, A., Taglione, S., Sabatini, A. M., Violante, F. S., Molteni, F., Giovacchini, F., Vitiello, N., & Crea, S. (2022). Exoskeletons for workers: A case series study in an enclosures production line. *Applied Ergonomics*, 101, 103679. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103679>
- Panero, E., Pastorelli, S., & Gastaldi, L. (2025). Kinematic effects of a back-assistance exoskeleton during human locomotion. *Applied Ergonomics*, 126, 104502. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2025.104502>
- Park, Y. B., Kim, J. H., Ha, C. W., & Lee, D. H. (2021). Clinical Efficacy of Platelet-Rich Plasma Injection and Its Association With Growth Factors in the Treatment of Mild to Moderate Knee Osteoarthritis: A Randomized Double-Blind Controlled Clinical Trial As Compared With Hyaluronic Acid. *The American journal of sports medicine*, 49(2), 487-496. <https://doi.org/10.1177/0363546520986867>
- Pega, F., Hamzaoui, H., Náfrádi, B., & Momen, N. C. (2022). Global, regional and national burden of disease attributable to 19 selected occupational risk factors for 183 countries, 2000–2016: A systematic analysis from the WHO/ILO Joint Estimates of the Work-related Burden of Disease and

- Injury. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 48(2), 158-168. <https://doi.org/10.5271/sjweh.4001>
- Pentenga, H. M., Coenen, P., Huysmans, M. A., & Speklé, E. M. (2024). The effects of working with a passive arm-support exoskeleton on objective and self-reported measures during field tasks—A randomised cross-over study. *Ergonomics*, 1-17. <https://doi.org/10.1080/00140139.2024.2392785>
- Preethichandra, D. M. G., Piyathilaka, L., Sul, J.-H., Izhar, U., Samarasinghe, R., Arachchige, S. D., & De Silva, L. C. (2024). Passive and Active Exoskeleton Solutions: Sensors, Actuators, Applications, and Recent Trends. *Sensors*, 24(21), 7095. <https://doi.org/10.3390/s24217095>
- Ralfs, L., Hoffmann, N., & Weidner, R. (2021). Method and Test Course for the Evaluation of Industrial Exoskeletons. *Applied Sciences*, 11(20), 9614. <https://doi.org/10.3390/app11209614>
- Ramadurai, S., Jacobson, M., Kantharaju, P., Jeong, Hyeongkeun, Jeong, Heejin, & Kim, M. (2022). Evaluation of Lower Limb Exoskeleton for Improving Balance during Squatting Exercise using Center of Pressure Metrics. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 66(1), 858-862. <https://doi.org/10.1177/1071181322661447>
- Ratke, E. J., McMaster, H., Vellucci, C. L., Larson, D. J., Holmes, M. W. R., & Beaudette, S. M. (2025). Ability of a passive back support exoskeleton to mitigate fatigue related adaptations in a complex repetitive lifting task. *Journal of Biomechanics*, 181, 112553. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2025.112553>

- Reimeir, B., Calisti, M., Mittermeier, R., Ralfs, L., & Weidner, R. (2023). Effects of back-support exoskeletons with different functional mechanisms on trunk muscle activity and kinematics. *Wearable Technologies*, 4, e12. <https://doi.org/10.1017/wtc.2023.5>
- Schrøder Jakobsen, L., De Zee, M., Samani, A., Desbrosses, K., & Madeleine, P. (2023). Biomechanical changes, acceptance, and usability of a passive shoulder exoskeleton in manual material handling. A field study. *Applied Ergonomics*, 113, 104104. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2023.104104>
- Schwartz, M., Desbrosses, K., Theurel, J., & Mornieux, G. (2023). Biomechanical Consequences of Using Passive and Active Back-Support Exoskeletons during Different Manual Handling Tasks. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(15), 6468. <https://doi.org/10.3390/ijerph20156468>
- Schwartz, M., Theurel, J., & Desbrosses, K. (2021). Effectiveness of Soft versus Rigid Back-Support Exoskeletons during a Lifting Task. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(15), 8062. <https://doi.org/10.3390/ijerph18158062>
- Schwerha, D. J., McNamara, N., Nussbaum, M. A., & Kim, S. (2021). Adoption potential of occupational exoskeletons in diverse enterprises engaged in manufacturing tasks. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 82, 103103. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2021.103103>
- Shim, H.-H., Choi, K.-H., Keum, H., Son, S., Kim, J. H., Seo, M.-T., Kim, S.-Y., Park, D., & Kong, Y.-K. (2023). Evaluation of the Effects of Passive Lower-Limb Exoskeletons on Muscle Activities According to Working

Heights. *Applied Sciences*, 13(21), 11754.

<https://doi.org/10.3390/app132111754>

Tetteh, E., Hallbeck, M. S., & Mirka, G. A. (2022). Effects of passive exoskeleton support on EMG measures of the neck, shoulder and trunk muscles while holding simulated surgical postures and performing a simulated surgical procedure. *Applied Ergonomics*, 100, 103646.

<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103646>

Tian, J., Wei, B., Luo, S., Yang, C., Chen, C., Liu, Y., Feng, J., Li, P., Zhu, H., & Yi, C. (2024). A Systematic Review of Occupational Shoulder Exoskeletons for Industrial Use: Mechanism Design, Actuators, Control, and Evaluation Aspects. *Actuators*, 13(12), 501.

<https://doi.org/10.3390/act13120501>

Tröster, M., Eckstein, S., Kennel, P., Kopp, V., Benkiser, A., Bihlmeier, F., Daub, U., Maufroy, C., Dendorfer, S., Fritzsche, L., Schneider, U., & Bauernhansl, T. (2025). Person-specific evaluation method for occupational exoskeletons – Biomechanical body heat map. *Applied Ergonomics*, 132, 104671. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2025.104671>

Tu, Y., Zhu, A., Song, J., Zhang, X., & Cao, G. (2022). Design and Experimental Evaluation of a Lower-Limb Exoskeleton for Assisting Workers With Motorized Tuning of Squat Heights. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 30, 184-193.

<https://doi.org/10.1109/TNSRE.2022.3143361>

Van Der Have, A., Rossini, M., Rodriguez-Guerrero, C., Van Rossom, S., & Jonkers, I. (2022). The Exo4Work shoulder exoskeleton effectively

reduces muscle and joint loading during simulated occupational tasks above shoulder height. *Applied Ergonomics*, 103, 103800.
<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103800>

Van Sluijs, R. M., Wehrli, M., Brunner, A., & Lambercy, O. (2023). Evaluation of the physiological benefits of a passive back-support exoskeleton during lifting and working in forward leaning postures. *Journal of Biomechanics*, 149, 111489. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2023.111489>

Walter, T., Stutzig, N., & Siebert, T. (2023). Active exoskeleton reduces erector spinae muscle activity during lifting. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1143926. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1143926>

Wang, Z., Wu, X., Zhang, Y., Chen, C., Liu, S., Liu, Y., Peng, A., & Ma, Y. (2021). A Semi-active Exoskeleton Based on EMGs Reduces Muscle Fatigue When Squatting. *Frontiers in Neurorobotics*, 15, 625479.
<https://doi.org/10.3389/fnbot.2021.625479>

Weston, E. B., Alizadeh, M., Hani, H., Knapik, G. G., Souchereau, R. A., & Marras, W. S. (2022). A physiological and biomechanical investigation of three passive upper-extremity exoskeletons during simulated overhead work. *Ergonomics*, 65(1), 105-117.
<https://doi.org/10.1080/00140139.2021.1963490>

Yagn, N. (1890). *Apparatus for Facilitating Walking, Running, and Jumping*. (US420179A).
<https://patentimages.storage.googleapis.com/0f/e0/2c/161bea0a876b81/US420179.pdf>

- Yin, P., Yang, L., Qu, S., & Wang, C. (2020). Effects of a passive upper extremity exoskeleton for overhead tasks. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 55, 102478. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2020.102478>
- Zelik, K. E., Nurse, C. A., Schall, M. C., Sesek, R. F., Marino, M. C., & Gallagher, S. (2022). An ergonomic assessment tool for evaluating the effect of back exoskeletons on injury risk. *Applied Ergonomics*, 99, 103619. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103619>
- Zhang, C., Lv, B., Yi, Q., Qiu, G., & Wu, F. (2025). Global, regional, and national burden of low back pain in working-age population from 1990 to 2021 and projections for 2050. *Frontiers in Public Health*, 13, 1559355. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1559355>
- Zheng, L., Pan, C., Wei, L., Bahreinizad, H., Chowdhury, S., Ning, X., & Santos, F. (2024). Shoulder-assist exoskeleton effects on balance and muscle activity during a block-laying task on a simulated mast climber. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 104, 103652. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2024.103652>
- Zhou, J., Xie, S., Xu, S., Zhang, Y., Li, Y., Sun, Q., Zhang, J., & Zhao, T. (2024). From Pain to Progress: Comprehensive Analysis of Musculoskeletal Disorders Worldwide. *Journal of Pain Research*, Volume 17, 3455-3472. <https://doi.org/10.2147/jpr.s488133>