



ESTUDIO SOBRE LA APLICACIÓN DE LOS EXOESQUELETOS EN EL ÁMBITO DE LA ERGONOMÍA LABORAL



Máster Universitario en Prevención
de Riesgos Laborales

UNIVERSIDAD DE ALICANTE

Trabajo fin de Máster

Autor: Juan José Domenech Hurtado

Tutor: Francisco Brocal Fernández

Enero 2022



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

CONTENIDO

1. RESUMEN	7
1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. UN PROCESO PARA PROTEGER A LOS TRABAJADORES.....	12
1.2. EL TRASTORNO MUSCULOESQUELÉTICO.....	13
1.3. SINIESTRALIDAD EN LOS TME	14
2. JUSTIFICACIÓN	20
3. OBJETIVO	21
4. METODOLOGÍA	22
5. RESULTADOS.....	25
5.1. IDENTIFICACIÓN Y TIPOS DE EXOESQUELETO	25
5.2. UN MERCADO EN ALZA	30
5.3. NORMATIVA REGULADORA DE LOS EXOESQUELETOS	32
5.4. CLASIFICACIÓN.....	34
5.5. MODO DE FUNCIONAMIENTO	37
5.5.1. TECNOLOGÍA DE CONTROL DE LOS EXOESQUELETOS ACTIVOS.....	39
5.5.2. TEORÍA DEL FUNCIONAMIENTO EN EL ÁMBITO ERGONOMICO	44
5.6. EJEMPLOS DE EXOESQUELETOS.....	45
5.6.1. EJEMPLOS DE EXOESQUELETO MILITAR.....	46
5.6.2. EJEMPLOS DE EXOESQUELETOS MÉDICOS: REHABILITACIÓN Y DISCAPACIDAD MOTORA.....	48
5.6.3. EXOESQUELETOS PARA PREVENIR RIESGOS ERGONÓMICOS	52
6. EJEMPLO PRÁCTICO	59
6.1. ESTUDIO DE UN CASO PRÁCTICO	59
6.2. ANÁLISIS DEL PROCESO DE TRABAJO	65
6.3. CONSIDERACIONES SOBRE LA DECISIÓN DE ELECCIÓN DE EXOESQUELETO.....	69

6.4.	ANÁLISIS SIMPLIFICADO DE INTERACCIÓN DE FUERZAS MÁQUINA-HUMANO... 73	
6.4.1.	MOMENTO RESULTANTE EN EL HOMBRO	75
6.4.2.	MOMENTO DEL SISTEMA COMPLETO SOBRE EL LUMBAR/CADERA.....	81
6.4.3.	VALORACIÓN DE POSIBLES ZONAS DE PRESIONES EN EL CUERPO	83
7.	VALORACIÓN. VENTAJAS E INCONVENIENTES	85
7.1.	ESTUDIOS RELACIONADOS	87
7.2.	ESTUDIO EN LA CADENA DE MONTAJE DE FORD	91
7.3.	RIESGOS EMERGENTES	95
8.	CONCLUSIONES.....	98
	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	103
	ANEXO.....	112
	INFORME COMPLETO REBA	112

INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Fig.1.	Human Factors. Fuente: International Ergonomics Association IAE	10
Tabla 1.	Fuente: ESTADÍSTICA DE ACCIDENTES DE TRABAJO. Datos anuales 2020. Ministerio de trabajo	15
Fig. 3.	Informe anual de accidentes de trabajo en España 2020	16
Fig.4.	Datos en % sobre daños a la salud causados. Fuente: Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo, 2015 INSST	17
Fig. 5 y 6.	Zonas del cuerpo más afectadas por TME. Fuente: VII ENCT del INSHT.....	18
Fig. 7.	Ilustración del Hardiman 1. Fuente: documento original 1971.....	26
Fig. 8.	Camarógrafo usando Steadicam. Fuente: wiki	27
Fig. 9.	Garrett Brown en 1977. Fuente: Wikipedia.....	28

Fig. 10. Previsión mercado EE. Fuente: <i>grandviewresearch, 2021</i>	30
Fig. 11. Mercado existente de EE por sector. Fuente: <i>grandviewresearch, 2020</i>	31
Fig. 12. Clasificación de EE. (no exhaustiva). fuente: elaboración propia.....	35
Fig. 13. Lugar de uso de EE en el cuerpo. Fuente: guía “exoesqueletos en prevención de riesgos laborales” https://www.prlcuatropuntocero.es/	36
Fig. 14. Clasificación según el modo de funcionamiento. Elaboración propia.....	36
Fig. 15 Diagrama básico de elementos de exoesqueleto activo. Fuente: <i>Cheng-TangPan, (2020)</i>	38
Fig. 16. Render genérico de exoesqueleto de piernas.	39
Fig. 17. Componentes del sistema de control modalidad integrada EEG y EMG. (<i>Susanna Yu. Gordleeva et al., 2020</i>)	43
Fig. 18. Modelo ONYX del fabricante de defensa EEUU Lockheed Martin Corporation.....	46
Fig. 19. The ReWalk Personal 6.0 System de <i>ReWalk Robotics</i>	49
Fig. 20. EksoNR de <i>Ekso Bionics</i>	50
Fig. 21. Exoesqueleto rehabilitacion PASIVO EksoUE. De <i>Ekso Bionics</i>	51
Fig. 22. FORTIS K-SRD Lockheed Martin Corporation.....	52
Fig. 23. EksoZeroG de EksoBionics	53
Fig. 23- 24. Modelo VEX. Hyundai Motor Company.....	54
Fig. 25. EksoEVO. De EksoBionics	55
Fig. 26. Trabajador con BackX. Fuente: <i>suitX</i>	56
Fig. 27. Estudio de fuerzas y de resultados EMG del BackX. (<i>Kazerooni. H, 2019/SUITX</i>) ..	57
Fig. 28. Paexo Back. Fuente: <i>paexo</i>	57
Fig. 29. EE de piernas usado en Iveco.....	58

Fig. 30. Vistas frontal y posterior de músculos hombro. fuente: revistamedica.com	60
Fig. 31. Grafico diversas lesiones en hombro.....	61
Fig. 32. Trabajador usando el exoesqueleto. Fuente: Ford.....	63
Fig. 33a, 33b, 33c. Vistas fotográficas de las posturas de trabajo	66
Fig. 34. Mediciones de ángulos mediante una fotografía del puesto.	67
Fig. 35. Diagrama de flujo elección EE Fuente: elaboración propia.....	71
Fig. 36. Croquis de posición de trabajo	74
Fig. A. SISTEMA SIMPLIFICADO DE FUERZAS ACTUANTES CON RESPECTO AL HOMBRO ...	75
Fig. A1. ESCENARIO SIN EE	78
Fig. A2. CASO A. USO DE EE: Aporta toda la fuerza. (ESCENARIO IDEAL E IMPOSIBLE)	78
Fig. A3. CASO B. USO DE EE: aporta fuerza parcial. Resto de fuerza es ejercida por los músculos.....	79
(ESCENARIO REAL)	79
Fig. B. SISTEMA DE FUERZAS ACTUANTES.....	81
QUE PUEDEN REPERCUTIR AL LUMBAR	81
Fig. B.2. FLEXIÓN Y COMPRESIÓN LUMBAR CREADO POR EL MOMENTO.....	82
Fig. C. ZONAS DE POSIBLES PRESIONES (ACCIONES Y REACCIONES)	83
Fig. 37. Teoría del objetivo del EE. Fuente: elaboración propia.....	86
Fig. 38. Resultados EMG. Fuente: Mitchell L. Stephenson (2018)	89
Fig. 39. Contracciones voluntarias máximas isométricas (MVC). Fuente: (Gillette y Stephenson, 2018).....	89
Fig. 40. Resultados EMG. Fuente: Sunwook Kim, Maury A. Nussbaum 2018.....	90

Fig. 41. Sensores de medida biomecánica usados “Noraxon Ultium EMG”. Fuente: noraxon.....	91
Fig. 42. Resultados de búsqueda científica de EE. (F. Brocal, N. et al., 2021).....	95
Fig. 43. Fases evolutivas del riesgo emergente y la incertidumbre (Brocal et al., 2019 ^a , adaptado de Brocal et al., 2017).	96

“La medicina no ha sido capaz de curarme, por lo que dependo de la tecnología para poder comunicarme y para vivir”

Stephen Hawking

“¿Qué somos las personas sino máquinas muy evolucionadas?”

Marvin Minsky

1. RESUMEN

En la última década ha habido un notable crecimiento del uso de exoesqueletos. Básicamente son máquinas que se acoplan en las extremidades a modo de esqueleto externo para potenciar y/o asistir a la fuerza del usuario. Estos se están usando actualmente tanto en el campo militar, el médico, como en las empresas para prevenir riesgos ergonómicos, como son los trastornos musculoesqueléticos. Este tipo de trastorno es la principal causa de accidentalidad, de baja y de absentismo laboral.

Aunque ha sido el sector donde más ha tardado en su implantación, el interés de la industria en el uso de exoesqueletos para la prevención ha ido en aumento progresivo con los nuevos modelos y avances. En los últimos años son cada vez más las grandes corporaciones como Ford, Toyota, y Boeing, entre otras muchas empresas, las que están apostando fuertemente por esta tecnología.

En este sentido, en este trabajo se ha querido conocer el actual estado de los exoesqueletos y su uso. Se ha hecho un recorrido general por las distintas tipologías de exoesqueletos existentes en base a su funcionamiento, su sector de aplicación, características principales, para centrarse particularmente en los usados para ergonomía. Por último, se ha analizado un tipo de exoesqueleto en un caso práctico y se han estudiado las posibilidades, ventajas y limitaciones que se conocen actualmente en el campo ergonómico, en base a la consulta de estudios significativos que intentan abordar esta importante cuestión. Los resultados obtenidos en esta revisión arrojan datos positivos sobre su uso en la ergonomía laboral, y ofrecen un futuro prometedor, pero aún queda mucha incertidumbre y mucho margen de estudio que asegure que son totalmente seguros para los trabajadores a largo plazo.

ABSTRACT

In the last decade there has been a notable boom in the use of exoskeletons. Basically, they are machines that are attached to the extremities as an external skeleton to enhance and / or assist the user's strength. These are currently being used both in the military, the medical field, and in companies to prevent ergonomic risks, such as musculoskeletal disorders (MSD). MSDs are the main cause of occupational accidents.

Although until recently it was relatively unknown and its use for ergonomics has been the sector that has taken the longest to implement, the interest of the industry in its use has been increasing with the interest of preventing MSDs, and in recent years more and more large corporations such as Ford, Toyota, and Boeing, among many other companies, are betting heavily on it.

In this sense, in this work we have wanted to know the current state of this technology and its use. A general overview has been made of the different types of exoskeletons based on their operation, their sector of use and main characteristics, to focus particularly on those used for ergonomics. Finally, a type of exoskeleton has been analyzed in a practical case and the possibilities, advantages and limitations that are currently known in the ergonomic field have been studied, based on the consultation of significant studies that attempt to address this important question. The results obtained in this research show positive data on their use in occupational ergonomics, and offer a promising future, but there is still a lot of uncertainty and a lot of room for study to ensure that they are totally safe for workers in the long term.

1. INTRODUCCIÓN

Los exoesqueletos robóticos, que se vieron por primera vez en películas de ciencia ficción, están ahora apareciendo en la vida real. Esta avanzada tecnología tuvo su principal origen en el sector militar, (Cloud, W., 1965, citado por Khairul Anam, 2012) y actualmente ha tenido un gran crecimiento en este y otros sectores en vista de las posibilidades ofrecidas para potenciar las capacidades humanas y mejorar la vida de la población. Se está implantando cada vez más en el campo médico, tanto para rehabilitación como para proveer a pacientes de movilidad en los miembros, en aquellos que la tienen reducida o nula causado por diversas lesiones como las de médula espinal. (Ashraf S. Gorgey *et al.*, 2019). Así mismo, en los últimos años estas tecnologías están derivando también a una notable implantación en el sector laboral-industrial, con el fin de mejorar las condiciones de los trabajadores en el factor ergonómico, en cuanto a disminuir su fatiga y prevenir sus lesiones corporales, dadas por movimientos y posturas forzadas durante la realización de los trabajos, lo que se conoce como trastornos musculoesqueléticos.

Actualmente, dentro del campo de estudio de la prevención de riesgos laborales, los trastornos musculoesqueléticos (en adelante TME) son la principal causa de accidentalidad laboral. (EU-OSHA, European Risk Observatory 2019); (INSST). Este tipo de riesgo laboral, perteneciente al campo de la ergonomía, ha ido en un constante aumento en la era de la industrialización. A pesar de que cada vez son más las ayudas al trabajador proporcionadas por automatismos y maquinaria robótica diversa de apoyo, aún siguen siendo necesarias la manipulación y trabajo humanos, representando todavía un serio problema y en este contexto la industria esta haciendo uso cada vez más de esta tecnología para prevenir dichos riesgos ergonómicos.

Ergonomía es la disciplina científica que trata de las interacciones entre los seres humanos y otros elementos de un sistema, así como, la profesión que aplica teoría, principios, datos y métodos al diseño con objeto de optimizar el bienestar del ser humano y el resultado global del sistema (INSST)

La Asociación Española de Ergonomía (AEE) lo define como: “ciencia aplicada de carácter multidisciplinar que tiene como finalidad la adecuación de los productos, sistemas y entornos artificiales a las características, limitaciones y necesidades de sus usuarios, para optimizar su eficacia, seguridad y confort.”

Según la IEA (Asociación Internacional de Ergonomía), (fig. 1) la engloba en un conjunto de factores, conocidos como Human Factors (HFE), una ciencia integradora multidisciplinaria y centrada en el usuario donde se unen factores cognitivos, de anatomía humana, psicología, biomecánica, entorno laboral, sistemas mecánicos, interacción humano computadora.

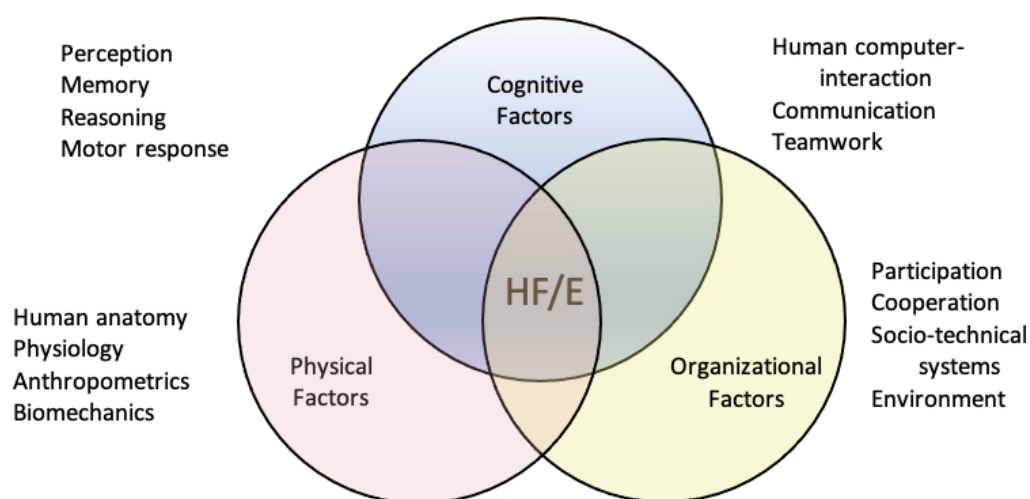


Fig.1. Human Factors. Fuente: International Ergonomics Association

Desde una definición amplia, la ergonomía laboral sería la ciencia que se encarga de adaptar el entorno y los sistemas que engloban el puesto de trabajo al trabajador, para que este encuentre el mayor bienestar y con el mínimo riesgo en el desempeño de su trabajo, ya sea físico y psíquico. Cabe recordar que son el entorno y los sistemas los que deben amoldarse al trabajador y no al contrario.

Estas nuevas tecnologías de los exoesqueletos, por tanto, se integran sólidamente en dicha disciplina ergonómica. Su uso y desarrollo ha sido más bien escaso desde sus conceptos iniciales, los cuales se iniciaron en la década de los 70, pero es aproximadamente en el último lustro cuando el sector ha dado un salto exponencial.

Los estudios sobre su funcionamiento y respecto a su impacto en el cuerpo humano, eran relativamente escasos, pero con esta creciente implementación y un interés real de su uso por parte de las empresas, se hace necesario ahondar y conocerla a fondo y es por ello por lo que cada vez son más los estudios e investigaciones que desean abordar seriamente esta cuestión.

1.1. UN PROCESO PARA PROTEGER A LOS TRABAJADORES

Los trabajadores pueden estar expuestos a factores de riesgo en el trabajo, como levantar objetos pesados, agacharse, estirarse por encima de la cabeza, empujar y tirar de cargas pesadas, elevar con los brazos cargas, o trabajar manualmente con los brazos por encima de la cabeza, posturas corporales incómodas y realizar las mismas o similares tareas repetitivamente. La exposición a estos factores aumenta el riesgo de lesión del trabajador desencadenando en los TME. Es aquí donde la ciencia ergonómica tiene un papel fundamental y donde entran en juego los exoesqueletos.

El número y la gravedad de los TME resultantes del esfuerzo físico excesivo, además de la problemática de salud personal, tienen también costos asociados a largo plazo. Todo ello puede reducirse sustancialmente mediante la aplicación de principios ergonómicos preventivos.

Cabe recordar que la Ley 31/95 de Prevención de Riesgos laborales (LPRL), establece que las empresas (empresario) son los primeros responsables de proporcionar un lugar de trabajo seguro y saludable para sus trabajadores.

Dentro del campo de la prevención, la implementación de un proceso ergonómico en la empresa es crucial para reducir el riesgo de desarrollar TME.

1.2. EL TRASTORNO MUSCULOESQUELÉTICO

Podemos calificar los TME como una lesión de los músculos, tendones, ligamentos, nervios, articulaciones, huesos o vasos sanguíneos y se pueden manifestar en los brazos, las piernas, la cabeza, el cuello o la espalda que se produce o se agrava por tareas laborales como levantar, empujar objetos (Hilkka Riihimäki y Eira Viikari-Juntura, 1998). Estas lesiones si se producen de forma inmediata e interrumpe la actividad laboral del trabajador estaríamos en un caso de accidente, o si causa lesión a lo largo del tiempo sería considerada como enfermedad profesional (Insst).

Existen multitud de factores de riesgo que producen los TME siendo el principal las posturas, movimientos y esfuerzos de trabajo inadecuados (OSHA, Trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo). Ciertas condiciones del lugar de trabajo, por ejemplo, el diseño del puesto de trabajo, la velocidad del trabajo (especialmente en trabajos asistidos por maquinaria o cintas transportadoras) y el peso de los objetos que se manipulan, influyen en estos factores. Por otro lado, no debemos obviar los factores psicosociales, pues también contribuyen a la aparición de los TME.

Debido a la falta de síntomas muchas veces y al retraso de la aparición TME en la etapa inicial, las personas las ignoran fácilmente. A largo plazo los TME conducen a una disminución de la capacidad de la productividad y provocan a la empresa pérdidas económicas. Por lo tanto, es crucial evaluar y prevenir los peligros que enfrentan los trabajadores en los procesos laborales para reducir su aparición.

1.3. SINIESTRALIDAD EN LOS TME

Según los datos publicados por la OMS en febrero de 2021, se estima que alrededor de 1710 millones de personas en todo el mundo padecen trastornos musculoesqueléticos. El dolor lumbar es el más frecuente, con una prevalencia de 568 millones de personas (OMS 2021).

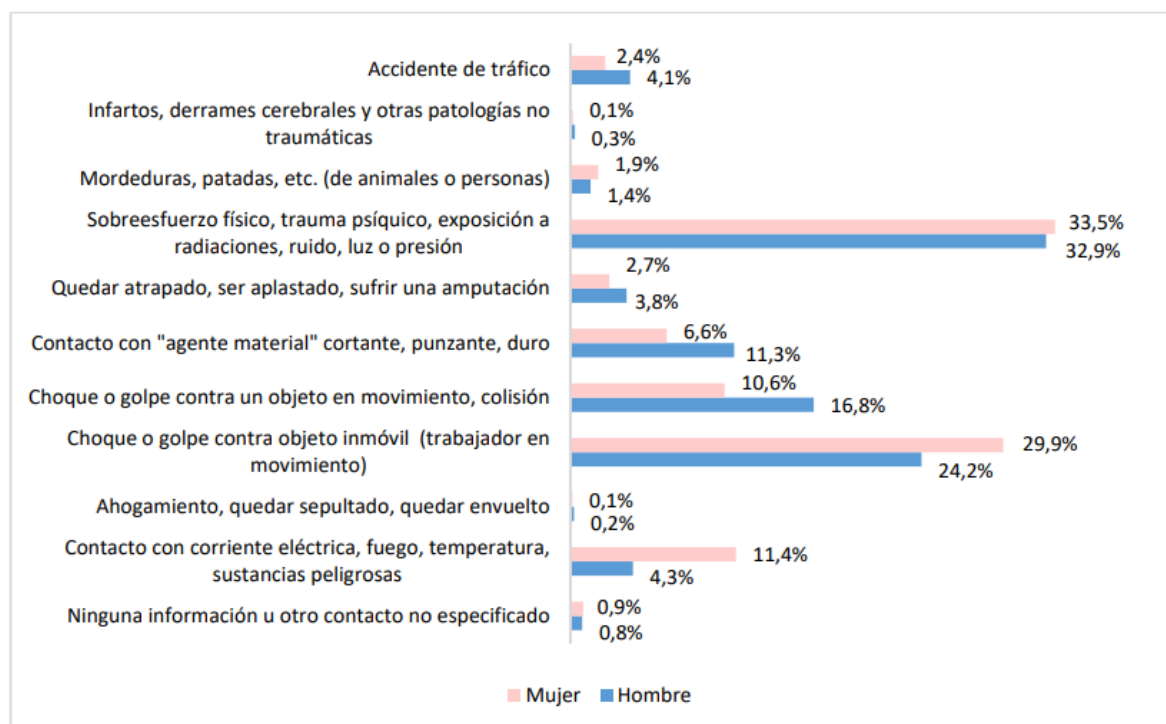
En el año 2020, se registraron en España 446.195 accidentes de trabajo durante la jornada laboral con baja, que suponen el 88,3 % y destacar que el 35% del total de estos accidentes ocurridos en jornada de trabajo con baja en España fueron causados por sobreesfuerzos, siendo el tipo de accidente laboral más numeroso. Como vemos, es la mayor causa de accidentabilidad laboral (Insst).

En la siguiente tabla (Tabla 1) podemos ver los accidentes ocurridos en 2020 para cada sector en números totales. En términos de índice de incidencia, y según datos recogidos en el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo el sector industria y el de construcción son unos de los más afectados. También podemos observar que los accidentes por sobreesfuerzos son los de mayor cantidad en términos totales.

ACCIDENTES DE TRABAJO	
Año 2020	
ACCIDENTES DE TRABAJO	2020
Sección de actividad económica	
A - Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca	29.887
B - Industrias extractivas	1.237
C - Industria manufacturera	79.982
E - Suministro de agua, saneamiento, gestión residuos	7.742
F - Construcción	70.997
G - Comercio al por mayor y menor; reparación de vehículos a motor	60.157
H - Transporte y almacenamiento	31.594
I - Hostelería	27.649
N - Actividades administrativas y servicios auxiliares	45.166
O - Administración Pública y defensa; Seguridad social obligatoria	21.361
Q - Actividades sanitarias y de servicios sociales	45.850
Resto de secciones de actividad (D, J, K, L, M, P, R, S, T, U)	24.573
Forma o contacto que produjo la lesión	
Sobreesfuerzo físico - sobre el sistema musculoesquelético	144.528
Golpe contra un objeto inmóvil, trabajador en movimiento	115.151
Choque o golpe contra un objeto en movimiento, colisión con	67.271
Contacto con agente material, cortante, punzante, duro	44.582
Accidentes de tráfico	16.109
Otras causas	58.554

Tabla 1. Fuente: ESTADÍSTICA DE ACCIDENTES DE TRABAJO. Datos anuales 2020. Ministerio de trabajo

Atendiendo al tipo de accidente, aquí apreciamos (fig. 3) el porcentaje alto de los accidentes por sobreesfuerzos sobre otro tipo de accidentes.



Fuente: Elaboración del INSST a partir del Fichero de microdatos de accidentes de trabajo 2020. MITES.

Fig. 3. Informe anual de accidentes de trabajo en España 2020

En 2015 se hizo la *Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo* un estudio por medio de una encuesta a los trabajadores de empresas. Así mismo la Agencia Europea para la Seguridad y Salud en el Trabajo, realizó en 2020 su estudio estadístico *Trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo: prevalencia, costes y demografía en la UE*, cuyos resultados daban a los TME como la mayor causa de accidentalidad laboral.

Según la ENCT-INSST, (fig. 4) en su estudio en base a las encuestas, evidencia el gráfico siguiente, donde muestra el porcentaje de las dolencias más reportadas, que como vemos fueron dolor de espalda y en los miembros superiores.



Fig.4. Datos en % sobre daños a la salud causados. Fuente: Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo, 2015 INSST

En los siguientes gráficos se muestra las zonas corporales que más afectan los TME. Siendo la espalda y cuello las zonas más afectadas (fig. 5 y 6).

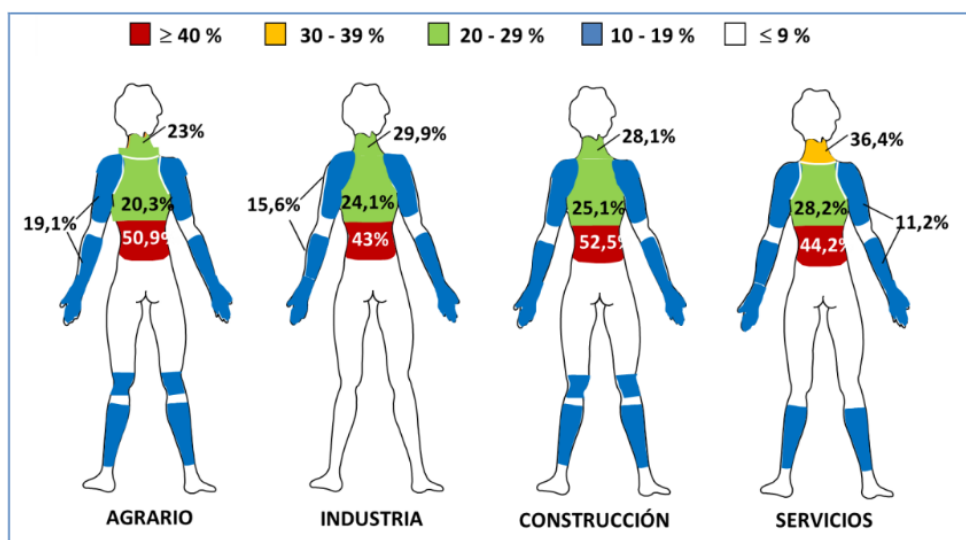
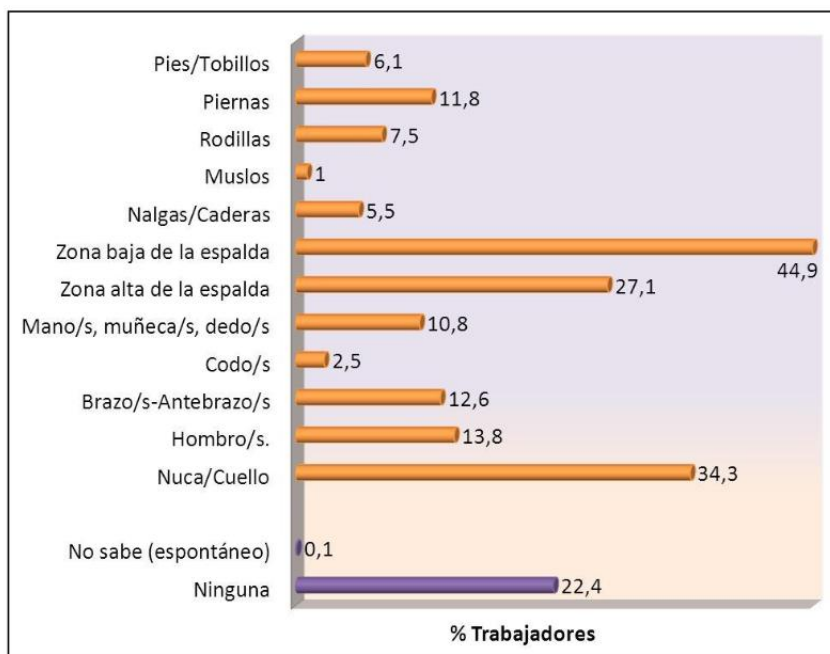


Fig. 5 y 6. Zonas del cuerpo más afectadas por TME. Fuente: VII ENCT del INSHT

La ESENER por otro lado, (*Encuesta europea de empresas sobre riesgos nuevos y emergentes, 2019*) revela efectivamente que las mayores preocupaciones que tienen las empresas europeas son los trastornos musculoesqueléticos y los riesgos psicosociales. Son los problemas mencionados con más frecuencia por la población encuestada. Los tres riesgos a los que se alude con más frecuencia son: los movimientos repetitivos de las manos o de los brazos (65 % de la población encuestada), permanecer sentado durante un período prolongado (un 61 %), nuevo factor que se estudia por primera vez en la encuesta, y tener que tratar, entre otros, con clientes, pacientes o alumnos difíciles (un 59 %).

Todas estas cifras y situación global, junto al avance de la tecnología, está impulsando la adopción del exoesqueleto debido a los beneficios que, según algunos estudios y los propios fabricantes, ofrecen al ayudar y reducir las demandas físicas y la fatiga que experimentan los trabajadores y mejorar la salud, la seguridad y el rendimiento de los trabajadores.

2. JUSTIFICACIÓN

El presente Trabajo Fin de Máster se realiza ante la necesidad de completar el Máster Universitario de Prevención de Riesgos Laborales. Se ha decidido por parte del autor, abordar un tema a su juicio de vital importancia dentro del amplio campo de los riesgos laborales, como son los riesgos ergonómicos en el ámbito laboral industrial y el uso emergente de los exoesqueletos destinados para prevenir tales riesgos.

Aunque cada día las máquinas efectúan más trabajos, todavía hay muchas tareas que se deben hacer a mano y que entrañan un esfuerzo físico; movimientos con las manos, brazos, desplazamientos corporales, elevación de cargas pueden conllevar consecuencias en la salud y cada vez hay más trabajadores que sufren lo que se conoce como trastornos musculoesqueléticos. Son cada vez más las empresas que apuestan por el uso de exoesqueletos como medida preventiva, encontrándose esta tecnología en el mercado en un crecimiento exponencial.

Este trabajo se realiza en base a esta creciente situación actual, que se está dando en cuanto al ámbito de la prevención de los riesgos ergonómicos laborales, y desea hacer un estudio de los principales modelos de que existen actualmente en el mercado, en particular por los exoesqueletos usados en el ámbito de la ergonomía laboral, e intenta analizar las ventajas, desventajas y límites que tienen, en la prevención de los TME.

Después de abordar durante el curso del máster las asignaturas, “evaluación de puestos de trabajo” y “ergonomía”, se ha decidido pues centrarse en este campo de estudio para realizar el presente trabajo final de máster.

3. OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo, es analizar los tipos de exoesqueletos existentes en la actualidad y más concretamente en los usados en ergonomía laboral, y analizar si pueden ofrecer ventajas en la prevención de los trastornos musculoesqueléticos, en base a la información obtenida de los estudios consultados.

4. METODOLOGÍA

El siguiente trabajo está realizado principalmente en base a una metodología deductiva, apoyándose para la obtención de los resultados en una revisión y análisis bibliográfico de las materias a tratar, aunque también se ha incluido ideas de elaboración propia en base a la información estudiada.

En la búsqueda de información se ha consultado dos principales fuentes, por un lado, literatura gris como son páginas webs tradicionales con información más generalista, páginas webs de los propios fabricantes, así como videos técnicos de los mismos. Para asegurar ciertos datos técnicos se ha contactado directamente con los fabricantes. En este sentido cabe mencionar que por la naturaleza de donde está alojada este tipo de información, se ha debido de tener cuidado a la hora de seleccionar y hacer uso de estos datos ofrecidos en este tipo de medios, debiéndose contrastar y cotejar con otras fuentes.

Para un análisis de información más rigurosa se consultó literatura alojada en *Scencedirect*, plataforma de base de datos online de Elsevier (STM) que aloja multitud de artículos y revistas científicas y médicas, y de forma adicional en *Researchgate*. Debido a que hasta la fecha existe una mayor amplitud del uso de exoesqueletos en el ámbito médico y de rehabilitación, así como que es una materia que implica un conjunto de muchas disciplinas, las búsquedas de artículos sobre exoesqueletos arrojaban multitud de estudios en esta cuestión, siendo inabordable y estando al margen del trabajo que nos ocupa. Aún así, algunos de estos estudios han servido para obtener diversos detalles y funciones más concretas y sentar bases sobre de los exoesqueletos recogidos en este trabajo. Por otro lado, en esa búsqueda, también eran mostrados otra gran variedad de artículos relacionados con el mundo

animal, en concreto los insectos, puesto que exoesqueletos hace referencia en un sentido amplio a las coberturas externas rígidas que tienen estos animales.

Con todo ello, cabía acotar la búsqueda y se ha usado el modo avanzado haciendo uso de estrategias de búsqueda con palabras clave y operaciones booleanas de búsqueda avanzada con parámetros tales como “exoskeletons AND workers” y “exoskeletons AND ergonomics”, “exoskeletons AND work disease”, entre otros, además se ha hecho uso de las opciones de filtrado por tipos de artículo que ofrece la revista (*article types*), seleccionando así mismo el filtro de artículos de investigación como puede ser “research articles” y filtrando finalmente por años. Existe también el filtro de búsqueda por temas, pero dado que el tema que nos ocupa engloba un amplio espectro de campos multidisciplinarios, desde la ingeniería mecánica hasta temas biológicos y computacionales, no se ha querido hacer uso de este filtro por no excluir muchos de los artículos.

Aún con todo lo anterior, y a pesar de que se trata de un campo de estudio emergente y los estudios relacionados con ergonomía todavía no son demasiados, el contenido mostrado en cuanto a exoesqueletos seguía siendo amplio, por la cantidad de disciplinas que abarca, y se ha decidido excluir muchos de ellos motivado en que profundizaban en cuestiones más complejas como son temas de índole de alta tecnológica y computacional, como médicas, entre otras, campos que salen del objetivo del presente trabajo.

Lo que se intenta buscar en este trabajo es, al fin y al cabo, además de conocer el estado del arte en cuanto a exoesqueletos, conocer si existe alguna evidencia comprobada de que los EE pueden reducir los riesgos por TME en los trabajadores en el ámbito industrial.

Por todo ello, se ha obtenido la información de los estudios elegidos en base a los criterios expuestos y que tratan sobre todo de buscar la relación de los exoesqueletos ergonómicos, con la reducción de los TME.

Mencionar por último que también se ha tenido en cuenta para nuestro estudio, artículos informativos, memorias, proyectos, documentos técnicos, y publicaciones de administraciones y organizaciones oficiales tanto estatales como internacionales que, de una forma u otra, abordan estas cuestiones.

Con toda esta información se ha estudiado finalmente un ejemplo práctico basándonos en un caso real para valorar el uso de los exoesqueletos en el puesto de trabajo.

5. RESULTADOS

5.1. IDENTIFICACIÓN Y TIPOS DE EXOESQUELETO

Un exoesqueleto es una estructura que se coloca por la parte exterior del cuerpo, ya sea en las extremidades u otras zonas de nuestro cuerpo y que simula un esqueleto externo adicional al del cuerpo humano. Es un sistema de ayuda personal que asiste al cuerpo de manera mecánica (Liedtke y Glitsch, 2018). Dispone de unas articulaciones simulando las del esqueleto humano, para poder acompañar y asistir al movimiento del cuerpo. Como su nombre indica, proviene del griego ἔξω, éxō "exterior" y σκελετός, skeletos "esqueleto". El término inicialmente se ha usado en ciencias del mundo animal para describir las partes que recubre toda la superficie de todos los animales de la familia de los artrópodos. (arácnidos, insectos, crustáceos).

Inicialmente los exoesqueletos (en adelante EE) se idearon fundamentalmente para potenciar las capacidades humanas en un entorno militar. Posteriormente la tecnología se llevó al campo de la medicina siendo una nueva tecnología robótica en el campo de la rehabilitación y tiene, por ejemplo, un gran potencial para revolucionar el ejercicio terapéutico después de sufrir una lesión de médula espinal (LME), entre otras lesiones. Diferentes marcas de exoesqueletos están introduciendo hoy varios modelos en el mercado para este fin con diferentes diseños y características (Ashraf S. Gorgey *et al.*, 2019). Los exoesqueletos robóticos pueden aumentar el rendimiento humano en personas sanas, reemplazar pérdidas de las funciones motoras en personas con discapacidades o proporcionar una práctica motora automatizada para la rehabilitación terapéutica después de una lesión neurológica (Daniel P. Ferris *et al.*, 2018)

Dentro del ámbito de la ergonomía laboral, se pensó que esta tecnología podría ser útil para poder asistir de alguna forma al trabajador y ayudarle a que hiciera menos

esfuerzos durante el trabajo. En este sentido y partiendo de esta base teórica, esto disminuiría los TME ya que los músculos serían sustituidos en gran medida por el aporte de fuerza del exoesqueleto, reduciendo así en el cuerpo los esfuerzos necesarios para realizar las tareas.

Aunque esta tecnología se está desarrollando actualmente y ha tomado una fuerza creciente en los últimos años, los conceptos iniciales comenzaron a idearse sobre la década de los 70. La idea de uso de un sistema como el exoesqueleto para la asistencia a caminar se desarrolló a finales de la década de 1960 en el Instituto Mihajlo Pupin de Serbia, y a principios de la década de 1970 en la Universidad de Wisconsin Madison en los EE. UU. En 1965, General Electric diseñó un traje móvil exoesquelético robótico de 680 kg. apodado "Hardiman" (fig. 7) cuyo desarrollo se recoge en el programa *“Informe final sobre el prototipo de investigación y desarrollo para marcha con aumento de la fuerza y resistencia humanas” de 1971*. Estos diseños eran inviables por su peso y características, y finalmente no hubo desarrollos funcionales relevantes.

Fig. 7.
Ilustración del
Hardiman 1.
Fuente:
documento
original 1971

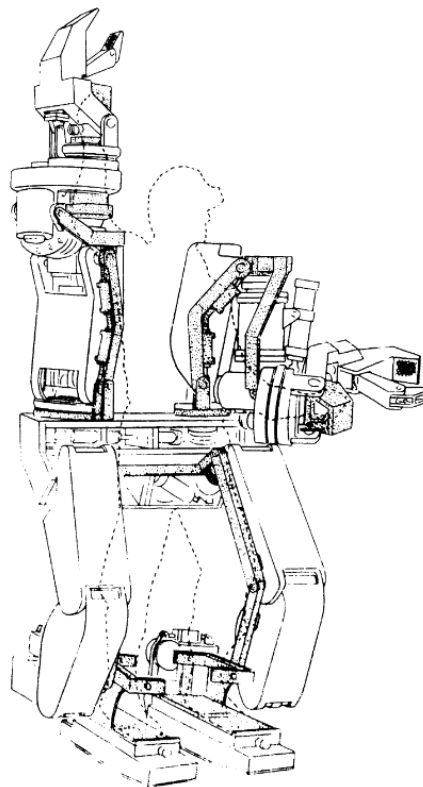


Figure 1. Hardiman I

En 1976, con la necesidad de trabajar de una forma más cómoda en el rodaje de películas de cine, se ideó un sistema adicional para sostener la cámara por parte del camarógrafo. Fue bautizada por su creador como Steadicam (fig.8). Hasta el momento, se había usado grandes grúas y trípodes diversos para mover la cámara.



Fig. 8. Camarógrafo usando Steadicam. Fuente: wiki

Este método pretendía ser una alternativa pionera al uso de la sujeción de la llamada “cámara en mano”, pues ese método, cansaba al operario y, además, en los movimientos, la imagen se agitaba demasiado. Steadicam consiste en un sistema de suspensión y una prolongación natural del brazo humano, constando con soporte para la cámara y sistema de contrapesos, unido a un brazo isoelástico adosado a un chaleco. Con ello se aumenta el tiempo de utilización en tomas largas, ya que el peso se traslada del brazo mecánico a las caderas del operador (Wikipedia: steadicam). El resultado es un estado de suspensión de la cámara fluida y suave en el aire y que no agota al operador.

El inventor de esta técnica fue Garrett Brown (fig.9). Su primera utilización en la película de 1976 “Esta tierra es mi tierra”. Su uso fue de inmediato una revolución que sorprendió a los especialistas de la materia. En el mismo año se utilizó en Rocky, así como StarWars, que iniciaron su uso generalizado¹.

Sin duda era una forma de exoesqueleto, pues permitía sostener un elemento de trabajo pesado y sin apenas fatiga, revolucionando el cine. Hoy en día es ampliamente usado en casi todas las películas.

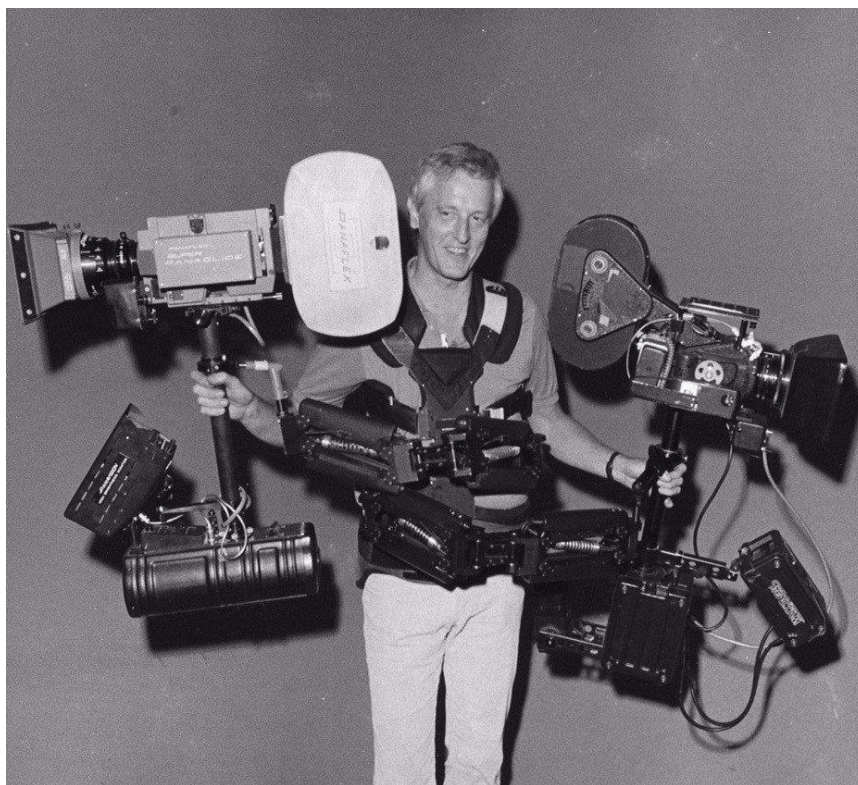


Fig. 9. Garrett Brown en 1977. Fuente: Wikipedia

¹ Véase videos cuyos enlaces se encuentran en el apartado de referencias

En 2001, se dio un fuerte empuje gracias a un programa llamado “Exoesqueletos para aumento del rendimiento humano” (EHPA, del inglés Exoskeletons for Human Performance Augmentation), financiado por la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa de Estados Unidos, (Darpa) que se centraba en la construcción de exoesqueletos para mejorar el rendimiento de los soldados durante el transporte de cargas (Ephrahim Garcia, DARPA, 2002). El primer uso e interés en un desarrollo más amplio fue, por tanto, en el mundo militar.

A lo largo de los años, con los avances en materiales, servomotores, reductores, y la miniaturización, así como diversas tecnologías en la computación fue aumentando el interés y su desarrollo en otros campos, tanto médico como ergonómico.

5.2. UN MERCADO EN ALZA

Un estudio de los EEUU a nivel global, evidencia un gran crecimiento en el mercado de estas tecnologías (fig. 10). El tamaño del mercado mundial de exoesqueletos se valoró en 218,0 millones en 2020 y se espera que se expanda a una tasa de crecimiento anual compuesta del 20,5% de 2021 a 2028. La creciente incidencia de accidente cerebrovascular y la creciente adopción y uso de exoesqueletos en varias importantes industrias, incluidas la construcción, el ejército y el automóvil, son los factores que contribuyen al aumento en la adopción de exoesqueletos. Además, se prevé que la creciente prevalencia de lesiones de la médula espinal (LME) impulsará el crecimiento del mercado durante el período de pronóstico. Según los datos publicados por el Centro Nacional de Estadística de Lesiones de la Médula Espinal (NSCISC) en 2021, en los EE. UU. se contabilizaron alrededor de 17700 casos asociados con lesiones de la médula espinal en 2018. El número total de casos de LME aumentó considerablemente en 2019 y 2020. Siendo el campo médico el que más está haciendo uso de ello (grandviewresearch, 2021).

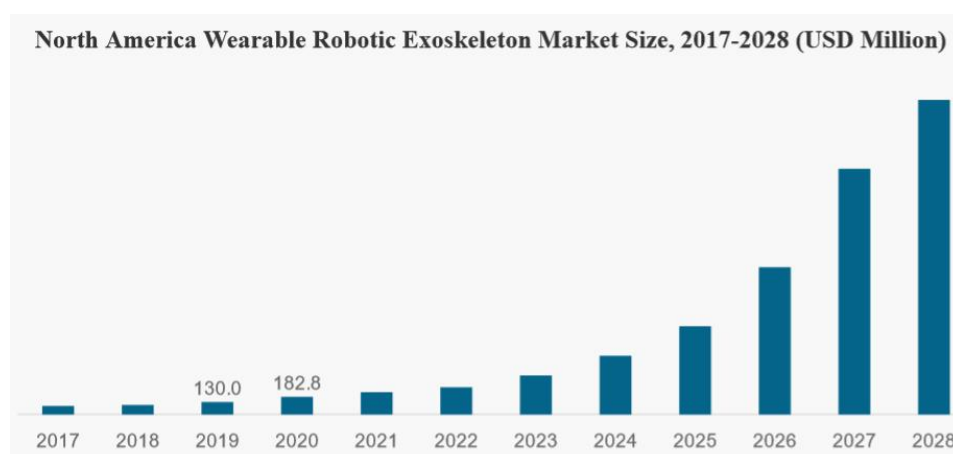


Fig. 10. Previsión mercado EE. Fuente: *grandviewresearch, 2021*

En la fig. 11 podemos apreciar el porcentaje de mercado de EE por sectores, en 2020. El sector médico representó la mayor parte, el 52,0%. La creciente prevalencia de lesiones de la médula espinal (discapacidad motora en diversos grados) hace un uso cada vez mayor de estas soluciones en los centros de rehabilitación y médicos. Se prevé que la creciente conciencia sobre los sistemas tecnológicamente avanzados impulsará la adopción de los exoesqueletos en todos los ámbitos (grandviewresearch, 2021).

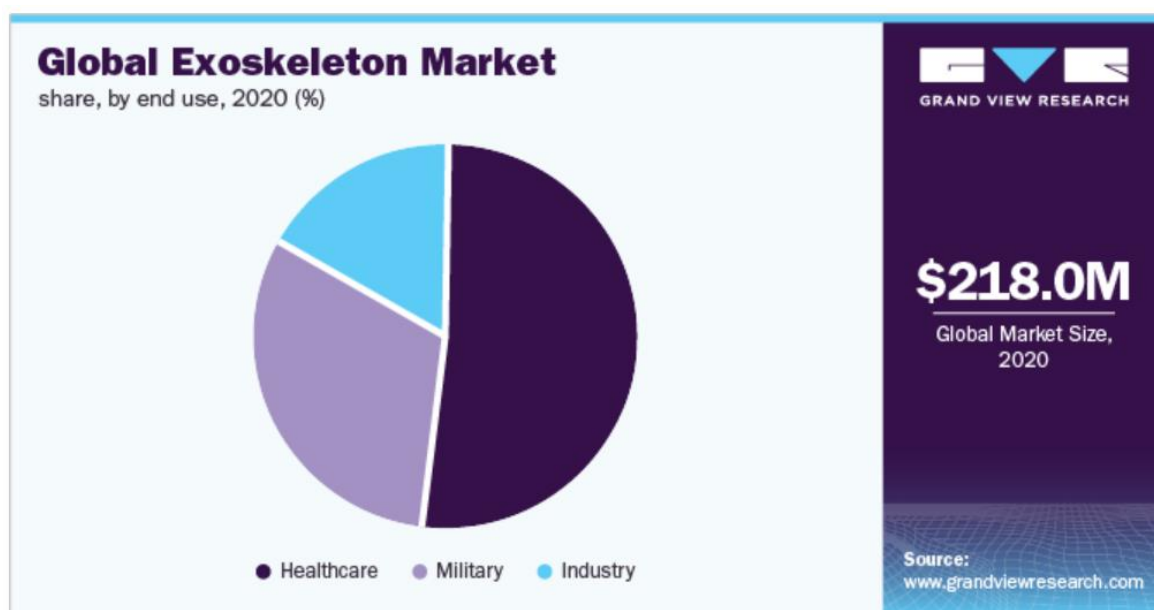


Fig. 11. Mercado existente de EE por sector. Fuente: *grandviewresearch, 2020*

5.3. NORMATIVA REGULADORA DE LOS EXOESQUELETOS

A pesar de su creciente uso en el ámbito laboral, todavía no existe una regulación normativa sobre los EE, si bien para el uso sanitario, sí existe una mayor regulación. En este campo se podría recoger como dispositivo médico atendiendo a la Directiva europea (93/42/CEE) y en cuanto a norma española podrían englobarse como producto sanitario de clase I (Real Decreto 1591/2009).

Puesto que están siendo utilizados en las empresas, el uso del exoesqueleto debe integrarse en la evaluación de riesgos, pero con este vacío legal, no hay base alguna donde apoyarse en este sentido, y todo ello en parte a la falta de estudios más fiables que hagan posible una más fácil aproximación.

Tampoco hay una normativa clara que defina a los EE como un EPI, aunque como dispositivos que previenen de forma individual las lesiones, podría considerarse EPI. Por otro lado, al no estar sujetos a normativa específica, su uso por parte de los trabajadores debe ser voluntario.

Según Israel Benavent, Ergónomo de Programas y responsable del proyecto de los exoesqueletos en Ford (Valencia) *“Ni en España ni en Europa hay una legislación que regule estos dispositivos y nos encontramos con este vacío legal”*.

En octubre de 2019 en Bruselas, tuvo lugar una reunión de la Federación de Sociedades Europeas de Ergonomía (FEES) y de la Federación Europea de Seguridad, para asentar el estatus legal de los exoesqueletos.²

² Federación de Sociedades Europeas de Ergonomía (FEES). <https://ergonomics-fees.eu/node/266>

El marco legal europeo contiene varias referencias aplicables, pero sigue habiendo un gran vacío legal más concreto. Las normas a la que actualmente podríamos acogernos en base a las definiciones de su articulado serían:

- Directiva de máquinas (2006/42/CE): donde alude al uso de dispositivos por el usuario "equipado con un sistema de accionamiento que no sea directamente aplicado por el esfuerzo humano o animal".
- Regulación de dispositivos médicos: Reglamento (UE) 2017/745 del Parlamento Europeo "para ser utilizado con fines diagnósticos y / o terapéuticos".
- Regulación de protección personal (EPI): Reglamento (UE) 2016/425 "para ser llevado puesto o sostenido por una persona para protegerse contra uno o más riesgos para la salud o seguridad de esa persona".

Por otro lado, a nivel internacional los exoesqueletos motorizados están designados como dispositivos médicos de clase II (riesgo intermedio) por la FDA (Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos). Cabe mencionar que, a partir del 1 de abril de 2016, fueron aprobados 3 exoesqueletos para su uso médico en los Estados Unidos (Ashraf S. Gorgey, et al., 2019), aún así, no hay sustento legal en cuanto a EE para ergonomía. En España, en 2019, las empresas asociadas del sector Automoción de la Comunidad Valenciana (AVIA) solicitaron una legislación que regule el uso de los exoesqueletos en las líneas de producción.³

Según la FEES, se espera que este problema de la legislación a todos los niveles, sea de pronta solución.⁴

³ Publicación del INVASSAT. y vía <https://www.auto-revista.com> (véase en referencias)

⁴ Federación de Sociedades Europeas de Ergonomía (FEES) <https://ergonomics-fees.eu/node/266>

5.4. CLASIFICACIÓN

En la actualidad existen 3 claros objetivos de uso para los cuales han sido ideados los exoesqueletos, y que varían en función del tipo del mismo y hacia donde esté enfocado como veremos más adelante:

a) Sector militar:

Objetivo:

- Levantar cargas pesadas y transportarlas en sujetos sanos para reducir la fatiga potenciando así las capacidades humanas. (entorno militar, cuerpos de seguridad y emergencias p, ej.)

b) Sector médico:

Objetivos:

- Rehabilitación: asistir en movimiento de forma parcial o total a pacientes con movilidad reducida para su rehabilitación (lesiones por accidentes físicos o neurológicos)
- Asistencial: ofrecer movimiento de forma totalmente autónoma a discapacitados permanentes con imposibilidad motora.

c) Sector ergonómico laboral:

Objetivo:

- Reducir el cansancio y las lesiones del trabajador al reducir la tensión y el esfuerzo muscular ante cargas o de movimientos repetitivos dados en el trabajo y que pueden pasar factura al cuerpo a lo largo del tiempo, lo que se conoce como los TME.

Existe una gran cantidad de modelos y cada uno de ellos cuenta con unas características específicas para cubrir estas determinadas necesidades, sin embargo, aún no existe un consenso oficial ni clasificación formal de los mismos. Se ha realizado aquí (fig. 12), aunque de forma no exhaustiva, dicha clasificación:

CLASIFICACIÓN DE LOS EXOESQUELETOS		
POR SECTOR DE ACTUACIÓN	USO MILITAR (TRANSPORTAR CARGAS)	
	USO MÉDICO (REHABILITACIÓN Y ASISTENCIA A DISCAPACITADOS)	
	USO ERGONÓMICO LABORAL (PREVENCIÓN DE TME)	
MODO DE FUNCIONAMIENTO	ACTIVOS <ul style="list-style-type: none"> • USO MILITAR • USO MÉDICO 	<ul style="list-style-type: none"> • Constan de motores eléctricos que mueven el EE. • Usan sensores para predecir el movimiento. • Usan baterías.
	PASIVOS <ul style="list-style-type: none"> • USO ERGONOMÍA 	<ul style="list-style-type: none"> • No tienen motores. No usan baterías. • Funcionamiento mecánico: muelles, pistones... • SON LOS USADOS EN ERGONOMÍA
PARTE DEL CUERPO DONDE ACTÚA	CUERPO ENTERO	Exoesqueleto de grandes dimensiones que abarca miembros y tronco
	ESPALDA	Actúa sobre la columna vertebral
	MIEMBROS SUPERIORES	Brazos, hombros, manos, antebrazo, nuca
	MIEMBROS INFERIORES	Actúa sobre las piernas

Fig. 12. Clasificación de EE. (no exhaustiva).
fuente: elaboración propia



Fig. 13. Lugar de uso de EE en el cuerpo. Fuente: guía “exoesqueletos en prevención de riesgos laborales” <https://www.prlcuatropuntocero.es/>

	MODO DE FUNCIONAMIENTO (MAYORITARIAMENTE)	
	ACTIVOS	PASIVOS
USO MILITAR	✓	
USO MÉDICO	✓	
USO ERGONÓMICO LABORAL		✓

Fig. 14. Clasificación según el modo de funcionamiento. Elaboración propia

5.5. MODO DE FUNCIONAMIENTO

Dos grandes grupos: exoesqueletos **activos y pasivos**.

En lo que respecta a su estructura y a sus componentes, en los exoesqueletos puede establecerse la distinción esencial entre el grupo de las estructuras de apoyo pasivas y el grupo de las activas (H. Lee, 2012).

Los exoesqueletos **activos** disponen, junto a elementos mecánicos, de motores o servomotores y otros componentes de accionamiento activo que contribuyen al movimiento autónomo del exoesqueleto, y con ello mueven los miembros del cuerpo humano. Este tipo de EE puede utilizar toda o parte de la fuerza necesaria del mismo para mover los miembros, es decir puede ofrecer un aporte total de la fuerza necesaria sin que la persona precise en modo alguno ejercer fuerza muscular, o un aporte parcial, donde el usuario sí realiza una mínima actividad muscular para lograr el movimiento objetivo. Precisan de electricidad y baterías para funcionar. En este contexto ya entrando en el apartado de la robótica, se utilizan preferentemente tecnología de engranajes en sus articulaciones de tipo armónicos o *Harmonic Drive*, en combinación con motores eléctricos de tipo “paso a paso” (*stepper*) de estructura muy compacta. Como son asistidos mediante motores, como veremos más adelante tienen unas tecnologías mas complejas de control, (interface control máquina-humano) para poner en funcionamiento el movimiento (Cheng-TangPan, 2020). (fig. 15)

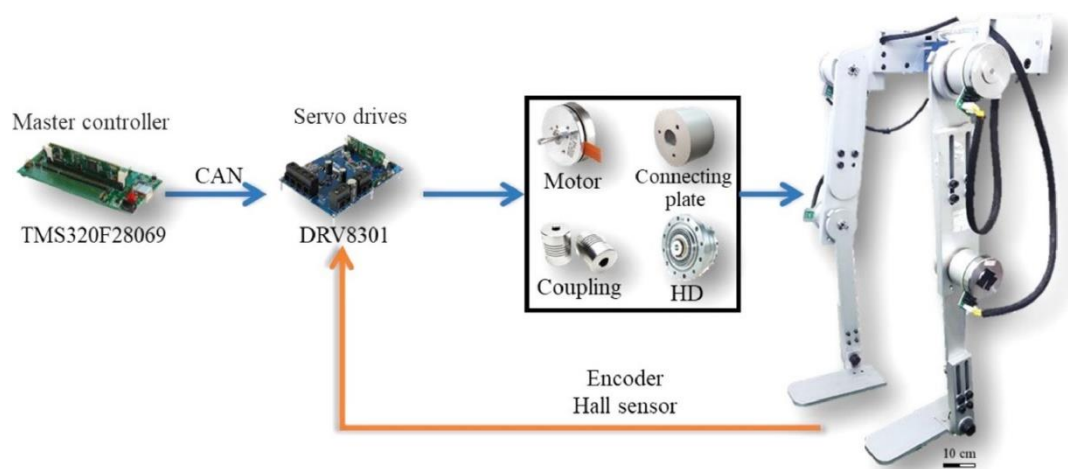


Fig. 15 Diagrama básico de elementos de exoesqueleto activo.
Fuente: Cheng-TangPan, (2020)

Por el contrario, los exoesqueletos **pasivos** aportan la asistencia al movimiento del cuerpo solamente mediante componentes mecánicos tales como muelles, tensores, sistemas de flexión, pistones... no disponen de un accionamiento motorizado controlado activamente ni de baterías pues no requieren electricidad. En este sentido, el exoesqueleto funciona con sus elementos ejerciendo una tensión continua, y con ella actúa sobre los miembros requeridos, ejerciendo diversas fuerzas de empuje.

De estos dos tipos de sistemas, son preferentemente los pasivos los usados para los exoesqueletos del campo de la prevención de riesgos ergonómicos, quedando los activos para el campo militar y médico para mover a discapacitados a asistencia en pacientes de rehabilitación. (fig. 14). Estos últimos son conocidos también como *robótica biónica*.

5.5.1. TECNOLOGÍA DE CONTROL DE LOS EXOESQUELETOS ACTIVOS

Los robots de exoesqueleto integran áreas interdisciplinarias complejas, relacionada con la biónica, la robótica, ingeniería electrónica, la informática y programación, los sistemas de comunicación y control entre otras. Por otro lado, está íntimamente relacionado con la medicina.

El EE más extendido del tipo activo es el que se acopla a las piernas del paciente, (fig. 16) aunque también los hay para otros miembros superiores. Reproduce el funcionamiento del sistema locomotor humano. Van dirigidos, como se comentó anteriormente, además del sector militar, al campo de la rehabilitación médica.



Fig. 16. Render genérico de exoesqueleto de piernas.

Los EE activos utilizan el movimiento robótico autónomo para asistir al portador moviendo sus miembros. Pero para ello se le debe dar una “orden” de inicio a la

máquina y el EE debe ser capaz de actuar y/o mantener el movimiento para obtener el resultado pretendido.

Para este movimiento de control se usan 4 sistemas principalmente. Algunos de estos sistemas están recogidos en una reciente revisión de esta arquitectura de control (N.S.S. Sanjeevi, et al., 2021):

- Mediante Joystick instalado en el propio EE. Este precisa el accionamiento en tiempo real y voluntario del usuario para mover el EE.
- Mediante sensores, acelerómetros, giroscopio, unidad de medición inercial (IMU), que posee el EE. Estos se basan en detectar ciertos movimientos del cuerpo para poner en marcha la máquina y mantener el movimiento, según información de ciertos modelos de fabricantes serían: inclinación de cadera; desplazamiento lateral y hacia adelante; inclinación y postura hacia adelante. El usuario debe cambiar el centro de gravedad (Ashraf S. Gorgey, et al., 2019).
- Mediante electromiografía (EMG)

La electromiografía clínica es una metodología de registro y análisis de la actividad bioeléctrica del músculo esquelético orientada al diagnóstico de las enfermedades neuromusculares (L. Gila, et al., 2009). Las **señales mioeléctricas** son las generadas por la contracción de algún músculo de cualquier extremidad como lo son los brazos y las piernas, pueden medirse con un equipo adecuado y así utilizar la información que estas nos proporcionan en el diseño de prótesis. Por ello, esta tecnología se está empleando para fines de análisis y registro muscular para estudiar el comportamiento humano (Sunwook Kim, 2018). El EMG puede ser monitoreado a través de electrodos insertados dentro de los músculos

(electrodos intramusculares: técnica invasiva) o a través de electrodos en la superficie de la piel sobre el músculo (electrodos superficiales). (*Jessica Knox, 2021*).

La detección basada en EMG para intentar mover un dispositivo está dirigido para sujetos que posean lesiones con un mínimo de actividad muscular residual (Susanna Yu. Gordleeva et al., 2020). Dependiendo del modelo y de la lesión producida esta técnica utiliza los sensores EMG para registrar la actividad muscular e informar a actuadores del exoesqueleto (gracias a las señales mioeléctricas) con la suficiente antelación sobre los siguientes movimientos de la persona y actuar en consecuencia. El control de los pasos de movimiento puede producirse a través de estas tensiones musculares que son recibidas por los sensores. Jacob Rosen y otros autores en 2001, ya experimentaron con la señal muscular (EMG) como la señal de comando principal para activar un sistema simplificado de exoesqueleto de codo. La señal se introdujo en un *myoprocesador* basado en el modelo muscular de Hill, que a su vez predijo los momentos musculares en la articulación (Jacob Rosen et al., 2001). Otros estudios pioneros demostraron la posibilidad del funcionamiento de un controlador mediante EMG para lograr una colaboración exitosa entre humano y un exoesqueleto hecho a medida para la rehabilitación (K. Gui et al., 2020).

- Mediante EEG. Brain computer interface BCI (Alim Louis Benabid, et al 2019)

La interfaz cerebro-computadora es una neuro tecnología emergente que registra la actividad cerebral del usuario (electroencefalograma EEG) y se traduce en una salida de control BCI para que un robot (exoesqueleto activo) ejecute la intención de

movimiento del usuario. Ha demostrado un potencial prometedor para mejorar la calidad de vida de las personas con trastornos neuromusculares como resultado de un accidente cerebrovascular, lesión de la médula espinal (LME) y esclerosis lateral amiotrófica (ELA) (Neethu Robinson, 2021).

El uso de EEG para mover un EE está dirigido para sujetos totalmente discapacitados o en las primeras etapas de terapia de rehabilitación: la actividad muscular es nula o muy débil. Esto es, está dirigido a personas tanto con discapacidad motora total, como para la rehabilitación con un mínimo de actividad muscular para mejorar la recuperación motora (Susanna Yu. Gordleeva et al., 2020).

Se ha experimentado con éxito en otros estudios en la última década para mover y dirigir a pacientes en sillas de ruedas haciendo uso de EEG-BCI (Xinru Huang et al., 2020). El BCI se utiliza para establecer una conexión directa entre el cerebro y la silla de ruedas. Las señales cerebrales controlan la silla de ruedas para que el paciente con parálisis severa, esclerosis lateral amiotrófica y discapacidades físicas severas pueda controlar la silla de ruedas de forma autónoma. Rompe las limitaciones de las sillas de ruedas comunes en las condiciones físicas de los pacientes y tiene una aplicabilidad específica para pacientes con disfunción motora severa que ni siquiera pueden controlar el movimiento de los dedos (Rui Na et al., 2021).

Por ciertas limitaciones actuales del uso de EEG, se están empleando otras técnicas híbridas (fig.17), en los casos que lo permiten, que combinan EEG y EMG (Susanna Yu. Gordleeva et al., 2020). Estas técnicas se encuentran en continuos avances y mejoras.

Junto a este conjunto de técnicas, también es posible combinar la electroestimulación funcional FES, (Functional electrical stimulation). FES mediante descargas eléctricas, estimula los músculos debilitados por una lesión neurológica. El

entrenamiento con FES tiene el potencial de fortalecer los músculos que no se han activado desde el momento de la lesión al usar la estimulación para realizar el movimiento en las extremidades lesionadas y vencer ciertas resistencias (Mohamed Amine, Alouane et al., 2019).

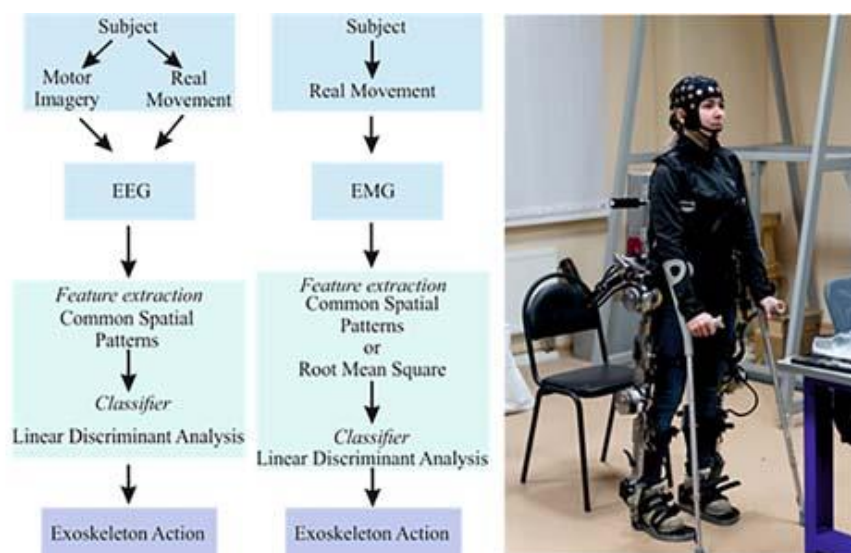


Fig. 17. Componentes del sistema de control modalidad integrada EEG y EMG.
(Susanna Yu. Gordleeva et al., 2020)

5.5.2. TEORÍA DEL FUNCIONAMIENTO EN EL ÁMBITO ERGONOMICO

Centrándonos en el EE usado para ergonomía, donde son mayoritariamente de funcionamiento pasivo, el objetivo que se busca es sin duda, eliminar o reducir los TME. Está comprobado que estos se producen porque el trabajador realiza movimientos y esfuerzos, así como por movimientos repetitivos. Se produce un agotamiento en el cuerpo del trabajador que puede producir lesiones tanto en el acto: accidente de trabajo, como a la larga, enfermedad profesional (Insst).

El EE pretende que el trabajador necesite hacer menos esfuerzo muscular (se reduce la actividad muscular) para realizar su tarea (Sunwook Kim, 2018). Dicho de otra forma, el EE aporta una fuerza propia y sustituye parcialmente a los músculos humanos, y evita que los del cuerpo hagan todo el trabajo necesario. Con el uso de un EE se hace menos esfuerzo, y está demostrado que disminuye la actividad muscular, la carga tensional de músculos, ligamentos y estructuras óseas, y teóricamente el trabajador podría realizar el trabajo durante más duración sin agotarse ni lesionarse por el trabajo continuado y con ello se evitaría la aparición de los TME. (todos los estudios se están realizando con el fin de evidenciar esta cuestión de forma más determinante).

5.6. EJEMPLOS DE EXOESQUELETOS

A continuación, se relaciona una lista de algunos de los principales fabricantes de EE según recoge *grandviewresearch* (2021) y se ha querido mostrar unos ejemplos de cada tipología principal.

- Ekso Bionics
- Hocoma
- Lockheed Martin Corporation
- Suit X (U.S. Bionics, Inc.)
- Rex Bionics Plc.
- RB3D
- ReWalk Robotics Ltd.
- Cyberdyne, Inc.
- ActiveLink (Panasonic Corporation)

5.6.1. EJEMPLOS DE EXOESQUELETO MILITAR

El sector militar fue el primero que vio posibilidades y comenzó en su desarrollo. Son diseñados para proporcionar fuerza y resistencia, no solo a los soldados, sino también se implantan por empresas para asistir en las tareas de equipos de emergencias, socorristas y fuerzas de seguridad que deben realizar tareas extenuantes en entornos difíciles. El objetivo principal es mejorar la fuerza y la resistencia para transportar cargas exigentes a distancia. Suele ser un EE activo.

Existen modelos que abarcan los movimientos de todo el cuerpo humano, pero los más empleados prácticamente en la actualidad son en miembros inferiores. Aumenta la capacidad de las piernas para tareas físicamente exigentes que requieren arrodillarse o ponerse en cuclillas repetitivas o continuas, o levantar, arrastrar, transportar o trepar con cargas pesadas como armamento.



Fig. 18. Modelo ONYX del fabricante de defensa EEUU Lockheed Martin Corporation

ONYX se adapta al cuerpo humano (fig. 18). Según el fabricante, los sensores distribuidos en el exoesqueleto informan la velocidad, la dirección y el ángulo de movimiento a una computadora a bordo que acciona los actuadores electromecánicos en las rodillas.

Según el fabricante, mejora la fuerza y la resistencia para transportar cargas exigentes a distancia:

- Permite un mejor manejo y soporte de armas pesadas
- Reduce el costo metabólico del transporte para mejorar la resistencia y reducir la fatiga.
- Aumenta la capacidad de atravesar escaleras, pendientes y terrenos accidentados, especialmente con carga
- Reduce la tensión en los músculos de las piernas.
- Guía la alineación ortopédica para ayudar a distribuir uniformemente el peso y mantener la alineación del sistema esquelético para evitar lesiones por sobrecarga y presión.

5.6.2. EJEMPLOS DE EXOESQUELETOS MÉDICOS: REHABILITACIÓN Y DISCAPACIDAD MOTORA

El EE para rehabilitación tiene amplias posibilidades de aplicación en la terapia de rehabilitación con diversas ramificaciones médicas. Normalmente actúan en los miembros inferiores, pero también lo hay en los superiores, en los brazos, y manos. Se puede diferenciar dos grandes campos de actuación: tanto para personas con movilidad reducida por algún tipo de lesión o también para personas con discapacidad motora completa. En cualquier caso, EE actúa como una unidad autónoma biónica-robótica, aportando la fuerza total necesaria para el movimiento, o fuerza parcial y contribuyendo de otra parte la actividad muscular del paciente.

Las lesiones en este campo suelen ser:

- Accidente cerebrovascular (neuronal)
- Lesiones de la médula espinal
- Lesiones neurodegenerativas
- Accidentes puramente físicos que precisan recuperación

En cuanto a los objetivos que van dirigidos:

- Pacientes con discapacidad parcial que precisan recuperar movilidad en programas de rehabilitación
- Usuarios con alto grado de discapacidad o invalidez motora, para ser asistido en los movimientos de forma permanente

ReWalk Robotics

ReWalk es un exoesqueleto robótico portátil que proporciona movimiento eléctrico de la cadera y la rodilla para permitir que las personas con lesión de la médula espinal (LME) y se pongan de pie, caminen, giren y suban y bajen escaleras. El sistema proporciona movilidad iniciada por el usuario mediante la integración de un soporte ortopédico portátil, un sistema de control basado en computadora y sensores de movimiento. El sistema permite caminar de forma independiente y controlada mientras imita los patrones de marcha naturales de las piernas. El sistema a batería presenta un exoesqueleto ligero y portátil con motores en las articulaciones de la cadera y la rodilla. El ReWalk controla el movimiento mediante cambios sutiles en su centro de gravedad mediante sensores y acelerómetros incorporados. El sistema detecta una inclinación hacia adelante de la parte superior del cuerpo, que inicia el primer paso. El cambio corporal repetido genera una secuencia de pasos que imita un andar natural funcional de las piernas (fig. 19, ReWalk Robotics, 2021)



Fig. 19. The ReWalk Personal 6.0 System de
ReWalk Robotics

Ekso Bionics

EksoNR es un exoesqueleto robótico diseñado específicamente para ser utilizado en un entorno de neuro rehabilitación. Según el fabricante, el EksoNR permite volver a enseñar al cerebro y los músculos a caminar correctamente de nuevo. Está diseñado para usarse como dispositivo de asistencia para pacientes con una lesión de la médula espinal y proporcionan el 100% de la movilidad necesaria para caminar. EksoNR también pretende ser una herramienta de rehabilitación para que los fisioterapeutas trabajen con el paciente e impulse la plasticidad cerebral (véase fig. 20).

A través de una pantalla de registro LCD, puede verse la distancia y la velocidad específicos de la sesión, y puede guardarse en la nube para tener los registros disponibles.



Fig. 20. EksoNR de *Ekso Bionics*

Cabe mencionar que estos tipos de EE, si se trata de asistir a las piernas, precisan en su mayoría el uso complementario de muletas (Ashraf S. Gorgey; Ryan Sumrell; Lance L. Goetz, 2019).

EksoUE (fig. 21), es un exoesqueleto portátil de extremidades superiores diseñado para ayudar al hombro y brazo afectados de un paciente durante la rehabilitación. A diferencia de la amplia mayoría de este tipo de exoesqueletos, es pasivo.

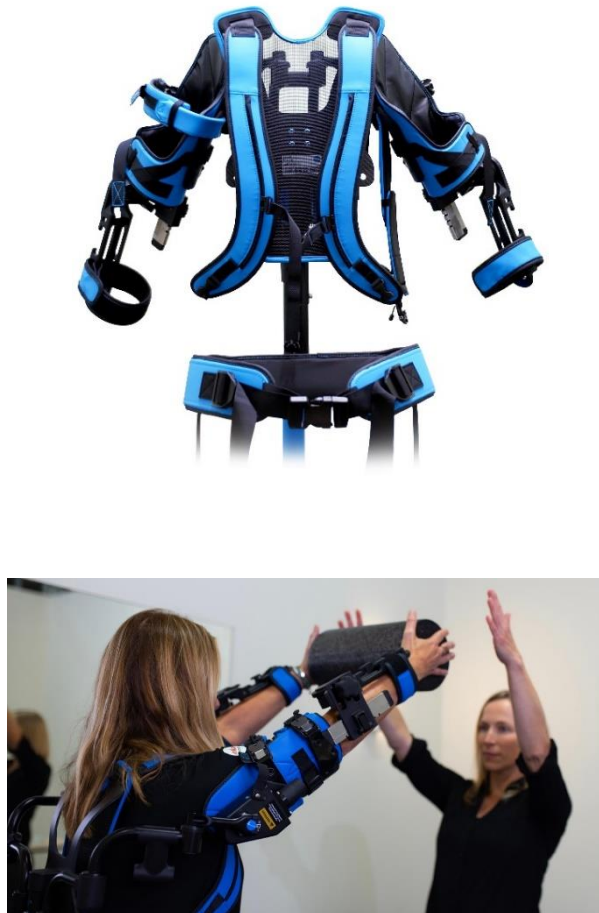


Fig. 21. Exoesqueleto rehabilitacion PASIVO EksoUE.
De Ekso Bionics

Existen en el mercado una amplia variedad de EE médicos, tanto para miembros inferiores como órtesis robóticas para miembros independientes. En un mercado en auge y en creciente investigación.

5.6.3. EXOESQUELETOS PARA PREVENIR RIESGOS ERGONÓMICOS

Los diseños están enfocados principalmente a la asistencia de miembros superiores y espalda. Son pasivos.

Asistencia para miembros superiores

Basado en la original idea del 76 del brazo para la cámara de cine “steadicam”, diversas empresas ofrecen un modelo similar con un fin análogo. FORTIS (fig. 22) se trata de un brazo que puede sostener un peso en suspensión, para que el trabajador no deba cargar con él y liberar los músculos de los brazos de tener que aguantar el peso. Puede ir sujeto a la cintura, y para liberar la carga de las piernas del trabajador, puede incluir una extensión mecánica que apoya en el suelo.

FORTIS



Fig. 22. FORTIS K-SRD Lockheed Martin Corporation.

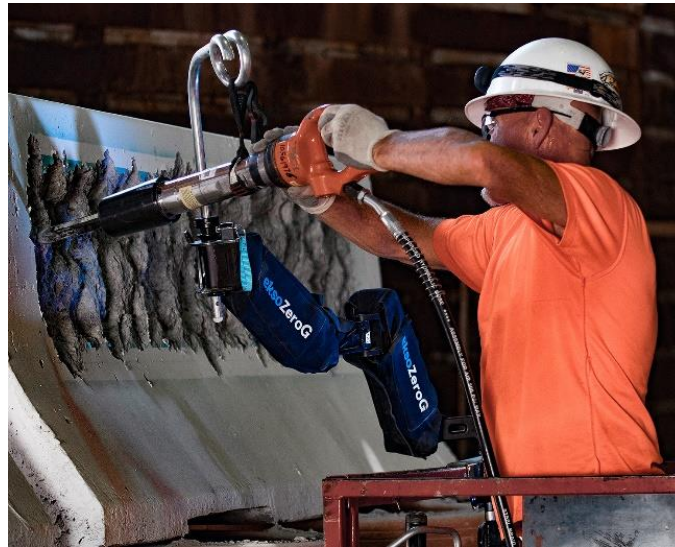
EksoZero

Fig. 23. EksoZeroG de EksoBionics

Otro modelo similar es el EksoZeroG (fig. 23). Este modelo precisa de ir sujeto a una barandilla o estructura adicional.

EksoZeroG es compatible con cualquier herramienta que pese hasta 19 kg y que pueda montarse de manera segura en el extremo de su brazo, como remachadores, martillos perforadores, de impacto y amoladoras (EksoBionics, 2021).

Otros EE que están cada vez en mas uso son los que asisten a los miembros superiores puesto que en muchas tareas se deben hacer labores por encima de la cabeza y esta postura entraña muchos riesgos ergonómicos.

Vex de Hyundai



Fig. 23- 24. Modelo VEX. Hyundai Motor Company

VEX, (fig. 23-24), se trata de un EE pasivo, y apoya el peso de los brazos en el cuerpo y reduce la tensión muscular o esquelética durante movimientos repetitivos o en situaciones de carga pesada. Está hecho para trabajadores cuyo trabajo es principalmente por encima de la cabeza, como atornillar la parte inferior de los vehículos, colocar tubos de freno y colocar escapes. Este tipo está siendo usado mucho en las cadenas de montaje de automoción.

EksoEvo de EksoBionics



Fig. 25. EksoEVO. De EksoBionics

El modelo de EksoEvo (fig. 25) está siendo usado actualmente por el fabricante Ford, siendo una de las primeras empresas en tomar esta iniciativa y cuyas primeras pruebas comenzaron en 2018.

Asistencia para columna vertebral

BackX de SUITX

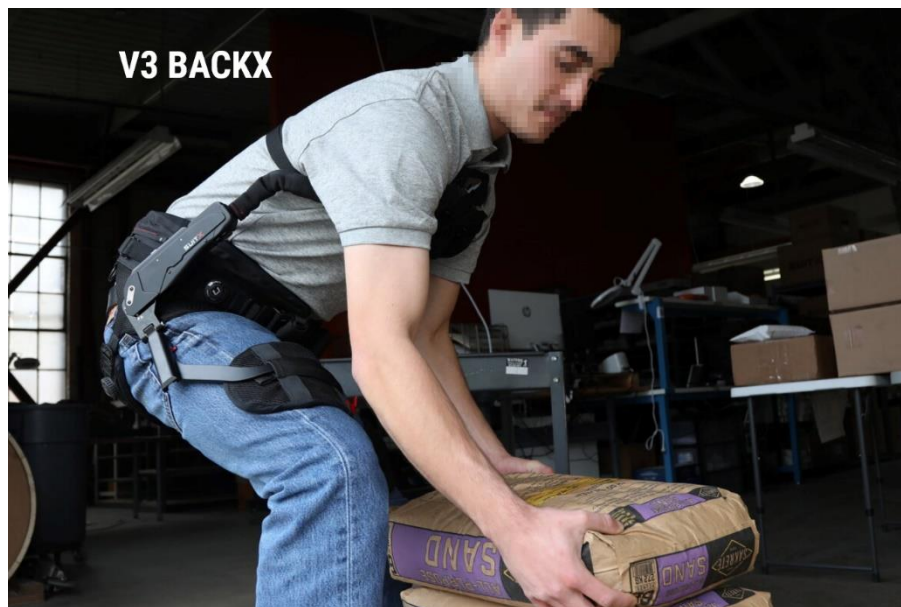


Fig. 26. Trabajador con BackX. Fuente: suitX

BackX, (fig. 26) es un EE pasivo para asistir al trabajador a erguirse al levantar cargas pesadas. Según el fabricante “ayuda a disminuir la tensión en los músculos de la espalda baja puede reducir la fuerza de compresión alrededor de la vértebra L5-S1, lo que reduce el riesgo de lesiones en la espalda y aumenta la resistencia del usuario”. En 2019, dos miembros de la empresa en colaboración con H. Kazerooni (University of California at Berkeley) hicieron un estudio experimental sobre el BackX para demostrar sus ventajas (fig. 27) (Kazerooni H, et al., 2019). El estudio expone que el trabajador al hacer fuerza para incorporarse hace trabajar al músculo erector (grupo muscular de la espalda), provocando un esfuerzo de compresión axial en los discos vertebrales. Con la reducción de actividad muscular demostrada mediante EMG, esta compresión disminuye, y con ello disminuiría el riesgo de TME.

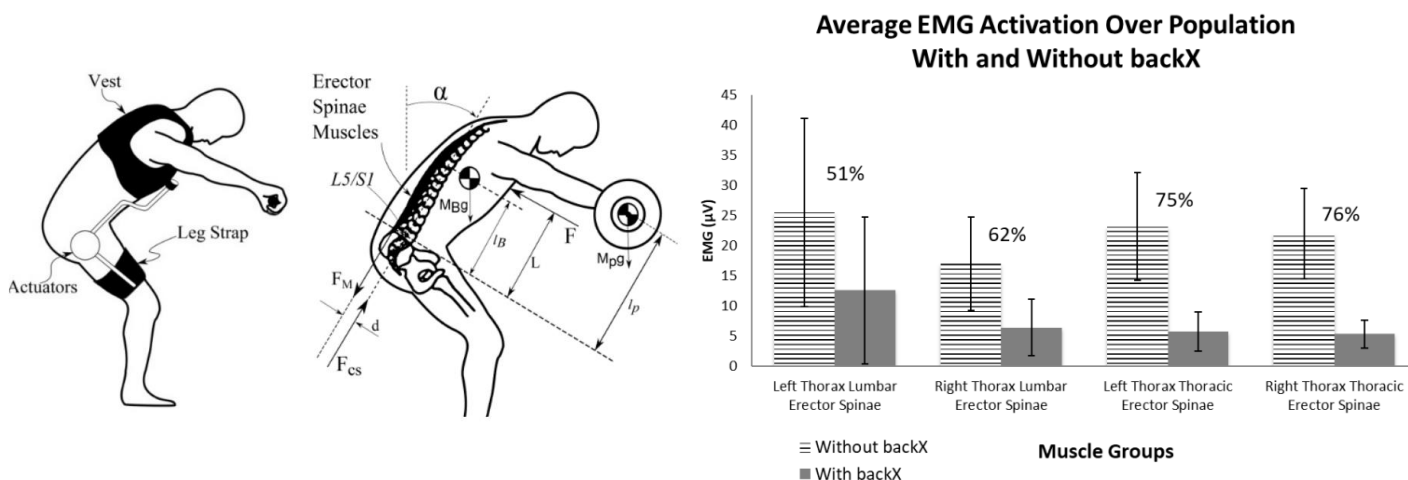


Fig. 27. Estudio de fuerzas y de resultados EMG del BackX. (Kazerooni. H, 2019/SUITX)

Paexo Back de Paexo CO.



Fig. 28. Paexo Back. Fuente: Paexo.

Paexo Back es otro tipo de EE para espalda. El fabricante ofrece un alivio de “hasta 25 kilogramos para la zona lumbar, siendo ligero y fácil de poner y quitar”. (fig. 28).

Asistencia en miembros inferiores. Exoesqueletos para sentarse.

Chairless Chair 2.0 de Noonee.



Fig. 29. EE de piernas usado en Iveco

Chairless Chair 2.0 es un EE fabricado en Alemania que, a modo de piernas complementarias, permiten sentarse al trabajador. Se están empleando actualmente sobre todo en empresas de automoción, como Seat o Iveco. (Fig. 29)

6. EJEMPLO PRÁCTICO

6.1. ESTUDIO DE UN CASO PRÁCTICO

Se ha decidido estudiar un tipo de exoesqueleto pasivo de miembros superiores que sirve para realizar labores por encima de la cabeza y que está siendo usado, entre otras muchas empresas actualmente, en un puesto de trabajo en la cadena de montajes de vehículos de Ford en Valencia. Se ha decidido tomar este caso usado en esta empresa concreta por su carácter significativo de la tarea y por el modelo usado, objeto de diversos estudios relevantes (Sunwook Kim, et al., 2014), si bien ni el autor ni el presente trabajo tiene vinculación alguna con la empresa de Ford.

En el caso concreto se trata de solucionar una problemática que produce trastornos musculoesqueléticos en los trabajadores de dicho puesto, y que, como tantos otros trabajos, se precisa trabajar con los brazos por encima de la cabeza. En este caso se necesita trabajar bajo un coche que se encuentra elevado y meterse bajo él para ensamblar y atornillar piezas, cuya posición debe ser con los brazos en alto y mirar hacia arriba para poder trabajar. Este proceso de montaje bajo el coche es una tarea meticulosa y manual, que de momento no puede ser reemplazada por robots y son los operarios los encargados de realizarla. Según declaraciones de Bruce Hettle vicepresidente de Asuntos Laborales y de Manufactura de Ford, 2018: *“imagínese levantar una bolsa de harina o una sandía sobre la cabeza hasta 4,600 veces al día como parte de su trabajo, que es similar a lo que hacen algunos empleados de Ford todos los días mientras trabajan para montar vehículos en todo el mundo.”*

Este tipo de trabajo consiste en tareas muy repetitivas, manejo de herramientas con los brazos por encima de la cabeza y operaciones asimétricas. Los movimientos repetitivos causan cambios necróticos en los músculos y constituyen una causa significativa de dolor de hombro y cuello (Leclerc et al., 2004, Hviid Andersen et al.,

2002). Los ciclos por encima de la cabeza, agravados por la manipulación de pesos (uso de herramientas, en este caso atornilladora neumática con manguera, así como el peso propio de los brazos), provocan fatiga de los músculos de la cintura escapular, entre otros (Garg et al., 2006). El trabajo por encima de la cabeza crea efectos fisiológicos complejos en el área de los hombros (p. ej., aumento de la presión intramuscular, fatiga muscular) y demandas biomecánicas (p. ej., mayor carga tisular) (fig. 30) (Grieve y Dickerson, 2008, citado por Peng Yin et al., 2020).



Fig. 30. Vistas frontal y posterior de músculos hombro.
fuente: revistamedica.com

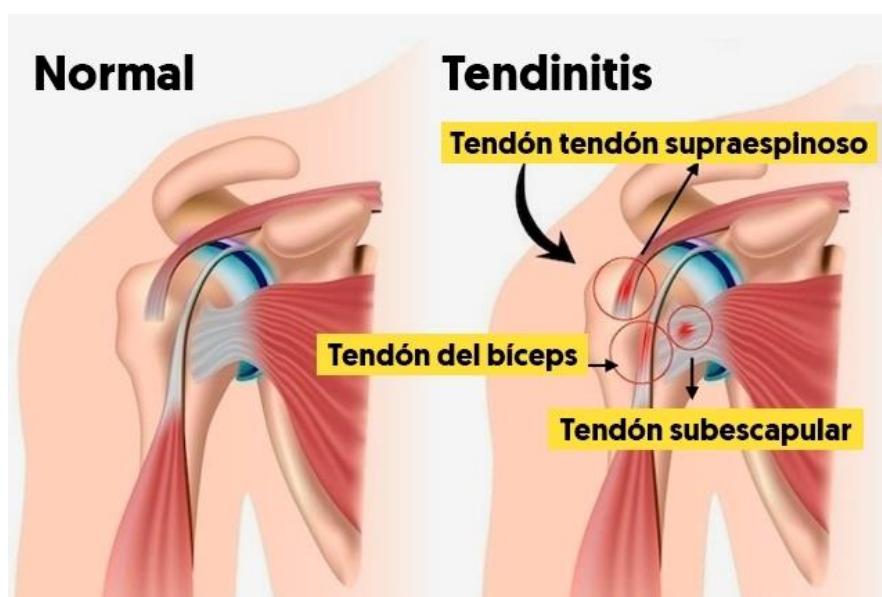


Fig. 31. Grafico diversas lesiones en hombro.

Estudios han indicado que las posturas incómodas o estáticas, el trabajo físico pesado, los movimientos repetitivos de los brazos, el trabajo con los brazos por encima de los hombros y la falta de descansos son factores de riesgo importantes para el dolor de hombro. Se describieron los tipos y características clínicas de los trastornos de los tejidos blandos del hombro. Estos incluyeron trastornos relacionados con los tendones, dolor muscular en el hombro, trastornos relacionados con los nervios, trastornos neurovasculares y trastorno cervicobraquial ocupacional. Los trastornos relacionados con los tendones constituían una categoría general que incluía tendinitis del manguito rotador, tendinitis calcificada, tendinitis bicipital, desgarro del tendón y bursitis (Sommerich, Carolyn M. et al., 1993).

En la planta de producción de Ford en Valencia, en la que se fabrican el Kuga, el Mondeo, el S-MAX, la Galaxy y la Transit Connect, se comenzó esta iniciativa pionera, y para ello Ford se asoció con Ekso Bionics que tenían desarrollado un modelo de exoesqueleto para estas tareas en particular.

Las medidas se comenzaron a implementar en 2018 con el modelo EksoVest, primer desarrollo de la empresa. Poco después de las pruebas exitosas, la compañía Ford finalmente lo puso en funcionamiento en sus 18 fábricas en todo el mundo y, a juzgar por los comentarios preliminares de los empleados de la compañía, fue una idea positiva. En la actualidad el modelo ha evolucionado mejorándolo a la versión actual, conocida como EksoEVO (EksoBionics, 2020).

La versión actual del exoesqueleto está fabricada con titanio y fibra de carbono, es regulable en alturas de los trabajadores, de 152 cm a 192 cm, y proporciona un peso de empuje por brazo de entre 2,3 kg a 6,8 kg, pesando 4 kg en el orden de marcha y funcionamiento⁵. Tiene un mecanismo de generación de momento que está conectado a un brazalete en la parte superior del brazo y proporciona un momento de apoyo que aumenta gradualmente a medida que el brazo se eleva; el usuario puede desactivar fácilmente el momento de apoyo si es necesario. El chaleco incluye tanto el cuello (una almohada en forma de U) como las almohadillas para la espalda, así como la capacidad ajuste de la longitud del tronco. Este método de funcionamiento lo contempla uno de los estudios realizado con este modelo por el Instituto Politécnico y Universidad Estatal de Virginia, (Virginia Tech) en colaboraron con la empresa (Sunwook Kim, et al., 2018).

⁵ Los datos fueron consultados contactando directamente con el fabricante EksoBionics.

Muchos empleados de Ford han declarado que el desarrollo está ayudando a acelerar el ritmo del ensamblaje de vehículos.

Ford tiene la intención de mejorar y complementar aún más su diseño de exoesqueleto; lo más probable es que pronto se esperen nuevas versiones de este desarrollo el cual está en continua evaluación y seguimiento.

Actualmente todas las plantas de ensamblaje de Ford en Norteamérica usan el exoesqueleto y también se están utilizando en plantas de Asia Pacífico, Europa y América del Sur.

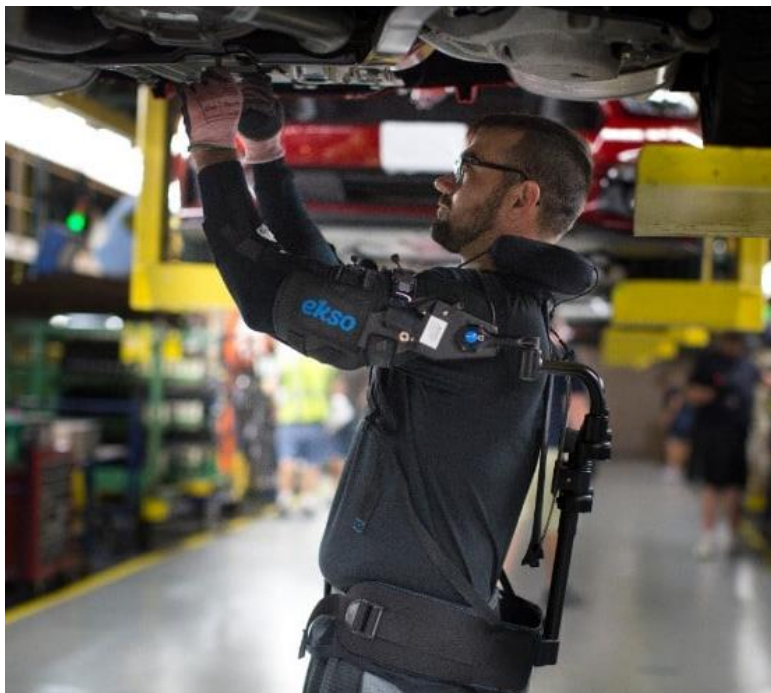


Fig. 32. Trabajador usando el exoesqueleto. Fuente: Ford

En este estudio práctico se pretende analizar el puesto de trabajo y el uso del exoesqueleto conforme a los datos disponibles.

Las fases a acometer en este estudio concreto serán:

- evaluaremos el puesto de trabajo con los datos disponibles
- estudio de las necesidades del trabajador y análisis del exoesqueleto elegido
- valoración final del uso de exoesqueleto propuesto en la empresa, en base a criterios propios y los estudios publicados.

La metodología para evaluar el puesto de trabajo es, en primer lugar, realizar entrevistas, método observacional de las tareas concretas, toma de fotos y video de los movimientos y posturas. En este caso particular por las limitaciones obvias usaremos los datos disponibles, fotos y descripción de la tarea proporcionadas por la empresa. Con la información proporcionada se observa que efectivamente son posturas incómodas durante mucho tiempo con los brazos en alto sujetando la atornilladora eléctrica y atornilladora neumática donde le llega el aire a presión por una manguera, para ello debe elevar cada vez unos 2 a 3 kg. Además, son tareas repetitivas que el operario debe hacer muchas veces durante su jornada.

Se decide usar el método REBA para hacer una primera valoración de la actividad.

METODO REBA

La Evaluación Rápida de Todo el Cuerpo (inglés REBA) fue desarrollada para evaluar “rápidamente” el riesgo de trastornos musculoesqueléticos (TME) asociados con ciertas tareas laborales.

Lo primero es comprender las tareas y demandas del trabajo y hacer una toma de datos y observación de los movimientos y posturas del trabajador durante varios ciclos de trabajo.

6.2. ANÁLISIS DEL PROCESO DE TRABAJO

En la cadena de montaje, el operario se acerca a unas bandejas a unos dos metros de su posición, y coge tuercas con una mano y con la otra sujeta la atornilladora. (fig. 33). Acto seguido se pone bajo el coche y comienza a atornillar, cuando a terminado, vuelve a comenzar el ciclo.⁶

La selección de las posturas que se evaluarán debe basarse en:

- 1) las posturas y tareas más difíciles (según la entrevista con el trabajador y la observación inicial).
- 2) la postura mantenida durante el período de tiempo más largo.
- 3) la postura donde se producen cargas de fuerza. El REBA se puede realizar rápidamente, por lo que, por lo general, se pueden evaluar múltiples puestos y tareas dentro del ciclo de trabajo sin un costo significativo de tiempo / esfuerzo.

⁶ Datos obtenidos de la página web de Ford. <https://media.ford.com>

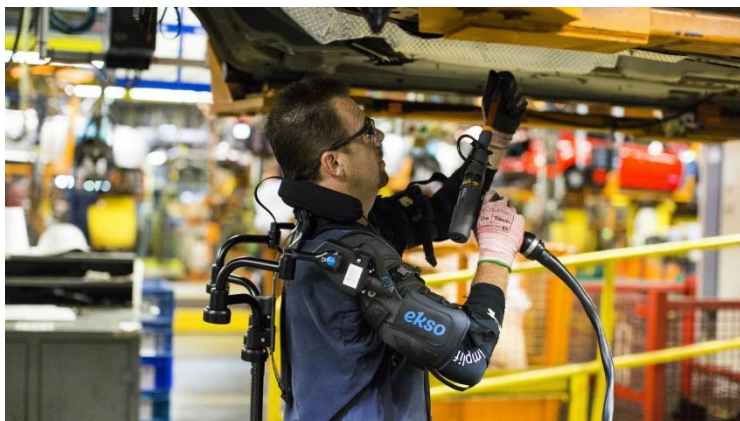


Fig. 33a, 33b, 33c. Vistas fotográficas de las posturas de trabajo

Se procede a tomar los ángulos y los demás datos exigidos por el método para su correcta evaluación. Inclínación del tronco, cuello, ángulos de flexión de brazos, tipo de agarre, tiempos necesarios para la tarea (fig. 34).

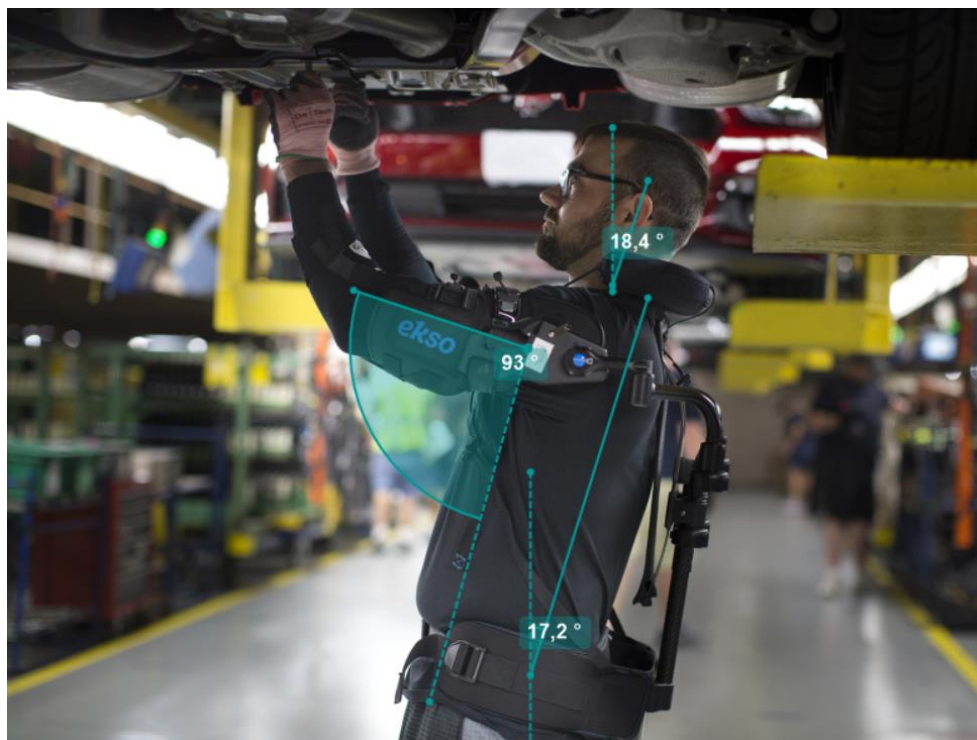


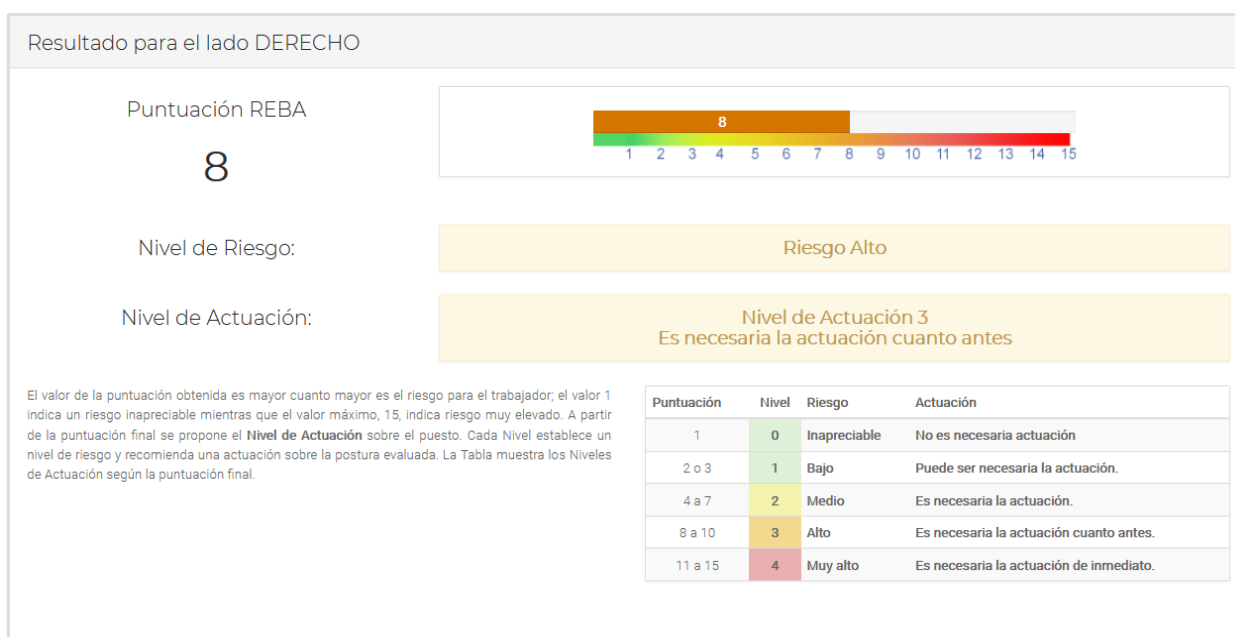
Fig. 34. Mediciones de ángulos mediante una fotografía del puesto.

La toma de ángulos se realizó mediante la aplicación web kinovea.

Se aprecian las posturas necesarias: **flexión** de los brazos a mas de 90° así como los antebrazos, y también el cuello. Además, podemos apreciar una **extensión** del tronco de entre 0° a 20°.

Se ha usado la herramienta proporcionada por la web ERGONAUTAS “Análisis de posturas forzadas por el método REBA” para realizar la evaluación (proceso de evaluación disponible en Anexo)

RESULTADO DE LA EVALUACIÓN CON REBA



Los resultados de la evaluación arrojan efectivamente que el nivel de **riesgo es alto** y se deben tomar medidas cuanto antes.

Por lo que, en el puesto de montaje de vehículos, la empresa debe tomar las medidas pertinentes y el uso del EE podría estar justificado, valorando de forma prioritaria otras primeras medidas preventivas, siendo su uso de carácter preventivo final y/o complementario.

6.3. CONSIDERACIONES SOBRE LA DECISIÓN DE ELECCIÓN DE EXOESQUELETO

A la hora de decidirse por hacer uso de un EE, debemos preguntarnos siempre si existen otras medidas preventivas que se puedan tomar antes de adoptar esta decisión.

El uso de un EE es una técnica relativamente nueva, su uso se encuentra actualmente en procesos de estudio científico más profundo puesto que pueden conllevar otro tipo de riesgos, existiendo todavía muchas lagunas de conocimiento en cuanto a si previenen los TME, por lo que hay que ser muy cautelosos en este sentido.

En este aspecto no existe un verdadero conocimiento por parte de las empresas de sus verdaderas ventajas y posibles riesgos, ni normativa técnica que guie en el proceso de su elección y de su uso.

No obstante, recientemente se han hecho públicas alguna guía que recoge diversos aspectos a tener en cuenta como las del Instituto Nacional de Investigación y Seguridad de Francia (INRS) de 2018, *“Adquisición e integración de un exoesqueleto en una empresa”*, así como un estudio con las claves y orientaciones preventivas a seguir, *“Exoesqueletos en acción: Impacto en la salud y seguridad del operador estado del conocimiento”* (INRS), donde efectivamente concluyen que todavía existen muchas limitaciones en los estudios y por lo tanto muchas dudas sobre la total seguridad para los trabajadores.

No obstante, debemos tener presente que la legislación actual sí contempla unas ideas que tendrían relación con este paradigma, y serían aplicables al uso de los EE, siendo los principios de la acción preventiva, recogidos por diversas normas tanto estatales como internacionales, y en nuestra legislación la contemplada en el art.15 de la LPRL.

- Evitar los riesgos.
- Evaluar los riesgos que no se puedan evitar.
- Combatir los riesgos en su origen.
- Adaptar el trabajo a la persona, en particular en lo que respecta a la concepción de los puestos de trabajo, así como a la elección de los equipos y los métodos de trabajo y de producción, con miras, en particular, a atenuar el trabajo monótono y repetitivo y a reducir los efectos del mismo en la salud.
- Tener en cuenta la evolución de la técnica.
- Sustituir lo peligroso por lo que entrañe poco o ningún peligro.
- Planificar la prevención, buscando un conjunto coherente que integre en ella la técnica, la organización del trabajo, las condiciones de trabajo, las relaciones sociales y la influencia de los factores ambientales en el trabajo.
- Adoptar medidas que antepongan la protección colectiva a la individual.
- Dar las debidas instrucciones a los trabajadores.

En este sentido se ha querido proponer un diagrama sencillo desde un punto de vista metodológico holístico, que encauzaría la toma de decisión de hacer uso de un EE en la empresa, cuya premisa principal es siempre tener presente que se deben agotar primero otras medidas preventivas para solucionar los riesgos dados, antes de tomar la decisión de usar un EE.

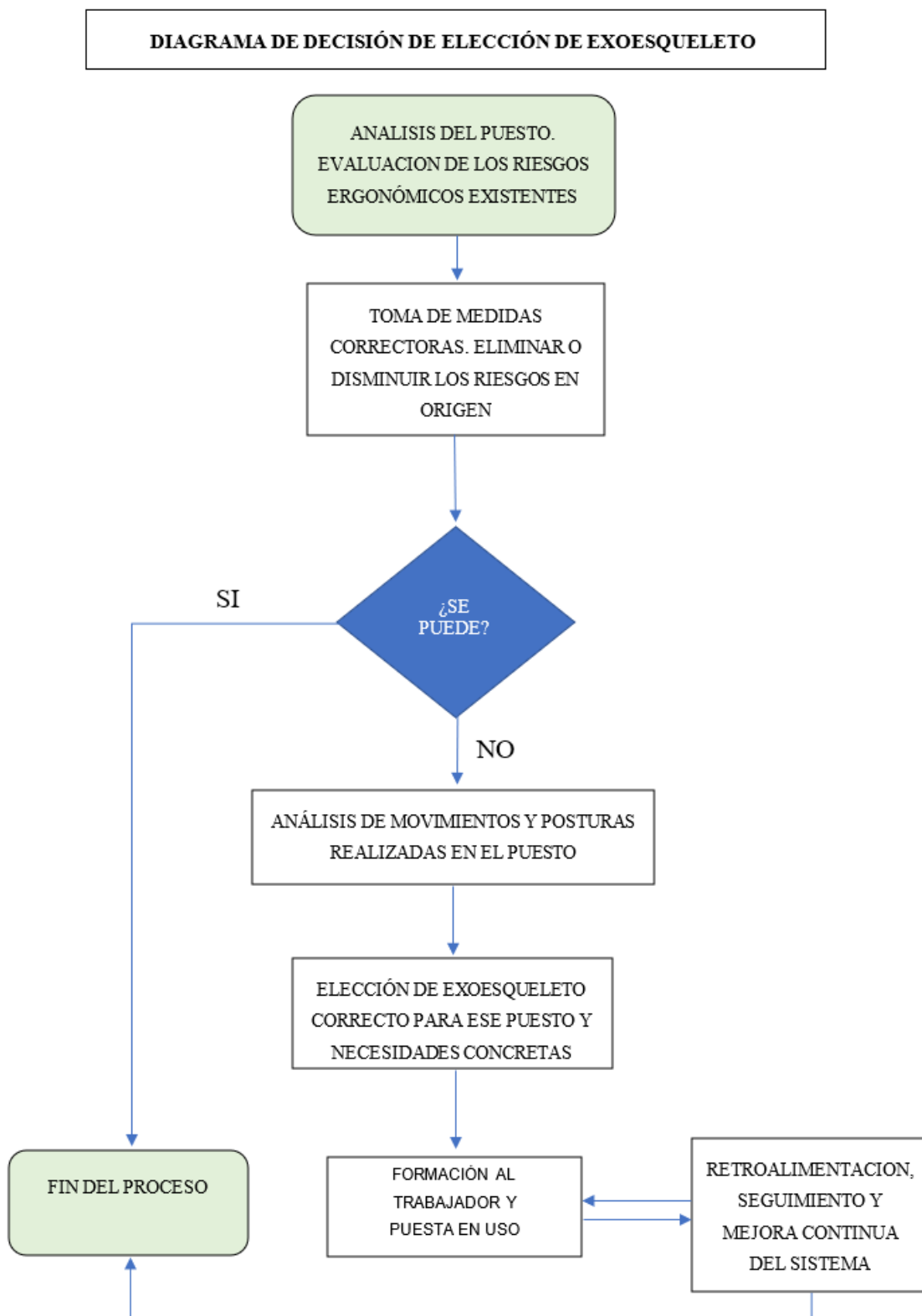


Fig. 35. Diagrama de flujo elección EE
Fuente: elaboración propia

Según vemos en la fig. 35, la primera etapa consistiría en analizar el puesto de trabajo y hacer una evaluación de los riesgos. Se debe dar prioridad a adoptar primero las medidas preventivas que estén al alcance, poniendo en práctica las premisas del art. 15 de la LPRL.

Primero deben tomarse medidas preventivas técnicas, como la modificación del puesto, herramientas, medios, rediseño del lugar de trabajo, y luego deben tenerse en cuenta aspectos organizativos como la reorganización de los procesos de trabajo, reorganizar los movimientos, modificación de lugares para una manipulación diferente, etc. Si con estas medidas se ha solucionado los riesgos habríamos terminado con el proceso, sin embargo, si no ha sido posible, es entonces cuando debemos preguntarnos si se van a usar medidas personales para proteger a los trabajadores, y valorar de qué tipo, siempre valorando el mínimo riesgo.

Cuando decidimos que la solución puede ser el uso de un EE, debemos basarnos en un meticuloso estudio sobre los movimientos del trabajador, y ver qué zonas son las afectadas. En base a eso, se elegiría un EE adecuado del mercado, que esté diseñado para esa necesidad ergonómica concreta.

Es altamente conveniente que exista un feedback y asesoramiento pleno por parte de la empresa fabricante, pues son ellos los que más pueden conocer las características, ventajas y limitaciones de su producto.

Por último, entraríamos en la fase de uso, para ello, se le debe formar al trabajador, tanto en los riesgos que conlleva su puesto, como en el uso del EE. Una vez puesta en marcha, se hará un seguimiento continuo para posibles mejoras y valorar el positivo funcionamiento, así como descartar que puedan producir otros riesgos que no sean observables.

6.4. ANÁLISIS SIMPLIFICADO DE INTERACCIÓN DE FUERZAS MÁQUINA-HUMANO

A continuación, se ha decidido realizar una aproximación del funcionamiento mecánico teórico del exoesqueleto de hombros/brazo, para observar de forma inicial, cómo puede interactuar esta máquina con el cuerpo humano para lograr su objetivo.

El propósito de este modelo de exoesqueleto en definitiva no es otro que el abordar la necesidad dada el puesto y su elección será condicionado a solucionar los problemas del mismo: en este caso el objetivo principal es el proporcionar un empuje de fuerzas que mantenga los brazos elevados libres de las máximas tensiones musculares propias del cuerpo. Es decir, se desea que se sustituya en lo posible a la musculatura humana (en concreto el grupo muscular del hombro) para liberar a estos de las cargas y por tanto de las previsible lesiones musculoesqueléticas aparecidas con el tiempo. Los elementos mecánicos del EE (muelles, resortes, etc.) proporcionan esta “musculatura adicional” y sostienen las cargas (tanto herramientas, como brazo)

Por tanto, se quiere hacer a modo orientativo un estudio del funcionamiento del exoesqueleto y la posible integración maquina-hombre en la medida que nos es posible este apartado con los datos de que disponemos.

La idea de funcionamiento es la siguiente y se han observado 3 hechos relevantes que derivan de su uso.

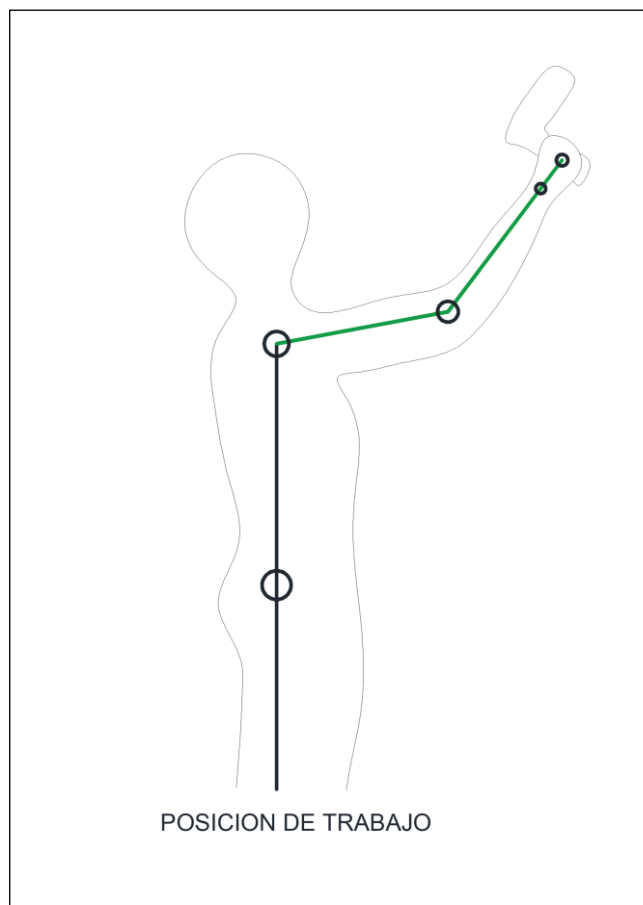


Fig. 36. Croquis de posición de trabajo

En la fig. 36 vemos la posición del trabajador. Las líneas gruesas representan el esqueleto humano y los círculos las articulaciones, de inferior a superior: cadera, hombro, codo, muñeca y mano. (nota: no se ha tenido en cuenta la posible inclinación (extensión) hacia atrás del tronco ni cabeza para simplificar el concepto)

6.4.1. MOMENTO RESULTANTE EN EL HOMBRO

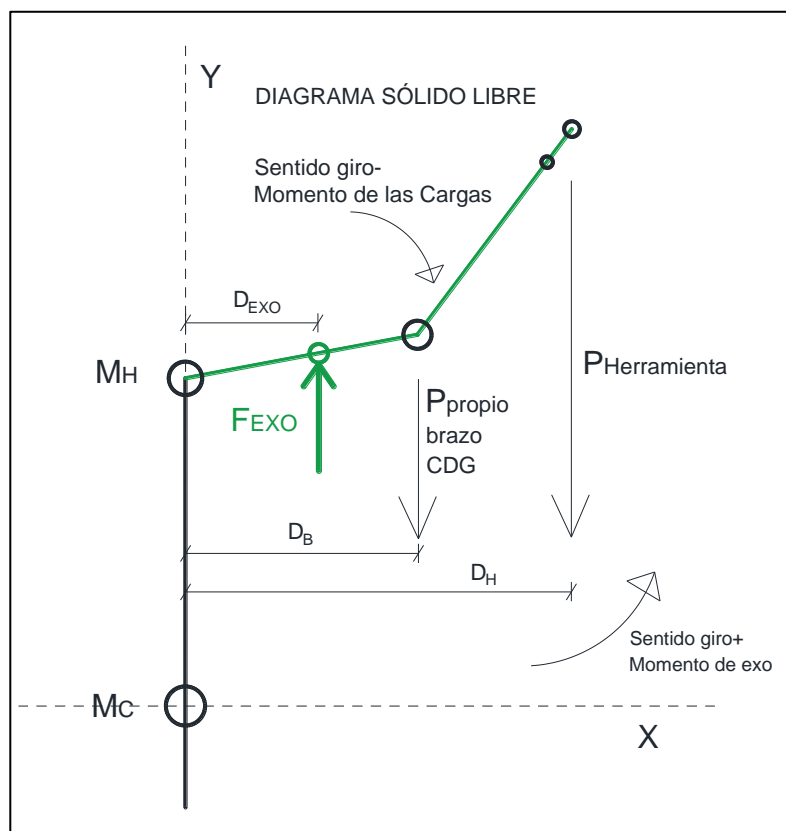


Fig. A. SISTEMA SIMPLIFICADO DE FUERZAS ACTUANTES CON RESPECTO AL HOMBRO

En el análisis no se calcula ni se tienen en cuenta los ángulos por simplificación

El esquema de la fig. A representa el diagrama de sólido libre del sistema de fuerzas actuantes en el trabajador, portando el exoesqueleto. Se estudia aquí el momento de fuerza creado en el hombro (M_H) provocado por la tarea. La línea verde es el brazo. Por un lado, vemos todas las fuerzas existentes en el eje y tanto por el peso de la herramienta (2kg aprox.) como la del peso propio del brazo (5 kg aprox.) estas fuerzas hacen girar el sistema sobre el hombro en sentido horario en base a las distancias al mismo (D), creando el momento en el hombro (M_H). Este momento debe ser contrarrestado con un momento en sentido inverso por los músculos del hombro para mantener el equilibrio estático y poder realizar la tarea a esa altura. Con el uso del exoesqueleto, se pretende que este haga una fuerza en el punto F_{exo} , en sentido

ascendente de forma que sustituya a las fuerzas ejercidas por el hombro para elevar el peso. Con ello se eleva el brazo y contrarresta las fuerzas P. La intención es sustituir a los músculos, eliminando o disminuyendo la actividad muscular necesaria para realizar el trabajo. (nota: En base a los datos conocidos de cargas P, y distancias D, a la hora de diseñar el EE se puede hallar una aproximación de la fuerza necesaria por el EE en el punto F, y, en consecuencia, estudiar las tensiones y tipos de resortes necesarios para conseguir la fuerza necesaria en ese punto F.)

En el momento que se realiza la tarea a una altura determinada, se da el equilibrio estático. Atendiendo a las ecuaciones de equilibrio las fuerzas y los momentos en el hombro serían: $\sum \mathbf{M}_H = \mathbf{0}$; y las fuerzas en el sistema $\sum \mathbf{F} = \mathbf{0}$

Siendo los momentos en el hombro según el sentido de giro $M=F*d$, y dado que hay varias fuerzas:

$$M_H = \sum F_i * d_i$$

En esta situación, se presentan dos casos posibles en cuanto a funcionamiento mecánico.

Caso A, Equilibrio por el exoesqueleto (El EE hace toda la fuerza necesaria. Los músculos del trabajador no realizarían fuerza), (caso ideal)

$$M_{H \text{ cargas}} = M_{H \text{ empuje del EE}}$$

La fuerza ejercida **SOLO** por el EE es tal que contrarresta e iguala el momento producido por todas las fuerzas P. El sistema se encuentra en equilibrio. El brazo y las cargas reposan totalmente en el apoyo del EE sin ejercer fuerza alguna. Los

músculos del trabajador no realizarían fuerza para aguantar la herramienta durante la tarea (caso ideal).

Caso B, No Equilibrio, los músculos deben contribuir

$$M_H \text{ cargas} > M_H \text{ empuje de EE}$$

Calibrar el EE para obtener un equilibrio por sí solo para soportar las cargas puede resultar complejo pues se desconoce de forma exacta las cargas para cada caso. En este caso B que se plantea, el EE estaría realizando menos fuerza de la necesaria (F_{exo}) para soportar todas las cargas, no existiendo el equilibrio por sí mismo. Por lo que el exoesqueleto por sí solo no es capaz de sostener las cargas P. Para suplir esa falta de fuerza y llegar al equilibrio estático (es decir, sostener las cargas en un punto) **debe contribuir parcialmente el sistema muscular** del trabajador. Por lo que, en este caso, habría un aporte de fuerza (actividad muscular) por parte del trabajador, aunque sea de forma parcial. Este sería el caso general que se da en la realidad. Además. Debemos tener en cuenta que el trabajador, además, debe hacer cierta fuerza para elevar cada vez al punto los brazos, así como descender, por lo que la actividad muscular estaría siempre presente.

El caso A, aunque sería el ideal, es difícil de calcular en los resortes, pues las cargas pueden ser variables. Además, no sería recomendable, puesto que, si toda la fuerza la realiza el EE, significa que ofrece toda la tensión necesaria para mantener los brazos en alto. En este caso, si el trabajador necesita bajar los brazos, moverlos, etc., debería hacer gran esfuerzo hacia abajo, invirtiendo los grupos musculares, para vencer los resortes del EE que empujan en demasía hacia arriba. En este sentido, en este tipo de EE, nos movemos en un segmento de fuerzas actuantes de difícil cuantificación. En los siguientes gráficos podemos observar los escenarios posibles.

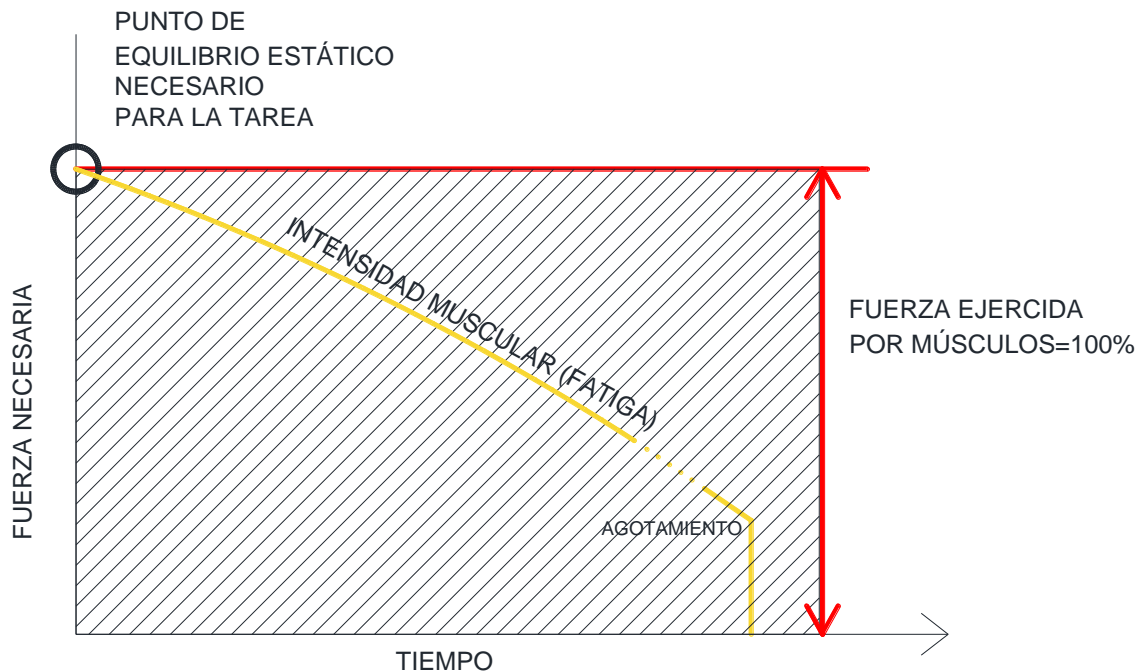


Fig. A1. ESCENARIO SIN EE

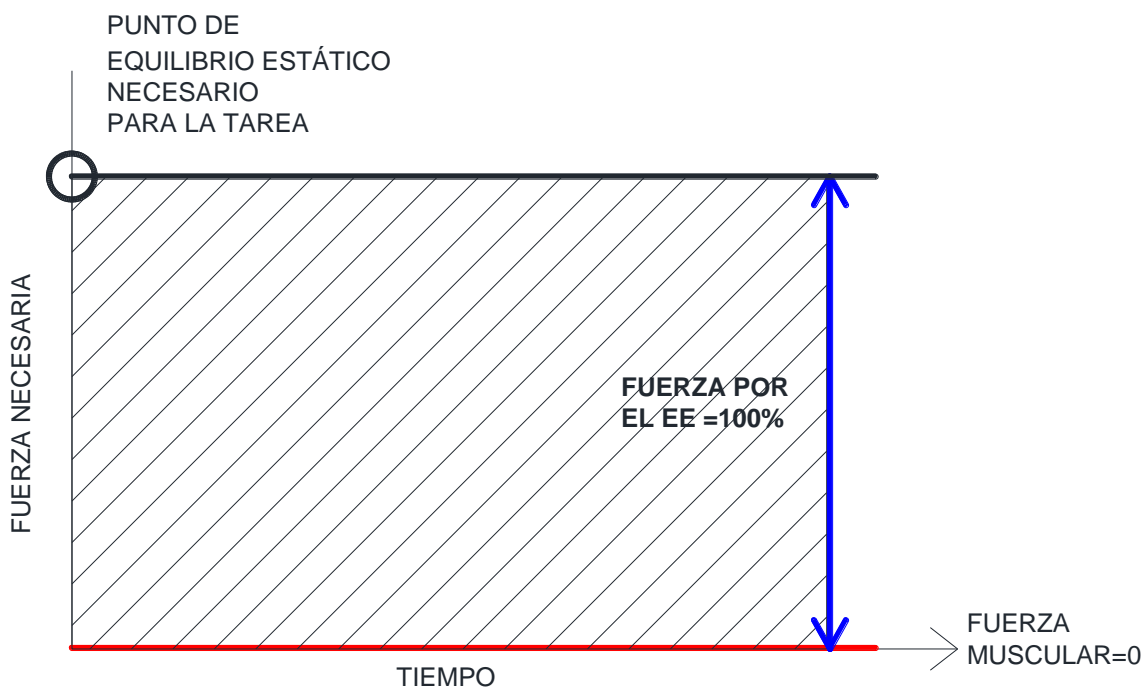


Fig. A2. CASO A. USO DE EE: Aporta toda la fuerza. (ESCENARIO IDEAL E IMPOSIBLE)

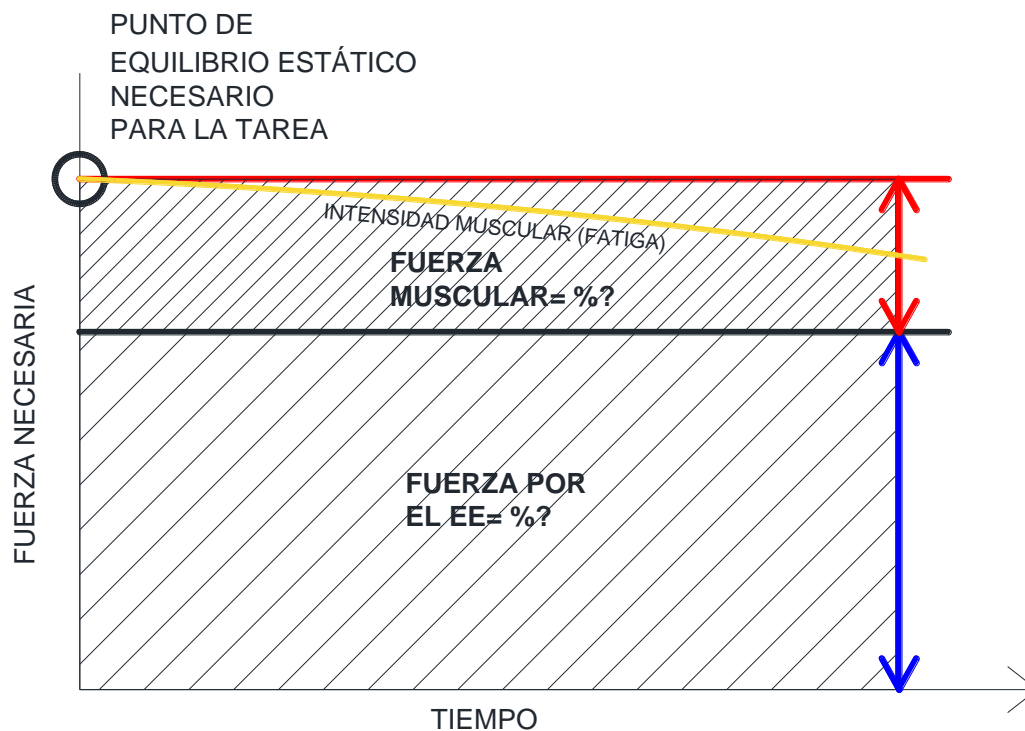


Fig. A3. **CASO B. USO DE EE:** aporta fuerza parcial. Resto de fuerza es ejercida por los músculos. (ESCENARIO REAL)

El escenario B, (fig. A3) sin ser totalmente eficiente ni deseable, es recomendable, pues se reduce la actividad muscular y por tanto la fatiga se retrasa en el tiempo. Por otro lado, y dado que es un sistema en movimiento y con otras variables, es difícil conocer de forma exacta el aporte de fuerzas de cada uno: EE y músculos.

En base a este análisis, y dentro de esta hipótesis de estudio, el usar el EE, siempre reduciría el esfuerzo necesario del trabajador, que, si no se usara el exoesqueleto, siendo en este sentido positivo.

En resumen, la fuerza necesaria de cálculo ideal de EE debe estar calculada y calibrada (en base a las distancias y medidas antropométricas), para obtener el equilibrio o estar cerca de él, siempre sin superar el momento creado por las cargas, pues sino se tendería a ejercer demasiada fuerza hacia arriba y se crearía una necesidad inversa: el trabajador debería empujar hacia abajo con el brazo, escenario que no se debe producir.

A la hora del diseño y la fabricación se puede hacer un cálculo de la energía necesaria que precisarían los muelles sabiendo los parámetros conocidos: pesos y distancias ergonómicas.

6.4.2. MOMENTO DEL SISTEMA COMPLETO SOBRE EL LUMBAR/CADERA

Se dan otras fuerzas que debemos tener en cuenta. Como vemos en la fig. B, el conjunto de EE, junto con el brazo y las cargas sostenidas, crean una resultante de fuerzas hacia abajo a una distancia D , fuera del centro de gravedad del tronco, lo que provoca un momento, que se debe contrarrestar. Esto puede crear un momento en la zona lumbar y articulación de la cadera. Esto es importante porque, aunque se use el exoesqueleto y el hombro se vea favorecido, es posible que los músculos lumbares deban estar en continua tensión actuando para compensar este momento y obtener el equilibrio. Además, este análisis observaría también una fuerza axial de compresión en los discos de la espina dorsal, provocado por todas las cargas R (peso propio del brazo, peso herramientas, peso propio del exoesqueleto que puede ser de unos 4-5 kg).

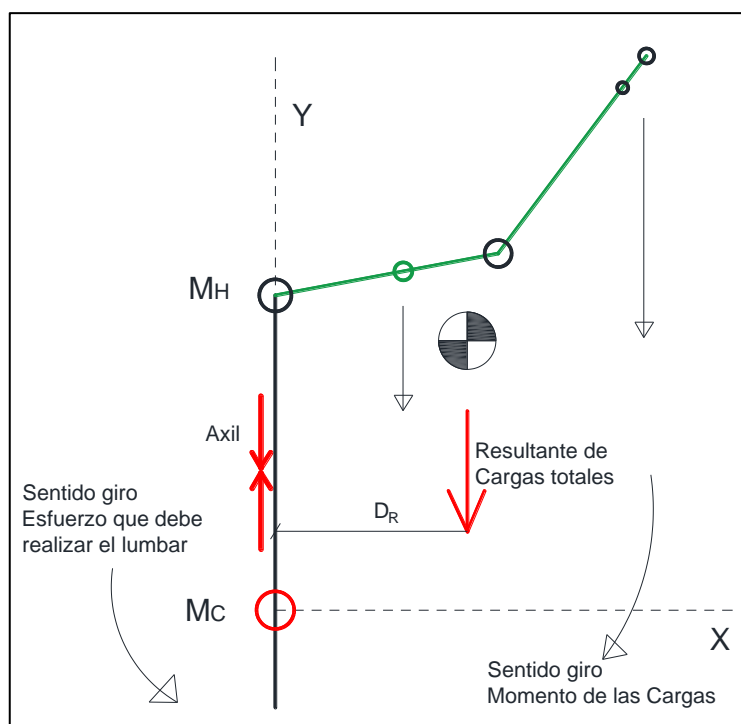


Fig. B. SISTEMA DE FUERZAS ACTUANTES QUE PUEDEN REPERCUTIR AL LUMBAR

En la fig. B.2 podemos apreciarlo mejor

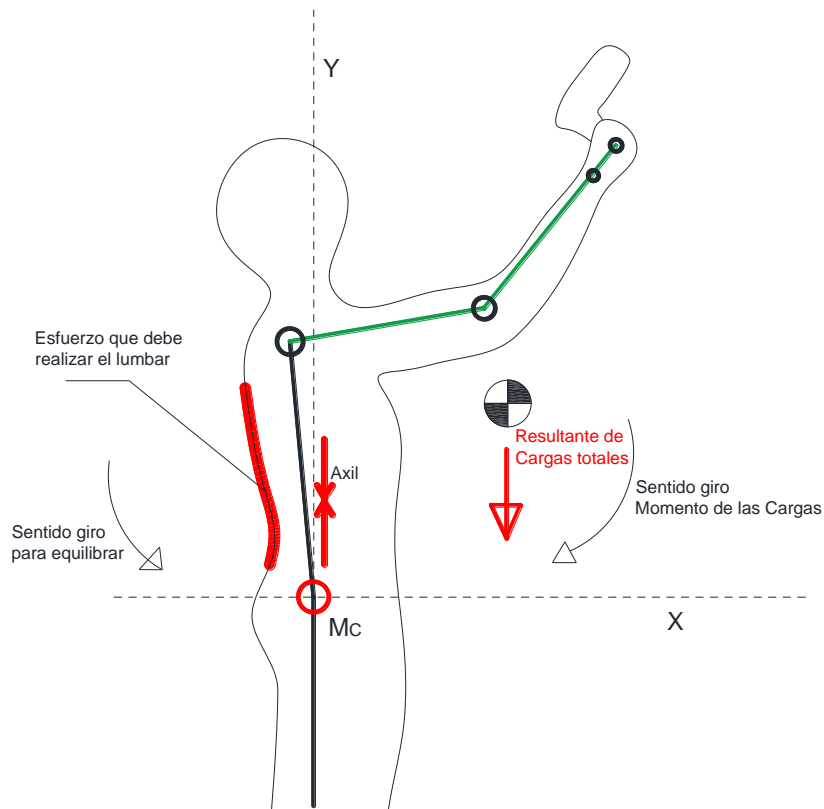


Fig. B.2. FLEXIÓN Y COMPRESIÓN LUMBAR CREADO POR EL MOMENTO.
Los músculos lumbares deben compensar el momento de vuelco

Fig. B.2. CDG de cargas que ejercen un momento sobre la cadera, además de una posible compresión axil en los discos por las cargas. Durante la tarea, además, los músculos de la espalda pueden encontrarse activos para contrarrestar el momento producido de giro hacia delante.

6.4.3. VALORACIÓN DE POSIBLES ZONAS DE PRESIONES EN EL CUERPO

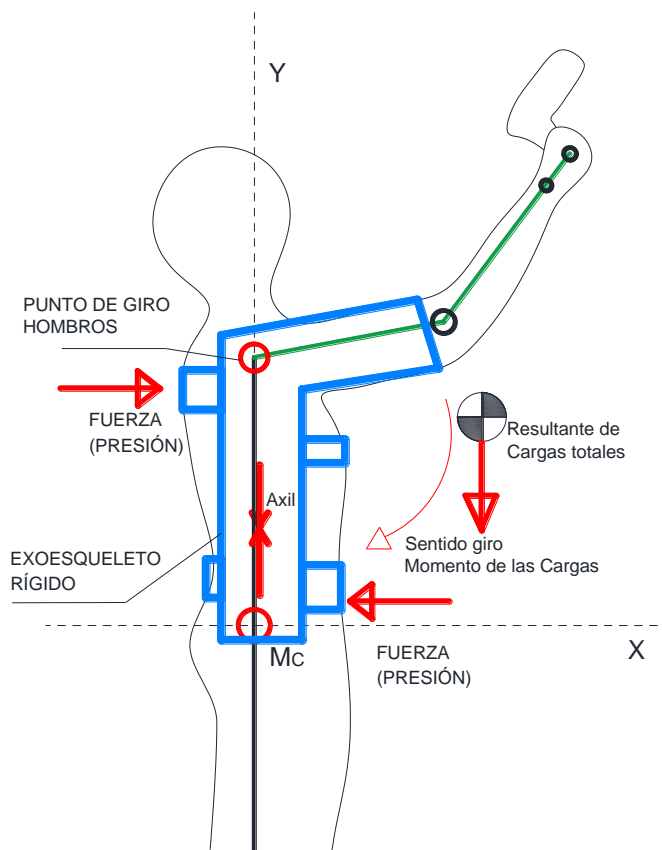


Fig. C. ZONAS DE POSIBLES PRESIONES (ACCIONES Y REACCIONES)

Continuando con el mismo sistema planteado anteriormente, en la fig. C se ha querido contemplar el sistema sólido teórico en azul. El sistema está en equilibrio donde apreciamos el centro de gravedad del conjunto. Esta resultante ejerce el momento explicado anteriormente (en sentido horario) con respecto a la cintura/cadera. En este gráfico se puede aproximar y anticipar, las zonas de posibles presiones (y reacciones): en la zona frontal de la cintura y en la parte trasera de los hombros en la espalda.

En la fabricación de un exoesqueleto y puesta en marcha se deben tener en cuenta las siguientes variables en el proceso:

- movimientos del trabajador en la tarea y fuerzas que emplea en la misma.
(necesidades efectivas)
- medidas antropométricas del trabajador
- diseñar el exoesqueleto
- pruebas efectivas en el trabajador
- seguimiento y retroalimentación para mejoras constantes del sistema.

7. VALORACIÓN. VENTAJAS E INCONVENIENTES

El principal objetivo del uso de los exoesqueletos es sin duda prevenir los TME. En este sentido, la pregunta clave que debemos hacernos es si efectivamente así es. Dado que están siendo unas tecnologías relativamente recientes en su uso en el entorno laboral, las ventajas y limitaciones que conllevan se encuentran en continuo y creciente estudio.

Es una disciplina que abarca muchos campos de conocimiento, entre otras la biomecánica, análisis computacional, comportamiento y desempeño de la musculatura humana, conjunto de variables que junto a una tecnología de reciente implantación, hace compleja la cuantificación y obtención de resultados concretos, siendo un campo difuso e intangible, por lo que parte de los resultados hasta la fecha se basan en criterios y evaluaciones semi-cualitativas y que no abarcan todo el espectro de variables necesarios.

Todo ello hace complejo responder y determinar esta cuestión de forma fácil, si bien en el presente trabajo se intentará abordar esta cuestión con los datos de que se disponen.

La cuestión clave que se intenta abordar en este trabajo es, saber si esa reducción de la actividad (menor uso muscular), ¿conlleva a una disminución de los TME? y, de ser así, nos quedaría una segunda cuestión a abordar ¿el uso del dispositivo puede crear otro tipo de riesgos?

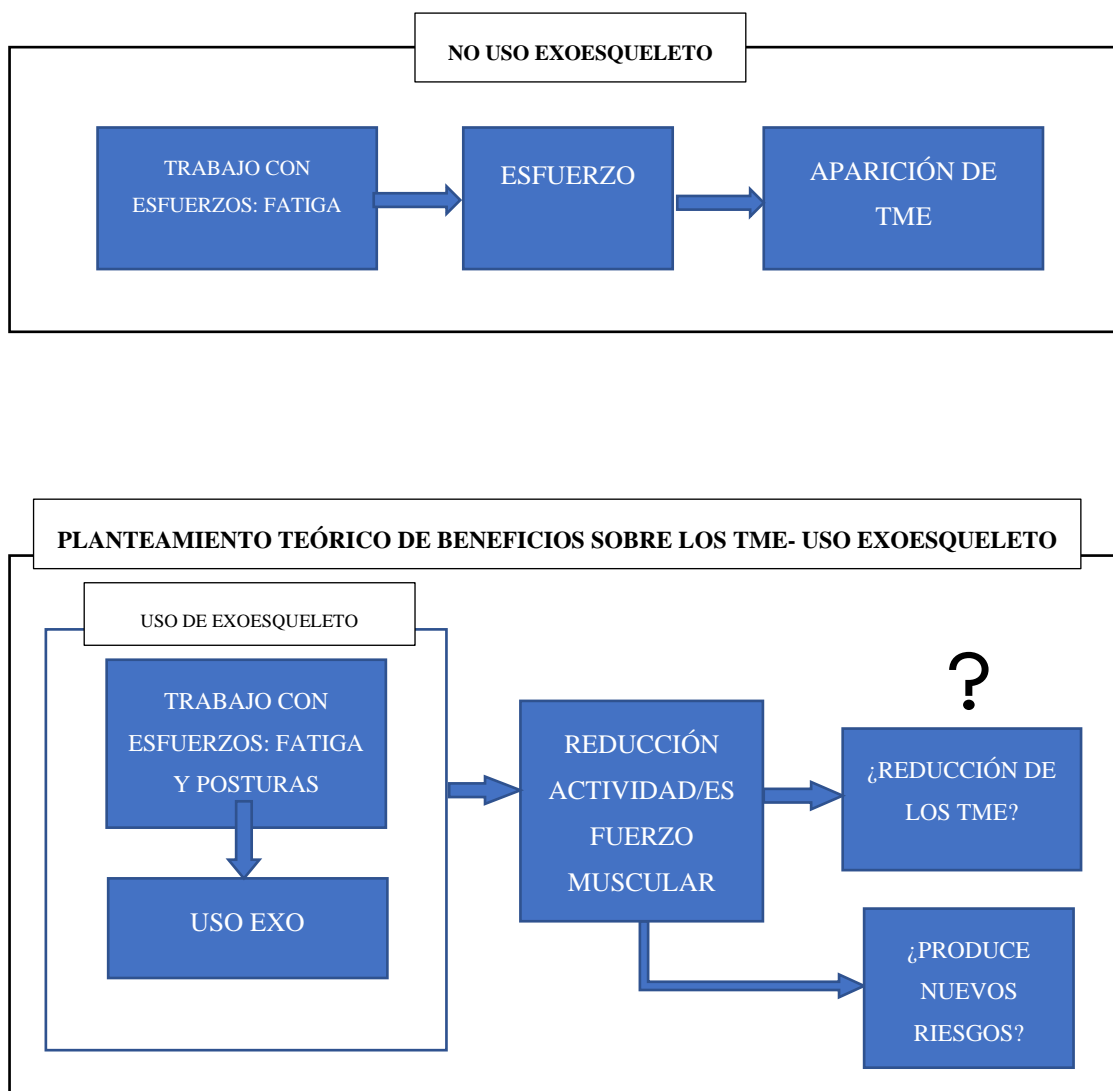


Fig. 37. Teoría del objetivo del EE.
Fuente: elaboración propia

Los estudios realizados sobre los EE ergonómicos en la última década intentan dar luz a esta pregunta.

7.1. ESTUDIOS RELACIONADOS

Diversos estudios han investigado la existencia de la asociación entre el uso de los EE y la reducción efectiva de los TME. Gran parte de estos estudios hace uso de la EMG para demostrar sus resultados. Lo que hacen es comparar las diferencias en la actividad en los músculos de un trabajador cuando se hace la tarea sin EE, y midiendo y comparando dicha actividad cuando sí usa el EE, ambos bajo las mismas condiciones, tiempos y tareas (Michiel P. de Looze , et al., 2015).

De los estudios, se deduce la base teórica en que se asientan: si desciende la actividad muscular en el trabajador, el cuerpo “sufre menos” y se reducirán los TME a largo plazo.

De forma general, los resultados de dichos estudios muestran que el exoesqueleto sí contribuye de forma efectiva a reducir la actividad muscular en el trabajador. Estos estudios se están realizando más en los últimos años, donde se aprecia igualmente un uso emergente por parte de las empresas y una mayor aceptación.

En 2014 se evaluó el potencial de un brazo mecánico junto a un chaleco exoesquelético para trabajos por encima de la cabeza. Doce participantes completaron 10 minutos de trabajo intermitente simulado. Se obtuvieron datos sobre la incomodidad percibida (RPD) y electromiografía (EMG) para la parte superior de los brazos, los hombros y la zona lumbar. Disminuyendo la actividad muscular, pero notando cierta incomodidad en el uso (Rashed, Kim; Nussbaum, Agnew, 2014).

De forma similar fueron comparados 3 tipos de exoesqueletos para ver la variación de actividad muscular y sacar conclusiones sobre las ventajas, usando también el EMG. Los exoesqueletos específicos fueron el FORTIS de Lockheed-Martin), un

exoesqueleto de cuerpo completo que transfiere cargas de herramientas al suelo; el ShoulderX de SuitX, un chaleco para la parte superior del cuerpo que sostiene los brazos; y un chaleco exoesquelético el Fawcett ExoVest (The Tiffen Company), unido al brazo mecánico zeroG (Equipois Inc., Manchester) que sostiene una herramienta y transfiere cargas a la cadera /cintura. Las conclusiones del estudio es que tuvieron efectos mixtos sobre la carga muscular y la incomodidad percibida (Saad Alabdulkarim y Nussbaum, 2019).

Se evaluó el efecto potencial de estos exoesqueletos en la reducción de la carga física en el cuerpo con 13 exoesqueletos, se evaluó el efecto sobre la carga física, principalmente en términos de actividad muscular (EMG). Todos los exoesqueletos pasivos usados tenían como objetivo apoyar la zona lumbar. Se ha informado de reducciones del diez al cuarenta por ciento en la actividad de los músculos de la espalda durante el levantamiento dinámico y la sujeción estática (Michiel P. de Looze et al., 2015).

Sobre esa misma línea de investigación otros estudios analizaron también el comportamiento de la fatiga en tareas con los brazos elevados y haciendo uso de exoesqueletos pasivos. De igual forma se estableció una reducción de la actividad muscular según análisis mediante EMG muy significativa en los hombros, concretamente en el músculo deltoides, siendo menos en los brazos (Aurélie Moyon, et al., 2019) y (Gillette y Stephenson, 2018).

Aquí se muestran algunos de los datos arrojados en cuanto a EMG de algunos de dichos estudios (fig. 38, 39, 40)

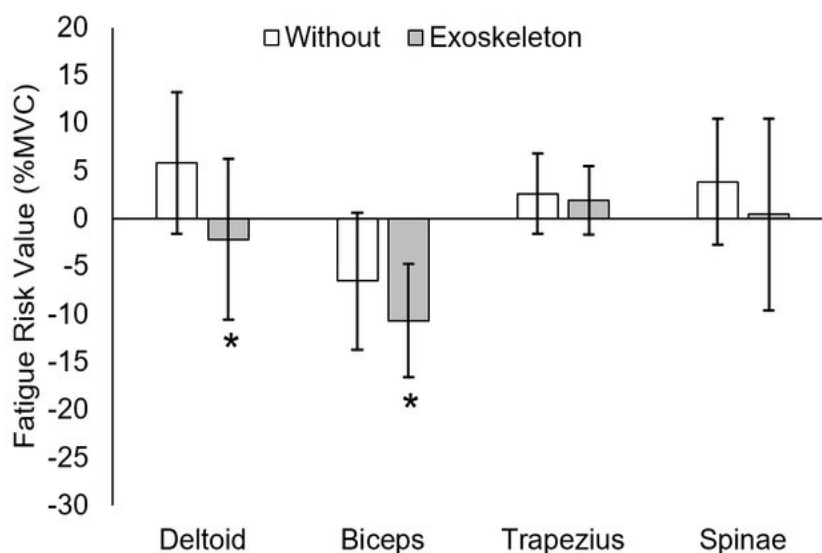


Fig. 38. Resultados EMG. Fuente: Mitchell L. Stephenson (2018)

(%MVIC)	Maximum 10% EMG Amplitude				Maximum 50% EMG Amplitude			
	Deltoid	Biceps	Trap	Spinae	Deltoid	Biceps	Trap	Spinae
Without	31.8±8.2	14.9±4.2	28.0±12.9	26.0±9.5	16.6±6.9	8.3±2.6	17.8±9.3	16.8±6.3
Exoskeleton	25.4±6.4*	13.5±3.9*	30.8±13.9	21.9±6.6*	12.2±3.3*	7.3±2.5*	18.7±9.0	14.5±4.4*

*indicates significantly reduced EMG amplitude when wearing the exoskeleton (p < 0.03)

Fig. 39. Contracciones voluntarias máximas isométricas (MVC). Fuente: (Gillette y Stephenson, 2018)

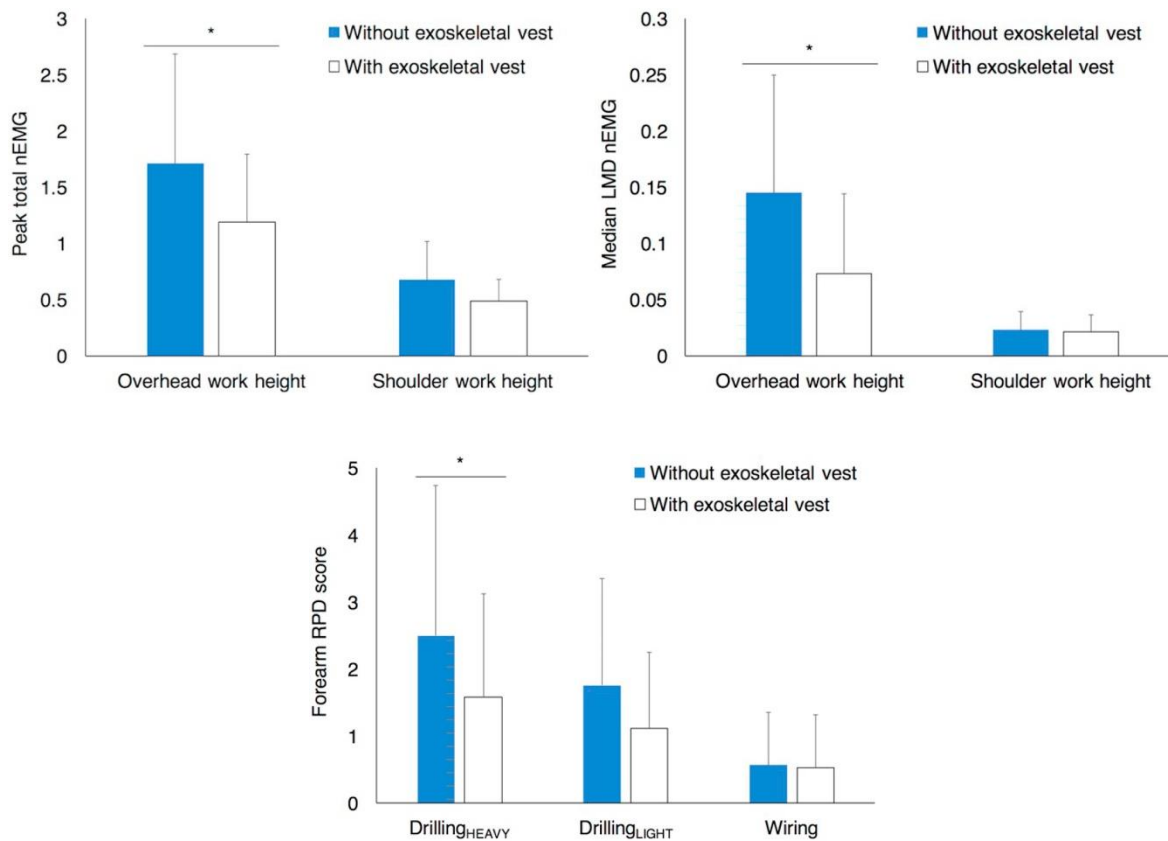


Fig. 40. Resultados EMG. Fuente: Sunwook Kim, Maury A. Nussbaum 2018

Bajada de la actividad muscular al usar el exoesqueleto.

7.2. ESTUDIO EN LA CADENA DE MONTAJE DE FORD

Uno de los estudios recientes, y que tiene estrecha relación con el ejemplo práctico analizado en el presente trabajo, fue precisamente elaborado en la empresa Ford de Valencia en el año 2018 por el Instituto de Biomecánica de la Universidad Politécnica de València. Se hizo uso del EE para trabajos con brazos elevados por encima de la cabeza para realizar tareas de montaje en la cadena de fabricación de los vehículos, donde actualmente usan ese tipo de EE en la planta de fabricación como vimos anteriormente. Se hicieron las mediciones mediante EMG como en los casos anteriores.

Se usaron electrodos superficiales de la marca comercial estadounidense Noraxon, modelo “Noraxon Ultium EMG” (fig. 41).

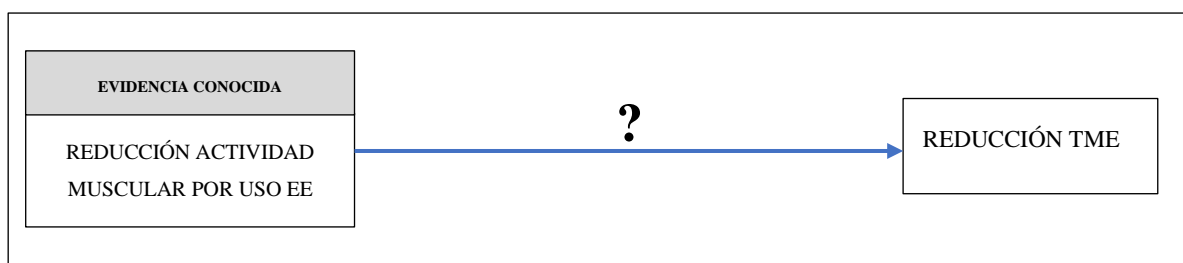


Fig. 41. Sensores de medida biomecánica usados “Noraxon Ultium EMG”. Fuente: noraxon

Se usó una muestra de 12 trabajadores. Previamente se evaluó con diversos métodos a los trabajadores para asegurarse de que no tenían lesión previa alguna, ni discapacidad y era ideales para el estudio. Los operadores previo entrenamiento con el EE, (colocación, uso, etc.) realizaron ciclos continuos de trabajo reales en la planta de montaje de Ford, consistente en el montaje de la carrocería del automóvil en la parte inferior del automóvil haciendo uso de destornilladores neumáticos. Se tomaron mediciones EMG de deltoides, trapecio, y espina dorsal, por un lado, y se hizo un estudio ergonómico por otro, haciéndose mediciones de los ángulos articulares y de la amplitud de movimientos de las articulaciones del cuello, la espalda y los brazos. Todas las mediciones se realizaron durante sesiones con 6 trabajadores con EE y otros 6 sin él. Los seis operadores llevaron el dispositivo 12 h de media. Los resultados principales mostraron reducciones del 34% y el 18% de las actividades musculares deltoides y trapecio, respectivamente, lo que se deduce que a su vez podría conducir a una reducción de la fatiga (Sofía Iranzo, et al., 2018).

Como vemos, todos estos estudios realizados con EMG tienen un denominador común en sus resultados y es que efectivamente hay evidencia de que reducen la actividad muscular de forma significativa en los miembros cuando se usa el exoesqueleto. Pero debemos tener en cuenta que estos estudios, sin embargo, también sugieren la necesidad de una investigación más sistemática sobre el impacto del uso de exoesqueletos en la seguridad y salud de los trabajadores que puedan generar otro tipo de riesgos, no evaluados en dichos estudios, que pueden ofrecer una contraindicación negativa a los efectos positivos dados con su uso, y de los cuales todavía se desconocen, para promover el uso totalmente seguro de esta tecnología.

En este sentido, debemos hacernos la pregunta, de si esta demostrada reducción de la actividad muscular, tiene como consecuencia la reducción de los TME.



Responder a esta pregunta a día de hoy, por tanto, parece ser pronto, puede que ese único factor de poder reducir la actividad muscular no sea determinante para la total disminución de los TME, pues entre el camino, se quedan variables a estudio, que se intentan estudiar a día de hoy. ¿el peso del equipo perjudica a la larga? ¿Qué tal de cómodo es en su uso durante 7h diarias durante 1 mes entero de trabajo? ¿deja señales, marcas o afecta a la piel por la presión o rozaduras? ¿puede conllevar problemas en otros grupos muscular, ligamentos, huesos...? ¿Limita movimientos que pueden ser perjudiciales a nivel ergonómico y biomecánico? ¿influye en el trabajador el tener que usarlo, ponerlo y quitarlo de forma diaria, en forma de algún tipo de riesgo psicosocial?...

En la mayoría de las respuestas a estas cuestiones se resuelven en los estudios con la retroalimentación y feedback con los trabajadores, (Abisola Omoniyi, 2020), pero aquí hay un grado de subjetividad de incertidumbre que no puede resultar aceptable en la metodología científica para sacar conclusiones determinantes. Podemos registrar una opinión, si es satisfactoria o no, si se siente positiva, o si “notan” mejoría en el trabajo, pero esto puede ser subjetivo o estar condicionado por otros factores

influyentes, siendo una metodología cualitativa y llevar a riesgos imperceptibles que pueden manifestarse a posteriori.

En este sentido, algunos estudios incluyen e intentan abordar y encontrar respuestas a estas preguntas considerando el parámetro RPD (*ratings of perceived discomfort*) evaluando *la incomodidad percibida*, y encontrando evidencias de incomodidades en su uso, así como la bajada en rendimiento y errores al efectuar ciertas tareas con el EE. Además, intentan evaluar otras situaciones que se pueden dar en el uso de exoesqueleto más allá de aportar un momento de fuerza en los brazos, como limitación en el rango de movimientos, tener que ponerse y quitarse en chaleco, riesgos en caso de tropiezos y caídas, encontrando algunas limitaciones y problemas en estas variables (Sunwook Kim, Ehsan Rashedi, 2018).

Por tanto, los estudios pretenden alcanzar datos objetivos de conocer si se eliminan o reduce los trastornos musculoesqueléticos TME, pero quedan, de momento, esas incógnitas por el camino que a día de hoy parece difícil estudiar y responder con determinación.

7.3. RIESGOS EMERGENTES

Con el contexto anterior sobre la mesa, debemos ser conscientes y prudentes con estos y otros posibles riesgos generados por el uso de exoesqueleto. Podemos decir que, con la tecnología de nueva creación, como son los exoesqueletos, como consecuencia de esta relativa novedad y nuevo uso, se pueden dar nuevos riesgos emergentes (NER) (F. Brocal, M.A. Sebastián, 2015a). Como se dijo anteriormente, se trata de una tecnología reciente, cuya implantación y uso crece con fuerza en los últimos años. La tecnología es nueva y se desconocen los efectos a largo plazo de los exoesqueletos sobre los parámetros fisiológicos, psicosociales y biomecánicos, y podríamos estar en un riesgo alto. Los estudios existentes sobre su impacto en el cuerpo más allá de la evidencia de contribuir a disminuir el esfuerzo necesario por parte del operario, son relativamente nuevos. Un reflejo de ello lo podemos contemplar de forma estadística en la literatura científica existente (fig. 42): se ha buscado con las palabras clave el campo de estos estudios sobre exoesqueletos, y podemos apreciar por el resultado arrojado de dicha búsqueda y con respecto a los años de publicación, cómo han aumentado en número los estudios en los últimos años, habiendo sido escasos en fechas anteriores a 2011 (F. Brocal, N. et al., 2021), (imagen: Web of Science).

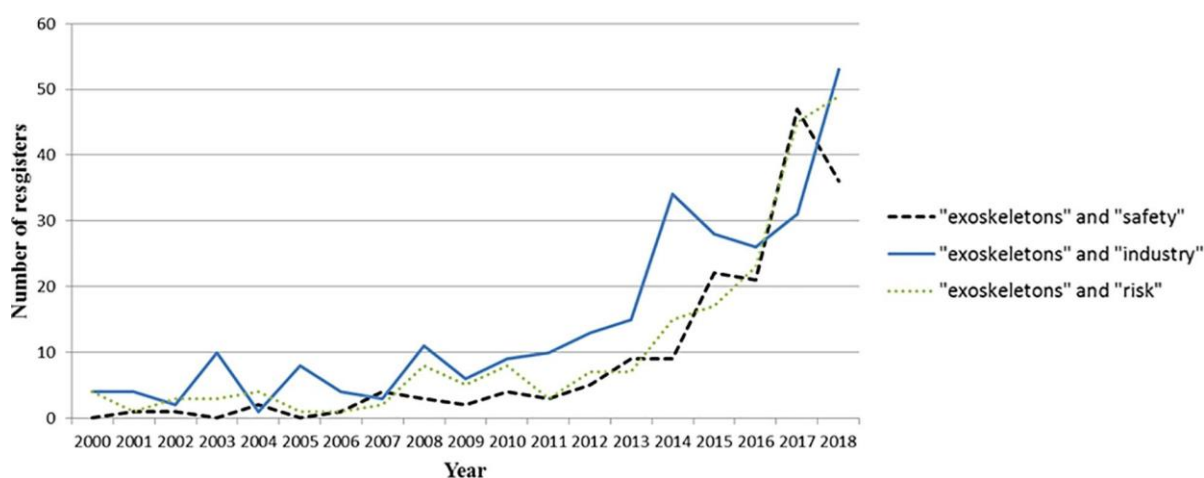


Fig. 42. Resultados de búsqueda científica de EE. (F. Brocal, N. et al., 2021)

Podemos decir que esta nueva tecnología lleva implícita un riesgo nuevo y emergente, y se generan dudas, (de momento inalcanzables, hasta que avancen los estudios y el conocimiento), de si esta tecnología reduce los TME, así como que no genera otros riesgos. Esta nueva tecnología está estrechamente relacionado con el grado de incertidumbre que varía en función del tiempo. Es decir, ante una nueva tecnología, la incertidumbre es alta, pues se desconocen los posibles riesgos que puede generar. Conforme avanzan los estudios y el grado de conocimiento de la tecnología, la incertidumbre desciende, pues ya hemos alcanzado el nivel de conocimiento sobre los riesgos a que nos estamos enfrentando y de esta forma, poder tomar las medidas o soluciones preventivas oportunas (fig. 43).

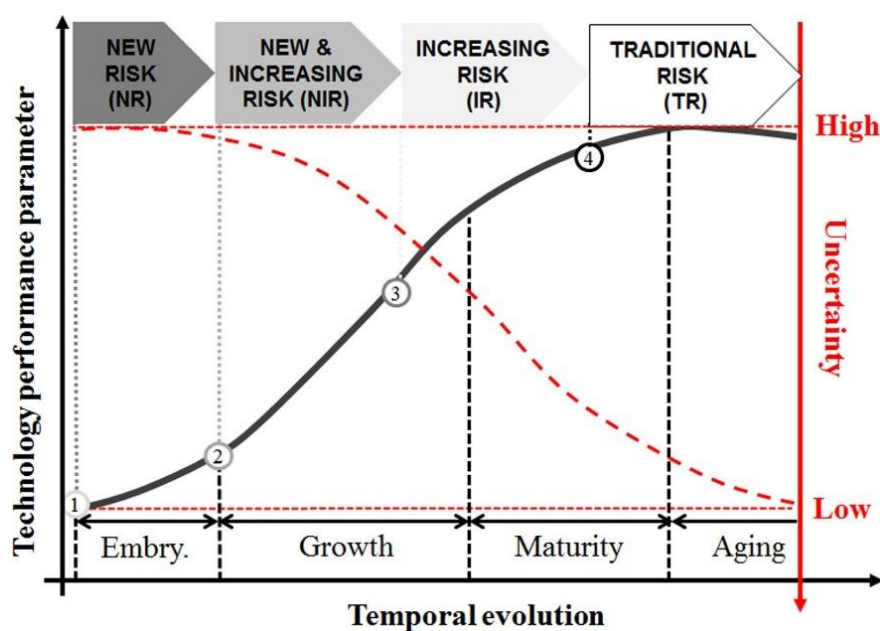


Fig. 43. Fases evolutivas del riesgo emergente y la incertidumbre (Brocal et al., 2019^a, adaptado de Brocal et al., 2017).

Desde otra perspectiva de análisis en base a los estudios analizados en el presente trabajo, podemos valorar las fortalezas que podemos encontrar con su uso:

- Implicación de menos esfuerzo para realizar las tareas (disminución de actividad muscular)
- Por consiguiente, habría una disminución de los TME
- Podría aumentar la productividad

Las limitaciones incluyen parámetros que se han podido registrar en algunos estudios pero que no son debidamente determinantes y otros que quedan fuera del alcance de los mismos. Todo ello sería objeto de futuras investigaciones con las técnicas adecuadas:

- ¿Daños a largo plazo por limitación de movimientos?
- ¿Lesiones por hacer uso de otros grupos musculares distintos al usar/portar el exoesqueleto?
- ¿Presiones y molestias en zonas corporales?
- ¿Portar un equipo relativamente pesado y molesto?
- ¿Incomodidad general?
- ¿Calor?
- ¿Señales, marcas, reacciones cutáneas?
- ¿Riesgo psicosocial (¿aceptar ponérselo y quitárselo en cada jornada, síndrome de burnout?)
- ¿Sobrecarga en espalda baja?

Para poder obtener respuesta a estas dudas, muchos estudios y procesos incluyen, de momento, análisis puramente cualitativos:

- Método observacional
- Entrevistas a los trabajadores
- Continua retroalimentación con los trabajadores con objetivos a largo plazo

8. CONCLUSIONES

El principal objetivo de este trabajo es realizar una revisión que aborde el funcionamiento básico y los tipos de exoesqueletos más importantes en la actualidad y recoger las evidencias en cuanto a si pueden reducir los trastornos musculoesqueléticos en base a la literatura científica existente.

El mercado de los EE está creciendo en todos los sectores, y cada vez son más las empresas que los desarrollan.

Centrándonos en el campo de los EE para ergonomía, cada vez hay más demanda y más empresas que apuestan por el uso de estas tecnologías para prevenir lesiones en sus trabajadores. Los datos arrojan y prevén un crecimiento exponencial a corto-medio plazo.

La cuestión principal que nos ocupa es si realmente pueden reducir los TME. La mayoría de estudios evidencian efectivamente una reducción de la actividad muscular y de forma general resuelven que su uso da resultados positivos al trabajador.

Hasta donde se ha llegado en el presente trabajo, todavía parece no estar claro si al margen de ese factor positivo, el EE puede conllevar otras lesiones al portador a largo plazo puesto que no hay estudios que así lo aseguren de forma determinante, dejando ese margen de duda. Es una tecnología compleja donde se precisa emular mecánicamente el movimiento natural del cuerpo humano. El cuerpo humano tiene unas características únicas y especiales en cuanto a biomecánica, libertad de movimiento, giros, articulaciones, y comportamiento general. Esto puede ser difícil de emular por un sistema mecánico externo para que actúe de forma totalmente integrada y conjunta al sistema orgánico del cuerpo, de forma que se tenga la certeza de que no va a perjudicar desde un punto de vista biomecánico a los músculos y articulaciones de sus usuarios, ya sea limitando movimientos y/o ejerciendo otras fuerzas no deseadas en otras zonas o músculos, presiones, molestias, reacciones a largo plazo, que no provoque otros daños, un cansancio adicional, riesgos psicológicos, etc... Además, se añade el factor de que cada persona es distinta antropométrica y físicamente.

A esta incertidumbre general se une el factor de que cada vez son más los modelos y tipos disponibles en el mercado, y con ello la diversidad de funcionamientos y de sistemas mecánicos, con lo que hace más complejo si cabe una valoración científica fiable de cada uno de ellos y que no suponga riesgo para cada trabajador en particular, con sus propiedades ergonómicas y antropométricas propias, debiéndonos fiar más que de lo propuesto por las propias empresas desarrolladoras.

Además, de momento, no existe un marco legislativo específico que regule esta materia. Tampoco por tanto y con la falta de posibilidad de estudios más avanzados, se puede obligar a las empresas a realizar ensayos y análisis más cuantitativos que aporten resultados fiables y que puedan certificar de forma clara su uso seguro en la población a largo plazo.

Para que el uso de exoesqueleto sea pertinente, los aportes reales positivos deben superar ampliamente a los negativos, los cuales deberían ser eliminados completamente, si cabe. Dadas las limitaciones de estudios, no se puede valorar del todo si estos factores son aceptables dentro de los parámetros seguros en el marco de seguridad y salud en los trabajadores.

En cualquier caso y dentro de esta incertidumbre, los fabricantes y empresas, parece haber convenido en sus ventajas positivas fomentando su utilización, pero merece reflexionar hasta qué punto y a falta de esas evidencias claras, si esta decisión puede ser perjudicial a largo plazo para los trabajadores y atendiendo a la diversidad emergente de modelos disponibles.

En relación a esta incertidumbre, cabe considerar otra cuestión, y es que las empresas, ante una evaluación de riesgos y toma de medidas preventivas, antes de tomar la decisión de su uso de un EE, y de conformidad con la Directiva marco (89/391/CEE) y con lo dispuesto en la LPRL, debe actuar primero en reducir los riesgos en parámetros ergonómicos, de rediseño del lugar de trabajo, y tenerse en cuenta aspectos organizativos como la reorganización de los procesos, todo ello para eliminar, minimizar los riesgos adaptando el puesto al trabajador. En definitiva, trabajar primero en otras medidas preventivas antes de tomar la decisión de hacer un uso de una tecnología de la que se desconocen todavía todos los efectos comentados. El uso de los sistemas de EE deberían ser la última opción si no hay más alternativa preventiva y/o ser empleados conjuntamente con estas.

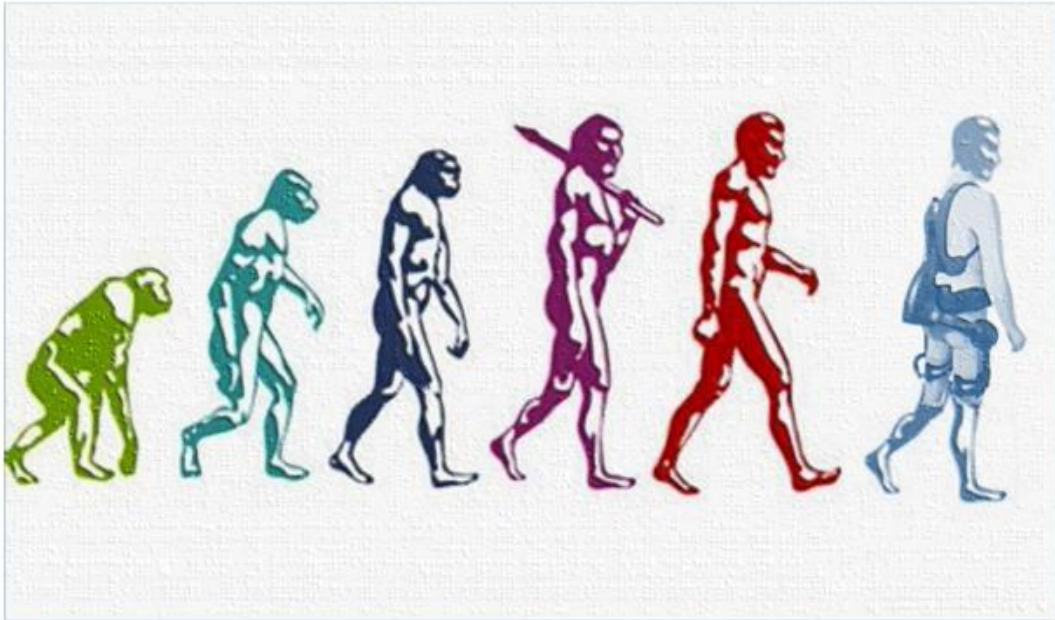
En resumen, parece haber un gran consenso en el uso favorable de los EE y en que estos pueden ser beneficiosos para reducir los TME. Por el contrario, sigue existiendo muchas dudas para saber si esa reducción de actividad muscular evidenciada en los estudios tiene relación directa para reducir los TME. Para ello se debe descartar de forma determinante cualquier limitación o perjuicio derivado que su uso pueda causar de forma adicional otros daños al trabajador a largo plazo.

Con los medios disponibles y el grado de conocimiento no es fácilmente observable ni cuantificable, pero se espera que, con el crecimiento de este mercado, y el aumento de nuevas técnicas de estudio más avanzadas sea posible determinar de manera más concreta el impacto de su uso a largo plazo.

Por otro lado, todavía no existe una regulación normativa al respecto, pero se espera que terminará por regularse de alguna forma y esto puede ser positivo para la toma de decisiones futuras por parte de los propios fabricantes, administraciones y para impulsar la realización de nuevos estudios y ensayos más novedosos.

Es importante que las empresas fabricantes, las empresas de uso final, así como el personal técnico de prevención, sean conscientes de estas limitaciones, y tengan claro que antes de decidirse por el uso de EE, velen primero por adoptar otras soluciones ergonómicas, debiendo ser el uso de EE la última decisión cuando han sido agotados las demás medidas preventivas, técnicas y organizacionales.

No cabe duda que la tecnología de los exoesqueletos para potenciar las habilidades humanas y para prevenir los TME irá en una evolución exponencial; nuevos materiales, avances en computación y electrónica, miniaturización, medicina...todo ello mejorará un prometedor sector que no ha hecho más que comenzar...



Bibliografía y referencias

- Abisola Omoniyi; Catherine Trask; Stephan Milosavljevic; Ornwipa Thamsuwan, (2020)
Farmers perceptions of exoskeleton use on farms: Finding the right tool for the work(er),
Percepciones de los agricultores sobre el uso de exoesqueletos en las granjas: encontrar la herramienta adecuada para el trabajador
<https://doi.org/10.1016/j.ergon.2020.103036>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169814120302298>
- Alim Louis Benabid; Thomas Costecalde; Andrey Eliseyev; Guillaume Charvet; Alexandre Verney; Serpil Karakas; Michael Foerster; Aurélien Lambert; Boris Morinière, Neil Abroug, Marie-Caroline Schaeffer, Alexandre Moly, Fabien Sauter-Starace, David Ratel, Cecile Moro, Napoleon Torres-Martinez, Lilia Langar, Manuela Oddoux, Mircea Polosan, Stephane Pezzani, Vincent Auboiroux, Tetiana Aksenova, Corinne Mestais, Stephan Chabardes, (2019).
An exoskeleton controlled by an epidural wireless brain-machine interface in a tetraplegic patient: a proof-of-concept demonstration. *Un exoesqueleto controlado por una interfaz epidural inalámbrica cerebro-máquina en un paciente tetrapléjico: una demostración de prueba de concepto*. The Lancet Neurology,
[https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(19\)30321-7](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(19)30321-7)
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474442219303217>
- Aurélie Moyon; Jean-François Petiot; Emilie Poirson (2019)
Investigating the effects of passive exoskeletons and familiarization protocols on arms-elevated tasks. *Investigando los efectos de los exoesqueletos pasivos y los protocolos de familiarización en tareas con brazos elevados*.
LS2N - Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes - Université de Nantes.
https://www.researchgate.net/publication/342490976_Investigating_the_effects_ofpassive_exoskeletons_andfamiliarization_protocols_on_arms-elevated_tasks
- Ashraf S. Gorgey, Ryan Sumrell, Lance L. Goetz, (2019)
Exoskeletal Assisted Rehabilitation After Spinal Cord Injury, *Rehabilitación exoesquelética asistida después de una lesión de la médula espinal*
Editor(s): Joseph B. Webster, Douglas P. Murphy,
Atlas of Orthoses and Assistive Devices (Fifth Edition 2019),
ISBN 9780323483230,
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-48323-0.00044-5>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323483230000445>

- Cheng-Tang Pan, Chun-Chieh Chang, Yu-Sheng Yang, Chung-Kun Yen, Chao-Chih Liu, Cheng-Lung Lee, Yow-Ling Shiue, (2020) Development a multi-loop modulation method on the servo drives for lower limb rehabilitation exoskeleton. *Desarrollo de un método de modulación de múltiples bucles en los servo-accionamientos para el exoesqueleto de rehabilitación de miembros inferiores*
<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102360>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957415820300404>
- Cloud, W., 1965. Amplificadores de hombre: Máquinas que le permiten llevar una tonelada, *Popular Science*, vol. 187, no. 5, págs. 70-73 y 204.
- De Looze, Michiel; P. Bosch, Tim; Krause, Frank; Stadler, Konrad; S.O'Sullivan, Leonard W. (2016)
Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Exoesqueletos para aplicaciones industriales y sus posibles efectos sobre la carga de trabajo físico*
<https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1081988>
- Ephraim Garcia, Janet M. Sater, John Main (2002)
Exoskeletons for Human Performance Augmentation (EHPA)
<https://doi.org/10.7210/jrsj.20.822>
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jrsj1983/20/8/20_8_822/_article
- F. Brocal; N. Paltrinieri; C. González-Gaya; M.A. Sebastián; G. Reniers, (2021)
Approach to the selection of strategies for emerging risk management considering uncertainty as the main decision variable in occupational contexts, *Aproximación a la selección de estrategias para la gestión de riesgos emergentes considerando la incertidumbre como principal variable de decisión en contextos ocupacionales*
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105041>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753520304380>
- F. Brocal; M.A. Sebastián, (2015)
Identification and Analysis of Advanced Manufacturing Processes Susceptible of Generating New and Emerging Occupational Risks, *Identificación y análisis de procesos de fabricación avanzados susceptibles de generar riesgos laborales nuevos y emergentes*
ISSN 1877-7058,
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.574>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815044860>
- Jason C Gillette; Mitchell L. Stephenson, (2018). EMG analysis of an upper body exoskeleton during automotive assembly. *Análisis EMG de un exoesqueleto de la parte superior del cuerpo durante el montaje automotriz.*
https://www.researchgate.net/publication/327187565_EMG_analysis_of_an_upper_body_exoskeleton_during_automotive_assembly

- Jason C Gillette; Mitchell L. Stephenson (2019)
Electromyographic Assessment of a Shoulder Support Exoskeleton During on-Site Job Tasks, *Evaluación electromiográfica de un exoesqueleto de soporte de hombro durante las tareas de trabajo en el lugar*
DOI: 10.1080/24725838.2019.1665596
https://www.researchgate.net/publication/335742538_Electromyographic_Assessment_of_a_Shoulder_Support_Exoskeleton_During_on-Site_Job_Tasks
- Jacob Rosen, Moshe Brand, Moshe Brand, Moshe B. Fuchs, Mircea Arcan, (2001). A myosignal-based powered exoskeleton system. *Un sistema de exoesqueleto motorizado basado en mioseñales*. Doi: 10.1109/3468.925661
https://www.researchgate.net/publication/3412114_A_myosignal-based_powered_exoskeleton_system
- Jessica Knox, Amitabh Gupta, Helen A. Banwell, Lisa Matricciani, Deborah Turner, (2021)
Comparison of EMG signal of the flexor hallucis longus recorded using surface and intramuscular electrodes during walking, *Comparación de la señal EMG del flexor largo del dedo gordo registrada utilizando electrodos de superficie e intramusculares durante la marcha*. Journal of Electromyography and Kinesiology, ISSN 1050-6411,
<https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2021.102574>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1050641121000614>
- Joseph b. Webster, Douglas P. Murphy, (2019). Atlas of Orthoses and Assistive Devices. Atlas de órtesis y dispositivos de asistencia, Fifth Edition ISBN 978-0-323-48323-0
<https://doi.org/10.1016/C2014-0-04193-7>
<https://www.sciencedirect.com/book/9780323483230/atlas-of-orthoses-and-assistive-devices#book-description>
- Khairul Anama; Adel Ali Al-Jumaily (2012)
Active Exoskeleton Control Systems: State of the Art. *Sistemas activos de control de exoesqueletos: estado del arte*. Universidad de Jember, Jember 68121, Indonesia. y Universidad de Tecnología de Sydney, Sydney 2007 Australia
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.273>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812026732>
- Kazerooni, H., Tung, W., & Pillai, M. (2019). Evaluation of Trunk-Supporting Exoskeleton. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 63(1), 1080–1083. <https://doi.org/10.1177/1071181319631261>
<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1071181319631261>
- Kirsten Huysamen, Michiel de Looze, Tim Bosch, Jesus Ortiz, Stefano Toxiri, Leonard W. O'Sullivan, (2018). Assessment of an active industrial exoskeleton to aid dynamic lifting and lowering manual handling tasks, *Evaluación de un exoesqueleto industrial activo para ayudar en las tareas de manipulación manual de elevación y descenso dinámicas*.
<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.11.004>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003687017302533>

- K. Gui, U. Tan, H. Liu and D. Zhang, 2020. Electromyography-Driven Progressive Assist-as-Needed Control for Lower Limb Exoskeleton, in *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, *Control progresivo asistido por electromiografía según sea necesario para el exoesqueleto de las extremidades inferiores* vol. 2, no. 1, pp. 50-58,
doi: 10.1109/TMRB.2020.2970222
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8974252>
- L. Gila, A. Malanda, I. Rodríguez Carreño, J. Rodríguez Falces, J. Navallas, (2009) Electromyographic signal processing and analysis methods. *Métodos de procesamiento y análisis de señales electromiográficas*.
https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1137-66272009000600003
- Mohamed Amine Alouane, Weiguang Huo, Hala Rifai, Yacine Amirat, Samer Mohammed, (2019) Hybrid FES-Exoskeleton Controller to Assist Sit-To-Stand movement, IFAC-PapersOnLine, *Controlador híbrido FES-exoesqueleto para ayudar al movimiento de sentado a de pie* ISSN 2405-8963,
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.01.032>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319300345>
- Neethu Robinson, Ravikiran Mane, Tushar Chouhan, Cuntai Guan, (2021) Emerging trends in BCI-robotics for motor control and rehabilitation, *Current Opinion in Biomedical Engineering*, *Tendencias emergentes en BCI-robótica para control y rehabilitación de motores*, *Opinión actual en Ingeniería Biomédica*, Volume 20, 100354, ISSN 2468-4511,
<https://doi.org/10.1016/j.cobme.2021.100354>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468451121000945>
- N.S.S. Sanjeevi, Yogesh Singh, Vineet Vashista, (2021). Recent advances in lower-extremity exoskeletons in promoting performance restoration, *Current Opinion in Biomedical Engineering*, *Avances recientes en exoesqueletos de extremidades inferiores para restaurar el movimiento*.
<https://doi.org/10.1016/j.cobme.2021.100338>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468451121000787>
- Peng Yin, Liang Yang, Shengguan Qu, Chao Wang, (2020). Effects of a passive upper extremity exoskeleton for overhead tasks, *Efectos de un exoesqueleto pasivo de la extremidad superior para tareas aéreas*. *Journal of Electromyography and Kinesiology*,
<https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2020.102478>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1050641120301206>

- Rashedi Ehsan, Kim Sunwook, Nussbaum Maury A., Agnew Michael J. (2014)
Ergonomic evaluation of a wearable assistive device for overhead work. *Evaluación ergonómica de un dispositivo de asistencia portátil para trabajos por encima de la cabeza*.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00140139.2014.952682>
- Rui Na, Chun Hu, Ying Sun, Shuai Wang, Shuailei Zhang, Mingzhe Han, Wenhan Yin, Jun Zhang, Xinlei Chen, Dezhi Zheng, (2021). An embedded lightweight SSVEP-BCI electric wheelchair with hybrid stimulator, *Una silla de ruedas eléctrica SSVEP-BCI liviana incorporada con estimulador híbrido*. ISSN 1051-2004,
<https://doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103101>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1051200421001408>
- Saad Alabdulkarim, Maury A. Nussbaum, (2019). Influences of different exoskeleton designs and tool mass on physical demands and performance in a simulated overhead drilling task. *Influencias de diferentes diseños de exoesqueletos y de peso de herramientas en las demandas físicas y el rendimiento en una tarea de perforación simulada*.
<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.08.004>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003687018302618>
- Sofía Iranzo; Alicia Piedrabuena; Daniel Iordanov; Ursula Martinez-Iranzo; Juan-Manuel Belda-Lois, (2020). Ergonomics assessment of passive upper-limb exoskeletons in an automotive assembly plant, *Evaluación ergonómica de exoesqueletos pasivos de miembros superiores en una planta de ensamblaje de automóviles*.
<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103120>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003687020300788>
- Sunwook Kim, Maury A. Nussbaum, Mohammad Iman Mokhlespour Esfahani, Mohammad Mehdi Alemi, Saad Alabdulkarim, Ehsan Rashedi, (2018). Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Expected effects on discomfort, shoulder muscle activity, and work task performance. *Evaluación de la influencia de un chaleco exoesquelético pasivo de las extremidades superiores para tareas que requieren la elevación del brazo: Efectos "esperados" e "inesperados" sobre la incomodidad, la actividad de los músculos del hombro y el desempeño de las tareas laborales. Parte 1 y parte 2*
<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.02.025>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003687018300590>
- Sommerich, Carolyn m.; Mcglothlin, James d. a; Marras, William s. (1993) Occupational risk factors associated with soft tissue disorders of the shoulder: a review of recent investigations in the literature. Taylor & Francis. *Factores de riesgo ocupacional asociados con trastornos de tejidos blandos del hombro: una revisión de investigaciones recientes en la literatura*
<https://doi.org/10.1080/00140139308967931>
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00140139308967931>

SussanaY. Gordleeva *et al.*, (2020). Real-Time EEG–EMG Human–Machine Interface-Based Control System for a Lower-Limb Exoskeleton. *Sistema de control basado en interfaz hombre-máquina EEG-EMG en tiempo real para un exoesqueleto de extremidades inferiores*. *IEEE* vol. 8, págs. 84070-84081, 2020, doi: 10.1109 / ACCESS.2020.2991812
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9084126>

Yongtian He Yongtian He; David Eguren; Jose M. Azorin; Jose M. Azorin; José L Contreras-Vidal; José L Contreras-Vidal January (2018). Brain–machine interfaces for controlling lower-limb powered robotic systems. *Interfaces cerebro-máquina para controlar sistemas robóticos accionados por miembros inferiores*. DOI: 10.1088/1741-2552/aaa8c0
https://www.researchgate.net/publication/322583455_Brain-machine_interfaces_for_controlling_lower-limb_powered_robotic_systems

Webgrafía

Exoesqueleto mecánico (2021). Wikipedia: la enciclopedia libre. Recuperado el 16 de octubre de 2021 de https://es.wikipedia.org/wiki/Exoesqueleto_mecánico

FEES Federation of European Ergonomics Societies Ergonomics in and for Europe. *Federación de Sociedades Europeas de Ergonomía Ergonomía en y para Europa*.

INRS Instituto Nacional de Investigación y Seguridad. FRANCIA. (2021). Repères méthodologiques pour la sélection d'un exosquelette professionnel. *Criterios de referencia metodológicos para la selección de un exoesqueleto profesional*
<https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206416>

INRS Instituto Nacional de Investigación y Seguridad. FRANCIA. (2018). Exosquelettes au travail: impact sur la santé et la sécurité des opérateurs état des connaissances, *Exoesqueletos en el trabajo: impacto en la salud y la seguridad del estado de conocimiento de los operadores*
<https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206311>

INRS Instituto Nacional de Investigación y Seguridad. FRANCIA. 2018. Acquisition et intégration d'un exosquelette en entreprise, *Adquisición e integración de un exoesqueleto en la empresa*
<https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206315>

International Ergonomics Association (IEA) (2021). What Is Ergonomics? Definition and Applications. <https://iea.cc/what-is-ergonomics/>

Asociación española de ergonomía. (2021) ¿Qué es la ergonomía? Definición.

<http://www.ergonomos.es/ergonomia.php>

Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). (2021). Trastornos musculoesqueléticos.

<https://www.insst.es/riesgos-ergonomicos-trastornos-musculoesqueleticos>

Ángeles de Vicente; Clara Díaz; Marta Zimmermann y Luz Galiana, 2012

Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). El trastorno musculoesquelético en el ámbito laboral en cifras.

<https://www.insst.es/documentacion/catalogo-de-publicaciones/el-trastorno-musculoesqueletico-en-el-ambito-laboral-en-cifras>

Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). Informe anual de accidentes de trabajo en España 2020 Código: IATE.8.1.21

<https://www.insst.es/documentacion/catalogo-de-publicaciones/informes-anuales-de-accidentes-de-trabajo/informe-anual-de-accidentes-de-trabajo-en-espana?inheritRedirect=true&redirect=%2Fel-observatorio>

Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). Accidentes de trabajo por sobreesfuerzos 2018. Código: ATS.5.1.19

<https://www.insst.es/documentacion/catalogo-de-publicaciones/accidentes-de-trabajo-por-sobreesfuerzos>

Instituto Valenciano de Seguridad y Salud en el Trabajo (INVASSAT). AVIA solicita una regulación de los exoesqueletos en la automoción. 2019.

https://invassat.gva.es/es/el-invassat-en-los-medios/-/asset_publisher/lozk0pROQPYv/content/avia-solicita-una-regulacion-de-los-exoesqueletos-en-la-automocion

Ministerio de Trabajo. España. Estadística de accidentes de trabajo, 2020.

<https://www.mites.gob.es/estadisticas/eat/welcome.htm>

Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo. 2015 6ª EWCS – España

Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo. 2015 6ª EWCS. España - Año 2017 (insst.es)

Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo. EU OSHA (europa.eu). Trastornos musculoesqueléticos.

<https://osha.europa.eu/es/themes/musculoskeletal-disorders>

Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo (EU-OSHA). (2019). *Impacto de la utilización de los exoesqueletos sobre la seguridad y la salud en el trabajo*

<https://osha.europa.eu/es/publications/impact-using-exoskeletons-occupational-safety-and-health>

Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo (EU-OSHA) (2019). Work-related musculoskeletal disorders: prevalence, costs and demographics in the EU. *Trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo: prevalencia, costes y demografía en la UE*. Informe European Risk Observatory. doi:10.2802/66947

<https://osha.europa.eu/es/publications/work-related-musculoskeletal-disorders-prevalence-costs-and-demographics-eu/view>

Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo (EU-OSHA) (2019). Encuesta europea de empresas sobre riesgos nuevos y emergentes (ESENER)

<https://osha.europa.eu/es/facts-and-figures/esener>

Exoskeleton Market Size, Share & Trends Analysis Report By Mobility (Mobile, Fixed/Stationary), By Technology (Powered, Non-powered), By Extremity, By End Use, By Region, And Segment Forecasts, (2021). *Informe de análisis de tamaño, participación y tendencias del mercado de exoesqueleto por movilidad (móvil, fijo / estacionario), por tecnología (activo, pasivo), por extremidad, por uso final, por región y pronósticos de segmento, 2021-2028*

<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/exoskeleton-market>

Vanessa Puig Aventín. MC-Mutual. 2021. El uso de exoesqueletos para prevenir trastornos musculoesqueléticos (parte I yII): Implementación en las empresas.

https://prevencion.mc-mutual.com/actualidad-detalle/-/asset_publisher/ksRMfI4DgwKI/content/el-uso-de-exoesqueletos-para-prevenir-trastornos-musculoesqueleticos-parte-ii-implementacion-en-las-empresas

Diego-Mas, Jose Antonio. Evaluación postural mediante el método REBA. Ergonautas. Universidad Politécnica de Valencia, 2015. [consulta 23-10-2021]

<http://www.ergonautas.upv.es/metodos/reba/reba-ayuda.php>

EksoBionics (2021). Productos

<https://eksobionics.com/>

ReWalk Robotics - More Than Walking (2021)

<https://rewalk.com/>

Lockheed Martin. (2021). Exoskeleton Technologies Products

<https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/exoskeleton-technologies/military.html>

Noonee - Chairless Chair (2021)

<https://www.noonee.com/>

SPEXOR. Spinal exoskeletal robot for low back pain prevention and vocational reintegration

<http://www.spexor.eu/>

<https://eksobionics.com/manufacturing/>

Emilio de Benito. El PAIS. Periódico digital. (2014). EE UU autoriza comercializar los esqueletos motorizados para parapléjicos.

https://elpais.com/sociedad/2014/06/27/actualidad/1403874842_438707.html

PRLcuatropuntocero. “guía exoesqueletos en prevención de riesgos laborales” (2021)
<https://www.prlcuatropuntocero.es/>

Kinovea. Herramienta de anotación de video diseñada para el análisis deportivo. (2021)
<https://www.kinovea.org/>

Videos

You Can//Ekso mbassadors 2021. EksoNR. EksoBionics. (publicado 2021) [Youtube]
<https://youtu.be/9o9LdRlikGQ>

ReWalker and Paralyzed US Veteran Gene L. Discusses His Experience With The ReWalk Exoskeleton. ReWalk Robotics. (publicado 2020) [Youtube]
<https://youtu.be/gGTyXxc7aVA>

First look: This Ekso Bionics vest reduces worker injuries and fatigue (publicado 2017)
[Youtube] <https://youtu.be/hjP1az0sKHs>

Getting Started with EksoVest (publicado 2018) [Youtube]
<https://youtu.be/zMiK9cYM-y8>

Introducing EVO. EksoBionics. (publicado 2020) [Youtube]
<https://youtu.be/2FcrtwgoYf4>

Asociación de EksoWorks y Ford. (publicado 2017) [Youtube]
<https://youtu.be/HpYhY5-cVyk>

Inside Ford's plan to use exoskeleton vests to prevent injuries. (publicado 2018) [Youtube]
<https://youtu.be/FvXAooTRi1U>

Ford equips assembly line workers with exoskeleton vest in new pilot program. (publicado 2017) [Youtube] https://youtu.be/rtMbi_T2eg0

The first Steadicam test by Garrett Brown (publicado 2017) [Youtube]
<https://youtu.be/QKKGzRIr7A8>

The Shining and the Steadicam®: una entrevista con el inventor Garrett Brown (publicado 2020) [Youtube] <https://youtu.be/YpcP-6nBi5c>

ANEXO

INFORME COMPLETO REBA



Ergonautas

Portal web especializado en ergonomía ocupacional
www.ergonautas.upv.es

Informe de Evaluación Ergonómica

Evaluación de carga postural (Método REBA)

Evaluación de carga postural en el puesto DA-12 dedicado al ensamblaje de componentes de maquinaria automotriz en la Sección B de la Planta de Ensamblaje de Ford S.A.

11/10/2021 18:47

Datos de la Evaluación

Información del puesto

Identificador del puesto: DA-12

Empresa: Ford S.A.

Departamento/Área: Planta de ensamblaje

Sección: Sección B

Descripción: Ensamblaje de componentes de maquinaria automotriz

Información del trabajador

Nombre/Identificador: Miguel P.L.

Edad: 39 años

Antigüedad en el puesto: 4 años

Sexo: Hombre

Tiempo que ocupa el puesto por jornada: 8 horas

Duración de la jornada laboral: 8 horas

Información de la evaluación

Evaluador: Juan José Domenech Hurtado

Fecha de la evaluación: 11/10/2021 18:47

Firma del evaluador:

Observaciones:

La evaluación ergonómica tiene por objeto detectar el nivel de presencia, en la tarea evaluada, de factores de riesgo para la aparición, en los trabajadores que los ocupan, de problemas de salud de tipo ergonómico.

Esta evaluación se centrará en la determinación del nivel de riesgo de la tarea por carga postural que supere los límites recomendables. Para llevarla a cabo se empleará el método REBA de Ergonautas. Este método está basado y desarrolla completamente el método REBA (Rapid Entire Body Assessment).

Nota: Esta evaluación se complementa al trabajo final de máster, tomando de ejemplo la tarea de la cadena de montaje de Ford, y se realiza en un contexto de análisis de un trabajador que NO usa exoesqueleto. Se evalúan los riesgos y la toma pertinente de medidas preventivas, para valorar finalmente si se podría optar al uso de un EE.

Introducción

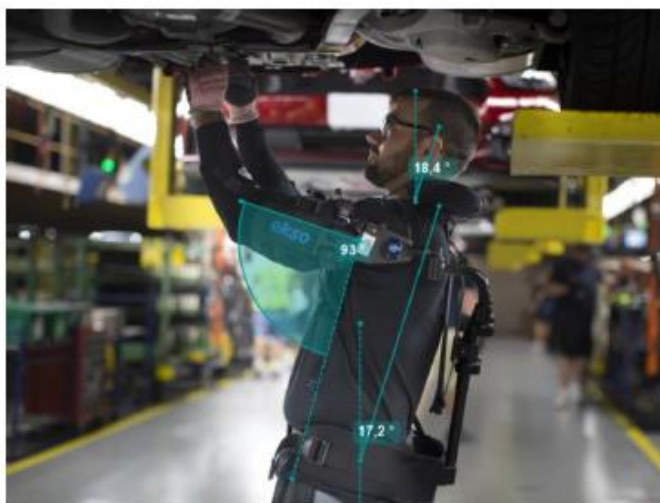
En la cadena de montaje, el operario se acerca a unas bandejas a unos dos metros de su posición, y coge tuercas con una mano y con la otra sujeta la atornilladora, esta es ancha y tiene un agarre regular, además está unida a la tubería que proporciona el aire comprimido.

Acto seguido se pone bajo el coche y comienza a atornillar por durante al menos 30 seg, cuando a terminado, vuelve a comenzar el ciclo. Se han realizado las observaciones pertinentes, toma de tiempos y de fotografías, y se han calculado los ángulos de trabajo.

Imágenes de la Evaluación

Imagen 1

Las tareas de atornillado se realizan bajo el coche. El peso de la carga es, aproximadamente, 2,5 kilogramos.



El operario realiza el atornillado con la herramienta neumática con manguera, por lo que su peso se incrementa y es incómodo de manipular. La duración media de la tarea es de 30 segundos.

El Método REBA

El método REBA evalúa la exposición de los trabajadores a factores de riesgo que originan una elevada carga postural. El método permite el análisis conjunto de las posiciones adoptadas por los miembros superiores del cuerpo (brazo, antebrazo, muñeca), del tronco, del cuello y de las piernas. Además de la postura en sí misma, se valoran otros aspectos influyentes en la carga física como la carga o fuerza manejada, el tipo de agarre o el tipo de actividad muscular desarrollada por el trabajador (tanto posturas estáticas como dinámicas). Además, se considera la existencia de cambios bruscos de postura o posturas inestables, y si la postura de los brazos se mantiene a favor de la gravedad.

Para una determinada postura REBA obtendrá una puntuación a partir de la cual se establece un determinado Nivel de Actuación. El Nivel de Actuación indicará si la postura es aceptable o en qué medida son necesarios cambios o rediseños en el puesto.

Datos de la Evaluación Ergonómica

Características de la postura evaluada

El método de evaluación de la carga postural REBA evalúa posturas individuales. Tras la observación de las tareas desempeñadas por el trabajador durante varios ciclos de trabajo se determinó evaluar la postura actual por poder suponer, a priori, una carga postural que suponga riesgo para el trabajador.

REBA divide el cuerpo en dos grupos, el Grupo A que incluye las piernas, el tronco y el cuello y el Grupo B, que comprende los miembros superiores (brazos, antebrazos y muñecas).



La evaluación del Grupo B puede realizarse del lado más desfavorable del cuerpo o de ambos lados. En este estudio se ha realizado la evaluación de ambos lados del cuerpo: izquierdo y derecho.

GRUPO A

Las posiciones de los miembros del Grupo A del trabajador se clasificaron de acuerdo a los intervalos definidos por el método REBA, resultando:

Posición del tronco: El tronco está entre 0 y 20 grados de flexión o 0 y 20 grados de extensión.

Posición del cuello: El cuello está entre 0 y 20 grados de flexión. Existe torsión o inclinación lateral del cuello.

Posición de las piernas: Soporte bilateral, andando o sentado. Existe flexión de una o ambas rodillas entre 30 y 60°.

GRUPO B (lado derecho)

Las posiciones de los miembros del Grupo B del trabajador (lado derecho) se clasificaron de acuerdo a los intervalos definidos por el método REBA, resultando:

Posición del brazo: El brazo está entre 46 y 90 grados de flexión. El brazo está abducido o rotado. El hombro está elevado. Existe apoyo o postura a favor de la gravedad.

Posición del antebrazo: El antebrazo está flexionado por debajo de 60 grados o por encima de 100 grados.

Posición de la muñeca: La muñeca está flexionada o extendida más de 15 grados. Existe torsión o desviación lateral de la muñeca.

GRUPO B (lado izquierdo)

Las posiciones de los miembros del Grupo B del trabajador (lado izquierdo) se clasificaron de acuerdo a los intervalos definidos por el método REBA, resultando:

Posición del brazo: El brazo está entre 20 grados de flexión o 20 grados de extensión.

Posición del antebrazo: El antebrazo está entre 60 y 100 grados de flexión.

Posición de la muñeca: La muñeca está entre 0 y 15 grados de flexión o extensión.

Fuerzas ejercidas, tipo de agarre y tipo de actividad muscular

El método REBA considera en la evaluación el tipo de actividad muscular desarrollada, el tipo y calidad del agarre de objetos con la mano y la fuerza aplicada durante la realización de la tarea. Los valores observados en la postura evaluada son:

Fuerzas ejercidas: La carga o fuerza es menor de 5 kg.

Tipo de agarre: Agarre Regular (el agarre con la mano es aceptable pero no ideal o el agarre es aceptable utilizando otras partes del cuerpo).

Actividad muscular: Una o más partes del cuerpo permanecen estáticas, por ejemplo soportadas durante más de 1 minuto.

Resultados de la Evaluación Ergonómica

Puntuación de los miembros del Grupo A

La puntuación del Grupo A se obtiene a partir de las puntuaciones de cada uno de los miembros que lo componen (tronco, cuello y piernas). Como paso previo a la obtención de la puntuación del grupo se obtienen las puntuaciones de cada miembro.

TRONCO

La puntuación del tronco depende del ángulo de flexión del tronco. Esta puntuación es aumentada en un punto si existe rotación o inclinación lateral del tronco.

Posición del tronco: El tronco está entre 0 y 20 grados de flexión o 20 grados de extensión.



Puntuación del Tronco:

2

CUELLO

La puntuación se obtiene a partir de la flexión/extensión medida por el ángulo formado por el eje de la cabeza y el eje del tronco. Es aumentada en un punto si existe rotación o inclinación lateral de la cabeza.

Posición del cuello: El cuello está entre 0 y 20 grados de flexión. Existe torsión o inclinación lateral del cuello.



Puntuación del Cuello:

2

PIERNAS

La puntuación de las piernas depende de la distribución del peso entre ellas y los apoyos existentes. Se incrementa en un punto si existe flexión de una o ambas rodillas. El incremento es de 2 unidades si existe flexión de más de 60°.

Posición de las piernas: Soporte bilateral, andando o sentado. Existe flexión de una o ambas rodillas entre 30 y 60°.



Puntuación de las Piernas:

1

PUNTUACIÓN DEL GRUPO A

La puntuación del Grupo A obtenida a partir de las puntuaciones de los miembros del grupo es:

Puntuación del GRUPO A:

3

Puntuación de los miembros del Grupo B (lado derecho)

La puntuación del Grupo B se obtiene a partir de las puntuaciones de cada uno de los miembros que lo componen (brazo, antebrazo y muñeca). Como paso previo a la obtención de la puntuación del grupo se obtienen las puntuaciones de cada miembro.

BRAZO

La puntuación del brazo se obtiene a partir de su flexión/extensión. Se aumenta en un punto si existe elevación del hombro, si el brazo está abducido o si existe rotación del brazo. Si existe un punto de apoyo o adopta una posición a favor de la gravedad disminuye en un punto.



Posición del brazo: El brazo está entre 46 y 90 grados de flexión. El brazo está abducido o rotado. El hombro está elevado. Existe apoyo o postura a favor de la gravedad.

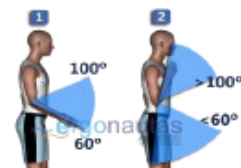
Puntuación del Brazo:

4

ANTEBRAZO

La puntuación del antebrazo se obtiene a partir de su ángulo de flexión, medido como el ángulo formado por el eje del antebrazo y el eje del brazo.

Posición del antebrazo: El antebrazo está flexionado por debajo de 60 grados o por encima de 100 grados.



Puntuación del Antebrazo:

2

MUÑECA

La puntuación de la muñeca se obtiene a partir del ángulo de flexión/extensión medido desde la posición neutra. Se aumenta en un punto si existe desviación radial o cubital o presenta torsión.



Posición de la muñeca: La muñeca está flexionada o extendida más de 15 grados. Existe torsión o desviación lateral de la muñeca.

Puntuación de la Muñeca:

1

PUNTUACIÓN DEL GRUPO B (lado derecho)

La puntuación del Grupo B obtenida a partir de las puntuaciones de los miembros del grupo es:

Puntuación del Grupo B (lado derecho):

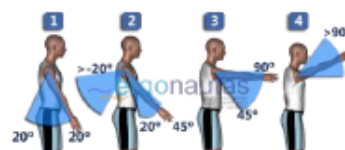
5

Puntuación de los miembros del Grupo B (lado izquierdo)

La puntuación del Grupo B se obtiene a partir de las puntuaciones de cada uno de los miembros que lo componen (brazo, antebrazo y muñeca). Como paso previo a la obtención de la puntuación del grupo se obtienen las puntuaciones de cada miembro.

BRAZO

La puntuación del brazo se obtiene a partir de su flexión/extensión. Se aumenta en un punto si existe elevación del hombro, si el brazo está abducido o si existe rotación del brazo. Si existe un punto de apoyo o adopta una posición a favor de la gravedad disminuye en un punto.



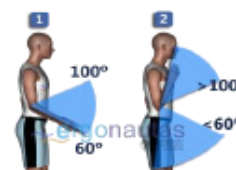
Posición del brazo: El brazo está entre 20 grados de flexión o 20 grados de extensión.

Puntuación del Brazo:

4

ANTEBRAZO

La puntuación del antebrazo se obtiene a partir de su ángulo de flexión, medido como el ángulo formado por el eje del antebrazo y el eje del brazo.



Posición del antebrazo: El antebrazo está entre 60 y 100 grados de flexión.

Puntuación del Antebrazo:

2

MUÑECA

La puntuación de la muñeca se obtiene a partir del ángulo de flexión/extensión medido desde la posición neutra. Se aumenta en un punto si existe desviación radial o cubital o presenta torsión.



Posición de la muñeca: La muñeca está entre 0 y 15 grados de flexión o extensión.

Puntuación de la Muñeca:

1

**Ergonautas**

Portal web especializado en ergonomía ocupacional

www.ergonautas.upv.es

PUNTUACIÓN DEL GRUPO B (lado izquierdo)

La puntuación del Grupo B obtenida a partir de las puntuaciones de los miembros del grupo es:

Puntuación del Grupo B (lado izquierdo):

Valoración de fuerza ejercida y del tipo de agarre

La fuerza ejercida aumenta la puntuación del Grupo A un punto si la carga supera los 5 kg. y dos si supera 10 kg. Además, si la fuerza se aplica bruscamente se deberá incrementar una unidad.

Fuerzas ejercidas: La carga o fuerza es menor de 5 kg.

Puntuación de la Fuerza:

Puntuación A :

La calidad del agarre de objetos con la mano aumenta la puntuación del Grupo B, excepto en el caso de que la calidad del agarre sea buena o no existan agarres.

Tipo de agarre: Agarre regular

Puntuación del Agarre:

Puntuación B (lado derecho) :

Puntuación B (lado izquierdo) :

Puntuaciones finales, riesgo y nivel de actuación (lado derecho)

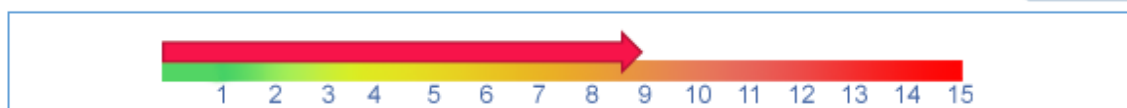
A partir de las puntuaciones A y B se obtiene la Puntuación C, que se incrementará según el tipo de actividad muscular desarrollada en la tarea.

Actividad muscular: Una o más partes del cuerpo permanecen estáticas, por ejemplo soportadas durante más de 1 minuto.

Puntuación C : 5

Puntuación de Actividad Muscular: +3

Puntuación Final : 8



El valor de la puntuación final es mayor cuanto mayor es el riesgo para el trabajador; el valor 1 indica un riesgo inapreciable mientras que el valor máximo, 15, indica riesgo muy elevado. Se clasifican las puntuaciones en 5 rangos de valores teniendo cada uno de ellos asociado un Nivel de Actuación. Cada Nivel establece un nivel de riesgo y recomienda una actuación sobre la postura evaluada.

Puntuación	Nivel	Riesgo	Actuación
1	0	Inapreciable	No es necesaria actuación
2 o 3	1	Bajo	Puede ser necesaria la actuación.
4 a 7	2	Medio	Es necesaria la actuación.
8 a 10	3	Alto	Es necesaria la actuación cuanto antes.
11 a 15	4	Muy alto	Es necesaria la actuación de inmediato.

Nivel de actuación 8: 3

Riesgo	Actuación
Riesgo Alto	Es necesaria la actuación cuanto antes

Puntuaciones finales, riesgo y nivel de actuación (lado izquierdo)

A partir de las puntuaciones A y B se obtiene la Puntuación C, que se incrementará según el tipo de actividad muscular desarrollada en la tarea.

Actividad muscular: Una o más partes del cuerpo permanecen estáticas, por ejemplo soportadas durante más de 1 minuto.

Puntuación C : 5

Puntuación de Actividad Muscular: +3

Puntuación Final : 8



El valor de la puntuación final es mayor cuanto mayor es el riesgo para el trabajador; el valor 1 indica un riesgo inapreciable mientras que el valor máximo, 15, indica riesgo muy elevado. Se clasifican las puntuaciones en 5 rangos de valores teniendo cada uno de ellos asociado un Nivel de Actuación. Cada Nivel establece un nivel de riesgo y recomienda una actuación sobre la postura evaluada.

Puntuación	Nivel	Riesgo	Actuación
1	0	Inapreciable	No es necesaria actuación
2 o 3	1	Bajo	Puede ser necesaria la actuación.
4 a 7	2	Medio	Es necesaria la actuación.
8 a 10	3	Alto	Es necesaria la actuación cuanto antes.
11 a 15	4	Muy alto	Es necesaria la actuación de inmediato.

Nivel de actuación : 3

Riesgo	Actuación
Riesgo Alto	Es necesaria la actuación cuanto antes

Conclusiones

La tarea del puesto conlleva un riesgo algo. Se tiene que ejercer una postura muy incómoda, donde se reportan molestias y lesiones musculoesqueléticas a largo plazo. Es urgente tomar medidas preventivas. Se deben tomar medidas organizativas del puesto. Aun así, por motivos del tipo y eficiencia de la producción, no se puede evitar que el operario trabaje bajo el coche y se encuentre en esa postura. Por lo tanto, una vez valorados otros aspectos preventivos y no existiendo medidas que puedan eliminar este riesgo, podría estudiarse la viabilidad de uso de un EE, siempre con las debidas precauciones que este tipo de nuevo producto conlleva.