

dx.doi.org/10.17488/RMIB.45.2.5

E-LOCATION ID: 1414

Exoesqueletos de Rehabilitación: una Revisión Sistemática de Literatura

Rehabilitation Exoskeletons: a Systematic Literature Review

Jonatan Rivera Robles¹  , Juan Bory Reyes¹ , Luis Manuel Hernández Simón¹ , Jesús Ignacio Eduardo Palacios Hernández¹ 

¹Instituto Politécnico Nacional - México

RESUMEN

La acelerada evolución de la tecnología en la última década, ha permitido grandes avances en campos de la ciencia como la medicina, la robótica, la biónica y la rehabilitación al integrar conocimientos y técnicas de estas áreas. Los exoesqueletos de rehabilitación constituyen ejemplos de integración multidisciplinaria en el desarrollo de herramientas de intervención fisioterapéutica que han demostrado tener resultados significativos en pacientes con enfermedades neurológicas.

Esta revisión bibliográfica sistemática, presenta los avances, desarrollos y características de estos dispositivos y su situación actual, específicamente aquellos que presentan mayor impacto en su co-citación y co-ocurrencia para que los trabajos integrados a la investigación sean verificables y confiables. Esto mediante la implementación de una metodología para la elaboración del estado del arte del tema de exoesqueletos de rehabilitación, basado en la implementación de bases de datos científicas, herramientas bibliométricas digitales sistematizadas y su integración sistémica.

La literatura científica sobre los exoesqueletos de rehabilitación fue recopilada de trabajos publicados entre enero de 2014 al 30 de noviembre de 2023, los cuales fueron recuperados de la *Web of Science*. Como primera etapa se definen los criterios de inclusión y exclusión para limitar la búsqueda dentro de la base de datos científica, como segunda etapa el procesamiento de la información y los trabajos obtenidos para procesarlos mediante la implementación del software *CiteSpace*, como resultado de esta etapa se obtuvo el análisis de co-ocurrencia, se generó una red gráfica y un análisis de co-citación; Posteriormente con los datos obtenidos de las etapas anteriores se implementó el método PRISMA. Como tercera etapa se presentan los resultados obtenidos de las 1511 publicaciones y 108,512 citas de referencia que tratan sobre exoesqueletos de rehabilitación. Se presenta una discusión sobre las principales características, avances, limitaciones, desafíos y tendencias que presentan estos dispositivos en la actualidad.

PALABRAS CLAVE: análisis, diagnóstico, exoesqueletos, movilidad, rehabilitación

ABSTRACT

The accelerated evolution of technology in the last decade has enabled breakthroughs in fields of science such as medicine, robotics, bionics and rehabilitation by integrating knowledge and techniques from these areas.

Rehabilitation exoskeletons are examples of multidisciplinary integration in the development of physiotherapeutic intervention tools that have shown significant results in patients with neurological diseases.

This systematic literature review presents the advances, developments and characteristics of these devices and their current situation, specifically those that have the greatest impact on their co-citation and co-occurrence so that the works integrated into the research are verifiable and reliable. This is done through the implementation of a methodology for the elaboration of the state of the art on the subject of rehabilitation exoskeletons, based on the implementation of scientific databases, systematised digital bibliometric tools and their systemic integration.

The scientific literature on rehabilitation exoskeletons was compiled from papers published between January 2014 and 30 November 2023, which were retrieved from the *Web of Science*. The first stage was to define the inclusion and exclusion criteria in order to limit the search within the scientific database, and the second stage was to process the information and works obtained in order to process them using the *CiteSpace* software, as a result of this stage, the co-occurrence analysis was obtained, a graphical network was generated and a co-citation analysis, subsequently with the data obtained from the previous stages, the PRISMA method was implemented. As a third step, the results obtained from the 1511 publications and 108,512 reference citations dealing with rehabilitation exoskeletons are presented. A discussion of the main characteristics, advances, limitations, challenges and trends of these devices is presented.

KEYWORDS: analysis, diagnosis, exoskeletons, mobility, rehabilitation

Autor de correspondencia

DESTINATARIO: Jonatan Rivera Robles

INSTITUCIÓN: Instituto Politécnico Nacional

DOMICILIO: Av. 100mts, #45, Tlacamaca, Gustavo A.

Madero, C.P. 07380. Ciudad de México, México.

CORREO ELECTRÓNICO: jriverar@ipn.mx

Recibido:

26 Enero 2024

Aceptado:

2 Mayo 2024

INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico que se vive actualmente en el siglo XXI, ha permitido desarrollar sistemas muy avanzados en el campo de la robótica, esto a su vez, brinda una contribución significativa en este campo de la medicina para la rehabilitación^[1]. Este es el caso de los exoesqueletos utilizados para la rehabilitación de personas con algún problema de movimiento^[2] y otras alteraciones físicas; estos son dispositivos que realizan la función de soporte y ayuda de tal manera que son una extensión del cuerpo del paciente que los utiliza, se desarrollan como estructuras externas al cuerpo, las articulaciones del exoesqueleto^[3] ayudan al movimiento de las extremidades en el cuerpo. Estos dispositivos integran la destreza del usuario y las potencialidades del dispositivo permitiendo la recuperación de movilidad del individuo^[4].

Existen registros que indican los primeros desarrollos alrededor de los exoesqueletos fue en el año de 1960, las primeras aparición de exoesqueletos fueron realizados en los Estados Unidos de América mediante la colaboración de los militares y *General Electric* (GE) con el prototipo denominado “*Hardiman I*”. Se desarrolló un exoesqueleto con el objetivo de incrementar la capacidad de carga para el usuario, específicamente para actividades como la descarga y manipulación de materiales. Se construyó con la finalidad de manipular cargas de hasta 25 kilogramos y el usuario solo sintiera la carga correspondiente a un kilogramo de peso. El dispositivo de cuerpo entero no pudo ser implementado en una persona por que presentaba problemas de inestabilidad y peligro. Este dispositivo contaba una extremidad superior capaz de manipular una carga 340 kilogramos de peso^[5].

Los exoesqueletos, “*ReWalk*” y “*eLegs*” permiten mejorar la marcha de pacientes con alteraciones de la movilidad para caminar. La órtesis robótica Lokomat ha demostrado una mejoría considerable en personas con problemas para caminar^[6]. Estos dispositivos para la rehabilitación, basan su funcionamiento en realizar una serie de movimientos definidos por fisioterapeutas, lo que proporciona a los médicos evaluar el avance y mejoría que los pacientes de una forma automática. Los exoesqueletos son activos, es decir contienen actuadores que permiten la ejecución de funciones previamente definidas^[7].

Autores como L. Zhang *et al.*^[8] y D. Shi *et al.*^[9] han desarrollado estudios de la viabilidad y uso de estos dispositivos en diferentes áreas de la ingeniería, la biomecánica, la medicina y la rehabilitación; han propuesto métodos para su diseño, los cuales ofrecen un área de oportunidad para los investigadores debido a la complejidad del tema y de la solución de los modelos matemáticos que los rigen.

Estas directrices contribuyen al perfeccionamiento de tecnologías que ayudan en la labor de los médicos orientadas al tratamiento de personas con problemas de movilidad^[10]. Los exoesqueletos son la herramienta que pretende coadyuvar en el mejoramiento de la calidad de vida de los pacientes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación presenta una revisión sistemática de toda la investigación disponible relevante respecto de Exoesqueletos de Rehabilitación y en relación con su desarrollo y aplicación, enmarcado en el enfoque sistémico^[11]. Para su elaboración, se ha implementado en una primera etapa la *Web of Science Core Collection* un índice de citas confiable para ubicar investigaciones en un conjunto multidisciplinario y seleccionado de revistas, libros y conferencias, en segunda etapa *CiteSpace*^{[12][13]} y tercera etapa el método *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA)^[14] que permite estructurar de manera ordenada la información para su análisis (Figura 1).

Seguidamente, se muestra de manera detallada las fases que la componen, con el objetivo de identificar los exoesqueletos más utilizados en el campo de la rehabilitación y su desarrollo e implementación en el campo de la rehabilitación.

En este contexto unos de los dispositivos que pretenden apoyar en el mejoramiento de la movilidad en las personas son los exoesqueletos^[15], dispositivos conformados por elementos mecánicos, electrónicos e informáticos diseñados para ser implementados sobre el cuerpo del paciente, de forma que asemeja una prenda de vestir, definido más claramente por el término en inglés “*Wearable robots*”^[16] que permite apoyar las extremidades del cuerpo del paciente para su movilidad y/o aumentar sus capacidades físicas. La gran mayoría de los desarrollos en este campo están orientados a la medicina, pensados y diseñados para adaptarse al cuerpo del usuario mediante la implementación de sensores y elementos para el procesamiento de datos para la retroalimentación de conjunto con el usuario para la ejecución de alguna operación o movimiento mediante los motores para realizar tareas predeterminadas.

Búsqueda inicial

Los datos recopilados que integran este estudio provienen de la literatura científica indexada en la *Web of Science* al 21 de noviembre del 2023, se utilizó una estrategia de búsqueda sistemática para cumplir con los requisitos de búsqueda exhaustiva. La estrategia de búsqueda fue desarrollada mediante una combinación de palabras “exoesqueletos” y “aplicaciones médicas” contenidas en las bases de datos *PubMed*, *ScienceDirect* y *Scopus*. Consecutivamente, se aumentó aplicando otra combinación, usando los operadores booleanos AND y OR^[17] dependiendo de cómo acomodaran las palabras “grados de libertad”, “pacientes”, “exoesqueletos robóticos”, “usable”. Estas búsquedas permitieron obtener un vasto número de datos. Muchos de estos duplicados, otros con poco valor referencial al objetivo de esta revisión, pero permiten una visión más amplia del mundo sobre la temática tratada y esto, permite corroborar que este tema, presenta que anteriormente se había realizado una revisión sistemática.

Algunos resultados arrojados por *Scopus* se encontraron duplicados en *Elsevier*, por tal motivo se excluyeron de la búsqueda.

Búsqueda sistemática

La búsqueda se llevó a cabo en dos etapas la primera en marzo de 2021 y la segunda en marzo de 2023, en *ScienceDirect*, *Elsevier*, *PubMed* y *Springer Link*, delimitando los resultados a manuscritos publicados en el periodo comprendido entre 2014 hasta el 2023. La combinación en cuestión de términos que presentan los mejores resultados son los siguientes: (*exoskeletons OR rehabilitation*) OR (*exoskeletons to support rehabilitation*) AND (*exoskeletons OR degrees of freedom*) OR (*systemic approach*) OR (*systematic review*) OR (*Rehabilitation*) OR (*Physiotherapy*) OR (*Medical applications*) OR (*Sensors*) OR (*Control systems*). Específicamente, se obtuvieron 1511 resultados distribuidos de la siguiente forma: 680 en *ScienceDirect*, 412 *Elsevier*, 380 *PubMed* y 39 en *Springer Link*. Posterior a la recopilación, se procedió a definir los criterios de inclusión y exclusión. El primer criterio para la búsqueda se limitó a “artículo” y “revisión”, excluyendo todas las demás opciones. Los documentos integrados en esta investigación incluyen atributos básicos como: fecha de publicación, autor o autores, la institución, el país y las referencias citadas; con estos datos se estructuró la base de datos con la que se desarrolló el análisis posterior. En una segunda etapa del procesamiento de la información se generaron redes de co-ocurrencia y co-citación para analizar sus características, esto mediante la implementación de la herramienta tecnológica *CiteSpace*, una aplicación de Java desarrollada por Chen^[18], este método se ha comprobado ampliamente en trabajos de ciencia métrica ^{[19][20][21]}. El sesgo temporal de los documentos integrados dentro de esta investigación fue de año 2014 al 2023 con 1 año por corte, Los tipos de nodos incluían la categoría, la revista citada, las referencias y las palabras clave. El criterio de selección fue que la publicación estuviera entre las 50 primeras por mayor número de citas en cada sesgo temporal.

Criterios de inclusión

1. Que presenten estudios de casos únicos, revisiones, estudios empíricos, estudios de caso único.
2. Que utilicen técnicas de rehabilitación y fisioterapia para tratamientos de problemas en los diferentes miembros del paciente.
3. Que hablen de mejorar la movilidad, entendido dentro del marco del enfoque sistémico.
4. Que el estudio se concentre en la atención de problemas en las extremidades superiores e inferiores.
5. Que se hayan publicado en el periodo comprendido entre 2014 a 2023.

Criterios de exclusión

1. Los estudios que se enfoquen en procedimientos quirúrgicos.
2. Los estudios orientados a exoesqueletos que no presenten aportes verificables.
3. Los que no se refieren a rehabilitación y fisioterapia.
4. Aquellos que se encuentran fuera del contexto del análisis o utilizan métodos de difícil interpretación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por las características de los resultados obtenidos, estos se dividieron en tres secciones. La primera sección contiene la búsqueda sistematizada sobre los exoesqueletos de rehabilitación y el análisis bibliométrico (WoS); la segunda sección presenta los resultados del análisis de la red de co-ocurrencia de publicaciones y el análisis de co-citación (CiteSpace); en la tercera y última sección se muestran los resultados finales obtenidos (PRISMA).

Como resultado de la recopilación, filtrado de duplicación y procesamiento de datos, se recuperaron un total de 782 publicaciones y 9005 referencias citadas en el campo de la investigación sobre “exoesqueletos de rehabilitación” que se publicaron entre los años 2014 al 2023; En la Figura 1 se muestra el número de artículos publicados y citados que conforma la base de datos de la investigación.

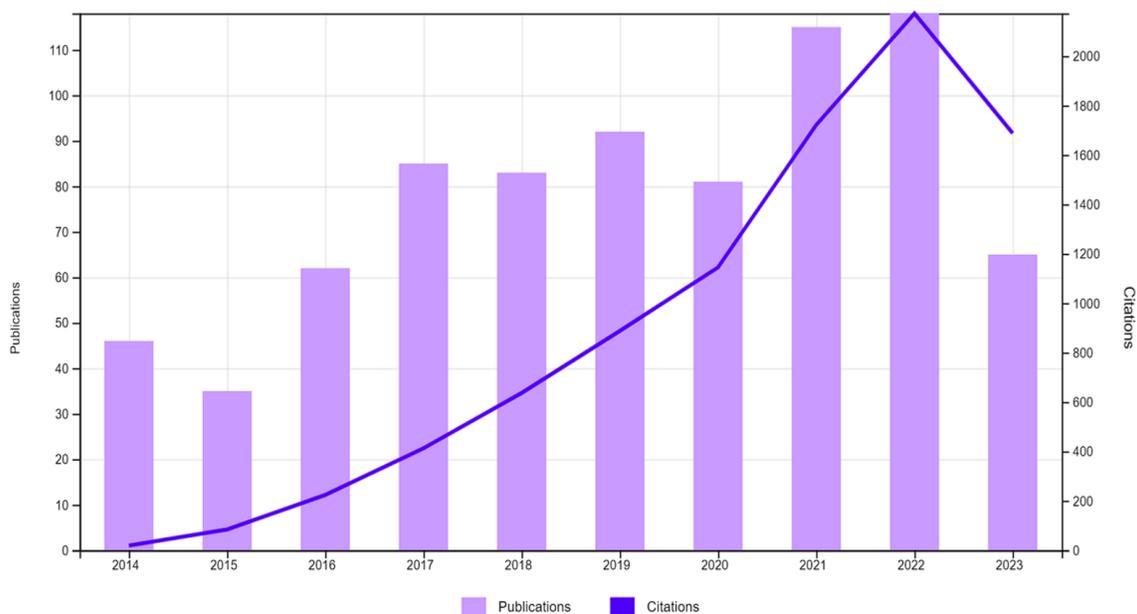


FIGURA 1. Publicaciones indexadas en Web of Science (2014 a 2023) sobre exoesqueletos de rehabilitación.

Los resultados muestran que el número de publicaciones relacionadas con los exoesqueletos de rehabilitación presentan una tendencia anual significativamente creciente en la última década (2014-2023). También se destaca la tendencia creciente en el número de citas, el año 2023 presenta una caída tanto en las citas como en número de publicaciones.

Análisis de co-ocurrencias

La *Web of Science* (WoS) implementa la técnica de co-ocurrencia para el manejo de su base de datos, por lo que clasifica las publicaciones en una o más categorías^[22], en el caso de las publicaciones de exoesqueletos de rehabilitación se han ordenado en 71 categorías durante los últimos 10 años. En la Tabla 1 se detallan las métricas de co-ocurrencia de categorías en la investigación.

Partiendo de los datos de la Tabla 1, se construyó una red de co-ocurrencias de las conexiones internas entre categorías mediante el uso del software *CiteSpace*, esto permitió revelar temas y patrones en los datos que visualizan las relaciones complejas entre los elementos del estudio (Figura 2). Esta red combinada se basa en una distribución correspondiente a muestras de años consecutivos, resaltando los trabajos más importantes; cada nodo de la red representa un autor y este a su vez una referencia citada, las líneas que conectan los nodos simbolizan los enlaces de citación y el grosor de estas muestran la importancia de la referencia citada. Los resultados arrojan que hay 14 *clusters* de autores predominantes en la red sobre exoesqueletos de rehabilitación.

En la Figura 2 se observan los siguientes datos: la generación de la red se desarrolló con fecha: diciembre 9, 2023 a las 2:57:02 PM, la base de datos procesada corresponde a la *Web of Science* (WoS), Periodo de duración 2014-2023 (Longitud de corte=1). Criterios de selección: g-índice (k=25), Factor de retención de enlaces (LRF) 3.0. Enlace/nodo (L/N) 10. Años de búsqueda (LBY) -1. Equivalencia (e) = 1.0. Red: Nodo (N)= 228, Borde (E)= 777 (Densidad =0.03), Cinco Co-citación más grandes 203 (89 %), modularidad Q= 0.7227, Silueta media ponderada S= 0.8867, Media armónica Q, S = 0.7963.

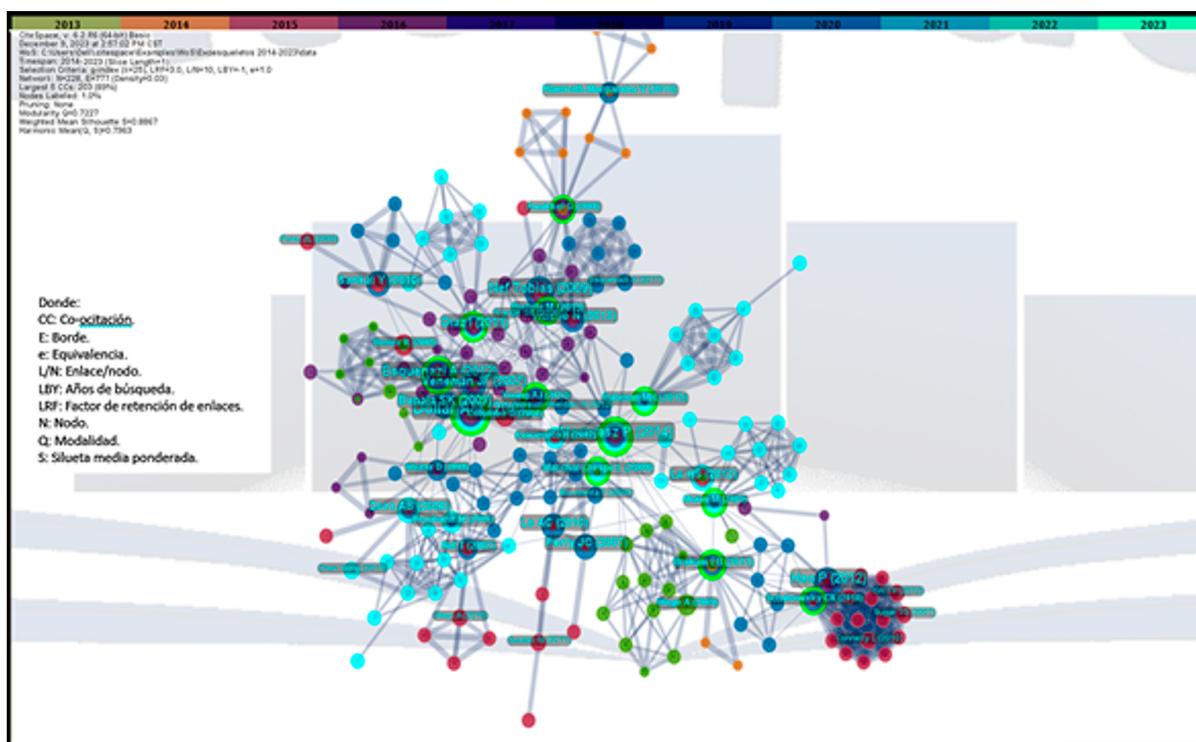


FIGURA 2. Red de co-ocurrencia de publicaciones sobre exoesqueletos de rehabilitación publicadas de 2014 a 2023.

TABLA 1. Categorías de co-ocurrencia en publicaciones relacionadas con exoesqueletos de rehabilitación (2014 a 2023).

| Categorías WoS | Publicaciones | % de 782 |
|--|----------------------|-----------------|
| Robótica | 244 | 31.202 |
| Ingeniería Eléctrica Electrónica | 217 | 27.749 |
| Ingeniería Biomédica | 140 | 17.903 |
| Sistemas de control de automatización | 126 | 16.113 |
| Informática Inteligencia Artificial | 105 | 13.427 |
| Ingeniería mecánica | 90 | 11.509 |
| Rehabilitación | 76 | 9.719 |
| Ingeniería Multidisciplinar | 59 | 7.545 |
| Neurociencia | 59 | 7.545 |
| Instrumentos Instrumentación | 45 | 5.754 |
| Informática Sistemas de Información | 35 | 4.476 |
| Física aplicada | 35 | 4.476 |
| Ciencia de los materiales Multidisciplinar | 33 | 4.220 |
| Telecomunicaciones | 30 | 3.836 |
| Neurología clínica | 24 | 3.069 |
| Química Analítica | 23 | 2.941 |
| Química Multidisciplinar | 23 | 2.941 |
| Informática Aplicaciones Interdisciplinarias | 23 | 2.941 |
| Ingeniería de fabricación | 22 | 2.813 |
| Teoría y métodos informáticos | 21 | 2.685 |
| Ingeniería Industrial | 20 | 2.558 |
| Informática Cibernética | 18 | 2.302 |
| Ciencias multidisciplinares | 18 | 2.302 |
| Ciencia de los materiales Biomateriales | 14 | 1.790 |
| Mecánica | 11 | 1.407 |

Análisis de co-citación

Mediante la información obtenida se desarrolló y visualizó la red de agrupaciones de co-citación (Figura 3) que contiene 107 nodos y 308 enlaces. Los nodos representan artículos citados que se han etiquetado con autores respectivos y años de publicación.

Se identificaron y etiquetaron un total de 53 *clusters* de co-citación de publicaciones relacionadas con exoesqueletos de rehabilitación. Las tendencias obtenidas de la investigación se caracterizan por agrupaciones de artículos citados por publicaciones de investigaciones correspondientes. En la red, Q fue de 0.7493 y la media de S fue de 0.9544, lo que indica que la red es fiable y tenía una alta calidad para la estructura de co-citación. En resumen, se identificaron 5 agrupaciones destacadas que representan temas de investigación importante, estas se muestran en detalle en la Tabla 2, que incluyen

información sobre el tamaño, el valor S, el año, la duración y la etiqueta de los primeros 5 clúster. El tamaño se refiere al número de artículos citados en el clúster, que determina el volumen del clúster. Un valor alto S denota una buena homogeneización de los nodos en cada clúster.

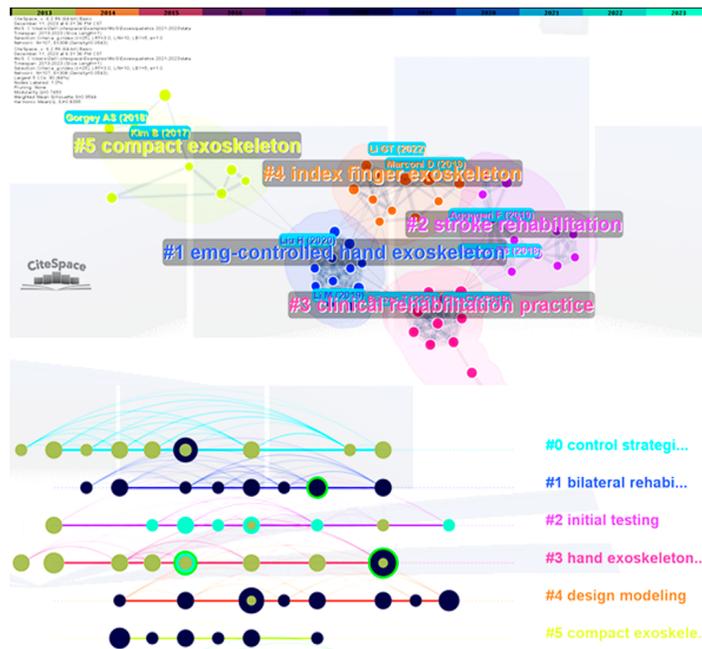


FIGURA 3. Principales grupos de co-citación relacionados con exoesqueletos de rehabilitación en investigaciones publicadas entre 2013 a 2023.

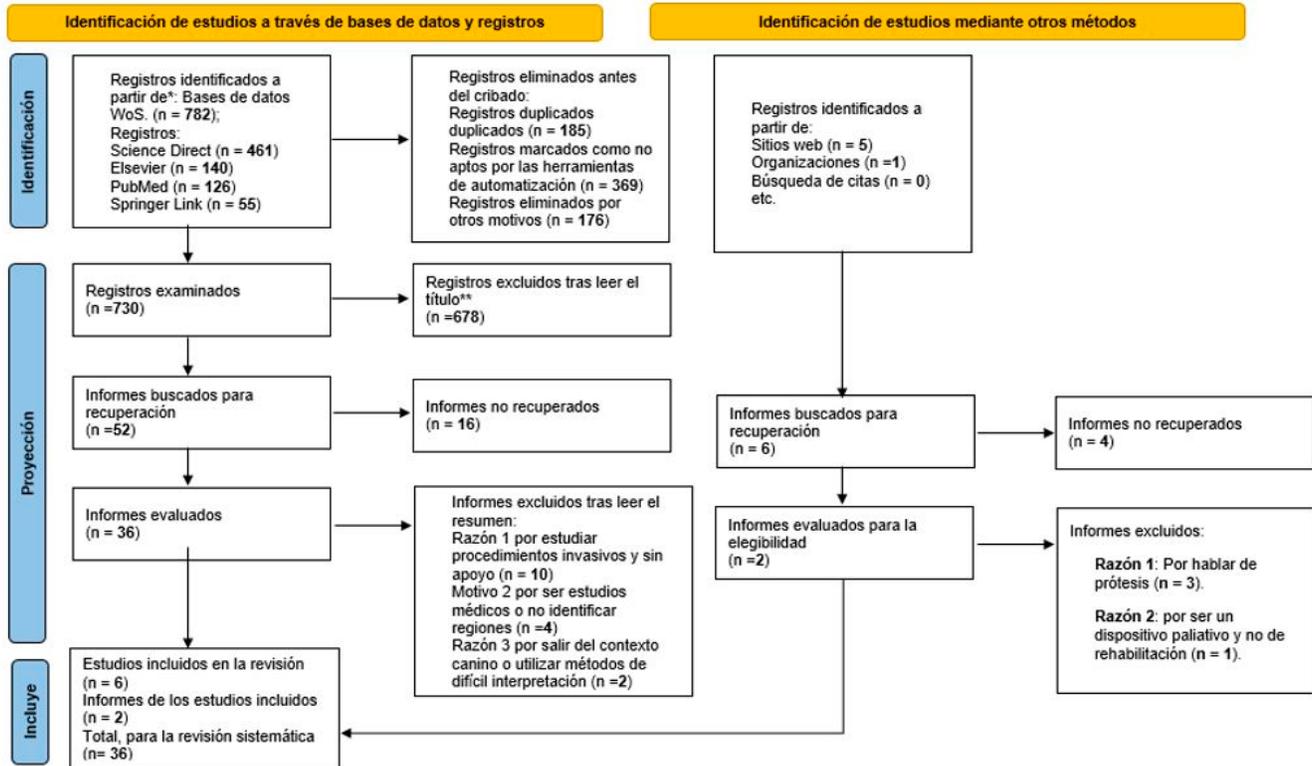
TABLA 2. Principales clusters de co-citación relacionados con exoesqueletos de rehabilitación de investigaciones publicadas en el periodo de 2014 a 2023.

| Cluster | Tamaño | Silueta | Año | Duración | Etiquetas |
|---------|--------|---------|------|-----------|--|
| 1 | 27 | 0.864 | 2017 | 2014-2020 | Exoesqueleto; robótico dispositivo; rehabilitación robótica; robot exoesqueleto; estudio piloto; rehabilitación de la marcha. |
| 2 | 23 | 0.844 | 2019 | 2019-2023 | Exoesqueleto activo; paciente con ictus crónico; dispositivo rehabilitación; recuperación motora; estudio piloto. |
| 3 | 25 | 0.599 | 2018 | 2018-2021 | Exoesqueleto controlado por electromiografía (EMG); participación activa; neurorrehabilitación; sistema de entrenamiento locomotor accionado por cable; lesión medular humana, marcha asistida por exoesqueleto. |
| 4 | 25 | 0.92 | 2019 | 2018-2023 | Exoesqueleto; sistema de rehabilitación; unidad de interacción hombre-máquina amigable con el ser humano; rehabilitación tipo novedoso; lectura eficaz de interacciones. |
| 5 | 9 | 0.912 | 2017 | 2017-2018 | Solicitud de rehabilitación; cinemática articular; entrenamiento de la marcha; algoritmo de control exoesqueleto robótico. |

Fundados en los criterios anteriores y aplicando un segundo nivel de tamizado de la información, se implementó del método PRISMA en los grupos 1 y 4 con mayor silueta media ponderada, se seleccionaron cincuenta y dos manuscritos. Se realizó la lectura del resumen y mediante esta, se eliminaron 16, principalmente por orientarse en procedimientos invasivos y sin apoyo (n=10), por estar centrados en estudios médicos o por no incluir las zonas de las lesiones (n=4) y por salirse del contexto de la investigación, dificultando su análisis y procesamiento de datos (n=2). Al final, 36

manuscritos cubrieron los criterios establecidos para su inclusión y realizar la revisión sistemática (Figura 4). La herramienta de Control de Calidad de la Revisión, fue el método PRISMA.

Diagrama de flujo PRISMA 2020 para nuevas revisiones sistemáticas que incluían búsquedas en bases de datos, registros y otras fuentes.



*Considere, si es posible, comunicar el número de registros identificados en cada base de datos o registro consultado (en lugar del número total de todas las bases de datos/registros).

**Si se utilizaron herramientas de automatización, indique cuántos registros fueron excluidos por un humano y cuántos fueron excluidos por herramientas de automatización.

De: Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. La declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para informar revisiones sistemáticas. *BMJ* 2021; 372:n71. doi: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>. Para más información, visite: <http://www.prisma-statement.org/>

FIGURA 4. Diagrama de Flujo PRISMA en cuatro niveles.

Todos ellos señalaban regiones de miembros inferiores de problemas de movilidad con el enfoque de la Teoría General de Sistemas (TGS)^[23] orientados a procedimientos invasivos, la mayoría evaluando tareas motoras y uno enfocado en un análisis neurológico, pero que fue incluido ya que presenta información importante y con relación al resto. El objetivo fue resumir las investigaciones relacionadas exclusivamente exoesqueletos de cuerpo completo, exoesqueletos de miembros inferiores y orientados a la rehabilitación. Varios de los estudios son piloto o prueba, cuyo objetivo es conocer la viabilidad para hacer posteriores estudios con un mayor tamaño de muestra.

Por lo general los estudios consideran un tamaño reducido además de características muy heterogéneas, tanto dentro de un mismo estudio como al comparar unos estudios con otros. Esto puede explicarse por la complejidad de la patología, resulta difícil conseguir un grupo amplio y homogéneo de pacientes. El nivel de las investigaciones incluidas se evaluó a través de la Escala *Oxford Centre for Evidence Based-Medicine* (OCEBM)^[24], para valorar el nivel de aportación e impacto.

Publicaciones con métricas elevadas

La centralidad de la interrelación (BC) y la resistencia al estallido (BS) son dos métricas importantes en el análisis de la co-citación. En la Tabla 3 se enumeran los artículos con los 10 mayores índices de BC de todos los nodos de la red. También se muestran 4 artículos (los enumerados del 1 al 4) que deberían ser considerados publicaciones de alto impacto

sobre exoesqueletos para la rehabilitación. Una publicación de Kim B. *et al.*^[25] está identificado como la que tiene el mayor BC (0.27) y ha sido citada en diversos campos de la investigación, como la robótica (428 citas), ingeniería eléctrica, electrónica (350 citas), ingeniería Biomédica (210 citas) y en la rehabilitación (195 citas).

TABLA 3. Las 20 publicaciones con mayor fuerza de explosión.

| Rango | Resistencia al estallido | Autor | Año | Título de la publicación |
|-------|--------------------------|--|------|--|
| 1 | 0.27 | Kim B., <i>et al.</i> | 2017 | <i>An upper-body rehabilitation exoskeleton Harmony with an anatomical shoulder mechanism: Design, modelling, control, and performance evaluation</i> ^[25] . |
| 2 | 0.21 | Humanchahua D., <i>et al.</i> | 2021 | <i>A Robotic Prosthesis as a Functional Upper-Limb Aid: An Innovative Review</i> ^[26] . |
| 3 | 0.20 | Bützer T., <i>et al.</i> | 2021 | <i>Fully Wearable Actuated Soft Exoskeleton for Grasping Assistance in Everyday Activities</i> ^[27] . |
| 4 | 0.17 | Trigili E., <i>et al.</i> | 2019 | <i>Design and Experimental Characterization of a Shoulder-Elbow Exoskeleton With Compliant Joints for Post-Stroke Rehabilitation</i> ^[28] . |
| 5 | 0.14 | Hao L., <i>et al.</i> | 2020 | <i>Human-robot cooperative control based on sEMG for the upper limb exoskeleton robot</i> ^[29] . |
| 6 | 0.14 | Molteni F., <i>et al.</i> | 2018 | <i>Exoskeleton and End-Effector Robots for Upper and Lower Limbs Rehabilitation: Narrative Review</i> ^[30] . |
| 7 | 0.14 | Du Plessis t., <i>et al.</i> | 2021 | <i>A Review of Active Hand Exoskeletons for Rehabilitation and Assistance</i> ^[31] . |
| 8 | 0.13 | Chu C. Y., <i>et al.</i> | 2018 | <i>Soft robotic devices for hand rehabilitation and assistance: a narrative review</i> ^[32] . |
| 9 | 0.12 | Calabro R. S., <i>et al.</i> | 2018 | <i>Shaping neuroplasticity by using powered exoskeletons in patients with stroke: a randomized clinical trial</i> ^[33] . |
| 10 | 0.10 | Chen T.Y., <i>et al.</i> | 2019 | <i>An Elbow Exoskeleton for Upper Limb Rehabilitation with Series Elastic Actuator and Cable-Driven Differential</i> ^[34] . |
| 11 | 0.09 | Boser Q. A., <i>et al.</i> | 2021 | <i>Defining the design requirements for an assistive powered hand exoskeleton: A pilot explorative interview study and case series</i> ^[35] . |
| 12 | 0.09 | Al Rezage Ghasaq, <i>et al.</i> | 2016 | <i>Fuzzy PID control of lower limb exoskeleton for elderly mobility</i> ^[36] . |
| 13 | 0.09 | Amiri M. S., <i>et al.</i> | 2019 | <i>Hybrid design of PID controller for four DoF lower limb exoskeleton</i> ^[37] . |
| 14 | 0.08 | Marconi D., <i>et al.</i> | 2019 | <i>A novel hand exoskeleton with series elastic actuation for modulated torque transfer</i> ^[38] . |
| 15 | 0.07 | De la Cruz-Sánchez B.A., <i>et al.</i> | 2019 | <i>Development of Hand Exoskeleton Prototype for Assisted Rehabilitation: Proceedings of the 4thIFTToMM Symposium on Mechanism Design for Robotics</i> ^[39] . |
| 16 | 0.07 | Donkor E.S., <i>et al.</i> | 2018 | <i>Stroke in the 21st Century: A Snapshot of the Burden, Epidemiology, and Quality of Life</i> ^[40] . |
| 17 | 0.07 | Rahaman M. H., <i>et al.</i> | 2015 | <i>Development of a whole arm wearable robotic exoskeleton for rehabilitation and to assist upper limb movements</i> ^[41] . |
| 18 | 0.06 | Aggogeri F., <i>et al.</i> | 2019 | <i>Robotics for rehabilitation of hand movement in stroke survivors</i> ^[42] . |
| 19 | 0.06 | Ambrosini E., <i>et al.</i> | 2019 | <i>A Hybrid Robotic System for Arm Training of Stroke Survivors: Concept and First Evaluation</i> ^[43] . |
| 20 | 0.04 | Al-Fahaam H., <i>et al.</i> | 2018 | <i>Novel soft bending actuator-based power augmentation hand exoskeleton controlled by human intention</i> ^[44] . |

Discusión

Como principales características en este estudio, cabe resaltar la cantidad de publicaciones encontradas (1511 con 108,512 citas), relacionadas al tema de los exoesqueletos de rehabilitación, A partir de esta muestra se depuraron 782 publicaciones que presentan una citación de 9005 referencias, este cribado permitió realizar los análisis de co-citación y co-ocurrencia para obtener datos significativos en la investigación como son los siguientes: las categorías como han sido clasificados, la cantidad de trabajos contenidos en cada categoría, el porcentaje correspondiente a cada categoría, las 10 categorías predominantes con base en su productividad. Aunado a estos resultados se obtuvo una red de co-ocurrencia que muestra cómo se agrupan las 71 categorías de los trabajos de investigación referentes a exoesqueletos de rehabilitación y que dentro de estas existen 14 categorías predominantes; estas muestras se encuentran en un sesgo temporal de 119 meses (enero 2014 a noviembre 2023).

A partir del análisis de co-citación de los trabajos contenidos en las 14 categorías predominantes se logró construir una red que muestra los principales grupos de co-citación, estos grupos fueron jerarquizados por el grado de conexión entre los *clusters* tomando la métrica de -1 nada de conexión y 1 total conexión. La Figura 3 resalta cinco *clusters*, constituidos de 109 nodos con 308 enlaces, estos representan artículos citados etiquetados mediante autores y años de publicación para construir una línea de tiempo que represente su comportamiento.

Los *cluster* de la Tabla 2 fueron jerarquizados a partir del tamaño de su silueta, de la siguiente forma: El *cluster* con mayor silueta es el cluster 4 con un tamaño de 23 nodos y una silueta de 0.92, después le sigue el cluster 5 con un tamaño de 9 nodos y una silueta de 0.912, el *cluster* 1 se ubica en la tercera posición al presentar un tamaño de 27 nodos y una silueta de 0.864, el *cluster* 2 con un tamaño de 25 nodos y una silueta de 0.844, El *cluster* 1 presenta un tamaño de 27 nodos con una silueta de 0.864, el *cluster* 2 con un tamaño de 25 nodos y una silueta de 0.844, *cluster* 3 un tamaño de 25 nodos con una silueta de 0.599. Estos hallazgos ayudaron a focalizar los trabajos científicos más representativos en cuanto al desarrollo, diseño, aplicación, control y materiales empleados, que aportan interesantes propuestas y datos relevantes dentro del estudio de los exoesqueletos de rehabilitación.

A continuación se presenta una descripción detallada de los contenidos de cada una de las publicaciones resultantes del presente estudio, agrupada de la siguiente forma:

Artículos de Revisión de literatura

La revisión que presentan C. J. Yang, *et al.*^[1], resalta las tecnologías clave de los sistemas tipo exoesqueleto, presentan la investigación desde varios puntos de vista del diseño biomecánico, el modelado de la estructura del sistema, la cooperación y la asignación de funciones, la estrategia de control y la evaluación de la seguridad en un marco general. Sin embargo, todavía es necesario mejorar el diseño, el accionamiento y el control de estos dispositivos para que sean rentables en el mercado mundial. En comparación con el trabajo de revisión sistemática de B. Kalita, *et al.*^[10]. Sobre dispositivos ortésicos y exoesqueléticos para extremidades inferiores. Los autores plantean que los dispositivos se revisaron a grandes rasgos según los tipos de articulación, los modos de actuación y las estrategias de control. Además, también presentan comparaciones tabulares con los tipos y aplicaciones de estos dispositivos. Por último, analizan las mejoras necesarias para aumentar la eficacia de los dispositivos de rehabilitación de miembros inferiores, así como la fase de desarrollo en la que se encuentran.

La revisión desarrollada por E. Swinnen, *et al.*^[6] Tiene por objetivo evaluar la eficacia del entrenamiento de la marcha asistido por robot en pacientes con lesión medular, los estudios se agruparon por resultados (función corporal, actividad, participación y componentes de la Clasificación Internacional del Funcionamiento, de la Discapacidad y de la Salud - CIF) y diseño del estudio y se combinaron en una síntesis narrativa. Los autores concluyeron que no había pruebas disponibles de que el entrenamiento de marcha asistido por robot mejorara la función de la marcha más que otras estrategias de entrenamiento locomotor en pacientes con lesión de la médula espinal. Aunque los métodos de revisión no se informaron en su totalidad, las conclusiones de los autores reflejaron los datos limitados y es probable que sean fiables.

Contrario a la revisión de E. Swinnen, *et al.*, la realizada por D. Shi, *et al.*,^[9] evalúa de forma crítica el progreso de la investigación en el análisis de la marcha humana y resume sistemáticamente los avances en el diseño mecánico y el control de los robots exoesqueleto de rehabilitación de extremidades inferiores. Del rendimiento de los prototipos típicos deduce que estos robots pueden conectarse a las extremidades humanas como formas vestibles; además, es posible controlar el movimiento del robot en cada articulación para simular la marcha normal y conducir la extremidad del paciente para realizar entrenamientos de rehabilitación asistidos por robots. Por tanto, la integración humano-robot es una de las líneas de investigación más importantes y, en este contexto, el diseño de estructuras híbridas rígidas-flexibles-blandas, la generación de una marcha personalizada y la fusión de información multimodal son tres tecnologías clave.

El trabajo de Huamanchahua, *et al.*^[26] proporciona una visión muy interesante sobre la integración de las señales encefalografías para el control de dispositivos, por lo que también desarrollaron una matriz que incorpora propuestas que consideran de 2 a 15 DoF (grados de libertad), los actuadores utilizados, y la clasificación considerando si son activas, pasivas, eléctricas, mioeléctricas e híbridas. En conclusión, el artículo proporciona información a las personas que quieren crear una extensión superficial por debajo del codo y hacer uso del control de las señales electromiográficas que se extraen de las contracciones musculares.

T. Du Plessis, *et al.*^[31] se enfoca en tecnologías de exoesqueletos activos para la rehabilitación, la asistencia, el aumento de los dispositivos hápticos para exoesqueletos de mano, resaltando los retos a los que se enfrentan los ingenieros y desarrolladores e intentan resolverlos. Planteando que cada exoesqueleto de mano tiene ciertos requisitos que cumplir para lograr sus objetivos. Ellos extraen estos requisitos y los clasifican en dos secciones: generales y específicos, con el fin de ofrecer una plataforma común para el desarrollo de futuros dispositivos. Los requisitos que consideran técnicamente son: tamaño, peso, ergonomía, rehabilitación, actuadores y sensores; estos se deben a la anatomía y biomecánica complejas de la mano. Concluyen que, mediante la implantación de sistemas inteligentes, las nuevas técnicas de rehabilitación, las técnicas de detección (electroencefalografía (EEG), electromiografía (EMG), admitancia) y estimación de la asistencia aplicada se pueden generar dispositivos más integrales y de mayor efectividad.

En contraste C. Y. Chu, *et al.*^[32] centran su análisis en la detección de los modos de rehabilitación que estos dispositivos pretenden aplicar. Especificando que el Entrenamiento en Tareas Específicas (TST, por sus siglas en inglés) fue la forma más comúnmente discutida, ya que tiene como objetivo permitir que los pacientes comiencen a recuperar la función en su mano. El TST suele ser uno de los primeros ejercicios de

rehabilitación y es probable que siga siendo un elemento básico de la rehabilitación robótica. La siguiente modalidad de entrenamiento más común fue el Movimiento Pasivo Continuo (MPC), que probablemente seguirá ganando popularidad debido a su facilidad de aplicación y eficacia funcional. El CPM se centra en la mejora de la amplitud de movimiento y la recuperación de la fuerza, un paso lógico en el proceso de rehabilitación. Por último, la Resistencia Activa (RA) fue el ejercicio menos comúnmente implementado, probablemente porque representa una de las etapas finales de la rehabilitación: el entrenamiento de la fuerza. A medida que más dispositivos avancen hacia sus fases de evaluación, se espera que aumente la popularidad de los ejercicios de resistencia activa.

Gracias a los planteamientos de los diferentes autores se puede visualizar un contexto más integrador de las diferentes características, clasificaciones, aplicaciones, diseños y aspectos a considerar en lo referente a los exoesqueletos en el campo de la rehabilitación y la fisioterapia.

Una característica recurrente en cada uno de éstos es el uso de elementos dinámicos en comparación con los dispositivos estáticos convencionales.

Artículos originales

Hasta la aparición del prototipo denominado Hardiman I (1971)^[5], los sistemas de manipulación bilateral solían manipular un máximo de peso de 100 libras, eran pesados con una estructura muy grande en relación con su utilidad y solo permitían una operación remota. El prototipo propuso alternativas de solución a las limitaciones mecánicas de diseño de este tipo de sistemas que existían en esos tiempos, para el desarrollo de este prototipo los investigadores necesitaron lograr avances técnicos substanciales tanto en el diseño y la fabricación de maquinaria que les permitiera la construcción de los sistemas de control, los servosistemas bilaterales de alta carga, nuevos métodos de diseño y análisis de datos.

El Programa Hardiman I, fue decisivo para el desarrollo de nuevos conceptos en la manipulación de carga general para aplicaciones militares y estableció una buena base técnica sobre la que construir.

La *General Electric Company* había desarrollado un sistema servo bilateral hidromecánico que se estaba incorporando a los primeros manipuladores industriales pesados.

En los trabajos previos a la propuesta, la *General Electric Company* había realizado una investigación de los factores humanos y la cinemática con un dispositivo exoesquelético pasivo que proporcionaba un medio para medir los movimientos articulares y determinar el número mínimo de articulaciones necesarias para que un hombre tenga movilidad suficiente. También se había construido un pequeño modelo a escala para ilustrar las características básicas del sistema propuesto.

Los principales supuestos, que iban más allá del estado de la técnica, eran los siguientes:

1. Que la tecnología de servomotores bilaterales podría ser avanzada para satisfacer el aumento de la carga del sistema.
2. Que el sistema podía empaquetarse físicamente.
3. Que se podría conseguir el control del sistema de marcha bípedo.

Cumplir estas premisas significaba hacer cosas que no se habían hecho antes; Se consideró que los riesgos estaban bien equilibrados con el historial de logros técnicos de *General Electric Company*.

Pero se reconoció que existía un riesgo técnico sustancial el cual era el desarrollo de la interfaz hombre-máquina. Esto condujo a la definición de los requisitos específicos del sistema y de los subsistemas.

Posterior al desarrollo de este prototipo los resultados y avances tecnológicos obtenidos, plantearon una visión nueva a los investigadores permitiendo el diseño y construcción de prototipos más robustos para los años venideros.

Orientado a miembros superiores

El exoesqueleto denominado “*Harmony*”^[25], desarrollado para rehabilitación de la parte superior del cuerpo, se caracteriza por ser un mecanismo anatómico de hombro con 5 grados de libertad activos accionado por actuadores elásticos en serie y formulado bajo un algoritmo recursivo de Newton-Euler con representación de dinámica espacial.

Otra propuesta de exoesqueleto interesante es el denominado “*Relab tenoexe*” de los autores Bützer, T., Lambercy, O., *et al.*^[27] el cual presenta un módulo que genera los cuatro tipos de agarre para la mano, mediante un sistema remoto de sujeción que propone varias opciones en el diseño y control adaptados a las características individuales de cada usuario; esto comprobado mediante las pruebas realizadas en pacientes con accidentes cerebrovasculares y lesiones de la medula espinal.

Continuando con los exoesqueletos orientados a la neurorrehabilitación de extremidades superiores se encuentra el Sistema de Control “*NESM*” desarrollado por E. Trigili, *et al.*^[28]. El cual emplea un mecanismo de auto alineación basado en juntas rotacionales pasivas que permite auto alinear suavemente los ejes de rotación del robot con las articulaciones de los usuarios en respuesta a movimientos repentinos e imprevistos provocados por contracciones espásticas y ayudando a personalizar ejercicios de rehabilitación pasiva, activo-asistido, activo-resistivo y activo-perturbado.

En T. Chen, *et al.*^[34] se desarrolla un exoesqueleto de 2 grados de libertad que intenta proporcionar un control de par independiente en la flexión/extensión del codo y la supinación/pronación del antebrazo. Este utiliza dos actuadores elásticos en serie (SEA) idénticos para accionarlo. Los dos SEA están acoplados mediante un novedoso diferencial accionado por cable. El exoesqueleto es compacto y ligero, con una masa de 0,9 kg. Los errores de par RMS aplicados fueron inferiores a 0,19 Nm. Las pruebas de banco demostraron un tiempo de subida del par de aproximadamente 0,1 s, un ancho de banda de control del par de 3,7 Hz y una impedancia inferior a 0,03 Nm/deg a 1 Hz. El controlador puede simular una rigidez de pared máxima estable de 0,45 Nm/deg. El rendimiento global es adecuado para aplicaciones de terapia robótica y se discute la novedad del diseño.

El novedoso exoesqueleto “*HandeXos-Beta*” (HX- β) de dedo índice y pulgar para la rehabilitación de la mano fue desarrollado en D. Marconi, *et al.*^[38]. El sistema HX- β presenta una arquitectura cinemática innovadora que permite el accionamiento independiente de la flexión/extensión y circunducción (oposición) del pulgar, permitiendo así una variedad de configuraciones de agarre naturalistas y funcionales. Además, cuenta con una novedosa

arquitectura de actuadores elásticos en serie (SEA) que mide directamente el par transferido externamente en tiempo real y, por lo tanto, permite modos de funcionamiento controlados tanto por posición como por par, lo que permite la implementación de paradigmas de ejercicio tanto de robot a cargo como de usuario a cargo. Por último, la órtesis ajustable de HX- β , los grados de libertad pasivos y el esquema de control subactuado permiten una comodidad óptima, la alineación de las articulaciones robot-usuario y un accionamiento flexible para usuarios de distintos tamaños de mano. Además del diseño mecatrónico y las capacidades funcionales resultantes de HX- β , este trabajo presenta una serie de caracterizaciones de rendimiento físico, incluido el rendimiento del sistema de control de posición y par, la respuesta de frecuencia, la fuerza del efector final y la impedancia de salida.

B. A. De la Cruz-Sánchez, *et al.*^[39] presenta un exoesqueleto de mano controlado por electromiografía (EMG) para movimientos básicos en terapia bilateral asistida, donde el trabajo bimanual es requerido por el paciente. Los usuarios objetivo son individuos con la mano derecha afectada por un accidente o problemas cerebrovasculares que requieren rehabilitación pasiva o asistida. A través de una GUI de Matlab, el sistema recibe, procesa y clasifica señales electromiográficas del usuario adquiridas por un brazalete MYO obteniendo una precisión del 81,2 % utilizando *k-Nearest Neighbors* (kNN) como algoritmo de clasificación y *Random Subset Feature Selection* (RSFS) como algoritmo de selección de características. Posteriormente, el exoesqueleto reproduce el movimiento detectado en la mano contraria del usuario. El prototipo de exoesqueleto tiene 8 grados de libertad (DOF), se ha construido mediante impresión 3D y tiene movimiento independiente de los dedos. El controlador del movimiento se basa en la lógica difusa. Para el análisis del rendimiento del sistema, se utiliza información cinemática de un sistema de captura de movimiento para comparar las trayectorias en diferentes tareas de agarre de la mano de un usuario con y sin el exoesqueleto con un error máximo del 10,63 % y un mínimo del 3,46 % con la posición final deseada, lo que físicamente representa una diferencia de 1,89° y 0,07° respectivamente.

Con el fin de ayudar a las personas con discapacidades físicas que tienen merma la función de las extremidades superiores, En M. H. Rahman, *et al.*^[41] se desarrolla un nuevo robot de tipo exoesqueleto de 7 grados de libertad denominado *Motion Assistive Robotic-Exoskeleton for Superior Extremity* (ETS-MARSE), para facilitar los movimientos cotidianos de las extremidades superiores y proporcionar una terapia de rehabilitación eficaz para la extremidad superior. El “ETS-MARSE” consta de una parte de apoyo al movimiento del hombro, una parte de apoyo al movimiento del codo y el antebrazo, y una parte de apoyo al movimiento de la muñeca. Está diseñado para llevarlo en la parte lateral de la extremidad superior con el fin de proporcionar movimientos naturalistas del hombro (flexión/extensión vertical y horizontal y rotación interna/externa), codo (flexión/extensión), antebrazo (pronación/supinación) y articulación de la muñeca (desviación radial/cubital y flexión/extensión).

Este artículo se centra en el modelado, diseño, desarrollo y control del “ETS-MARSE”. Se realizaron experimentos con sujetos humanos varones sanos en los que se llevó a cabo un seguimiento de trayectorias en forma de ejercicios pasivos de rehabilitación (es decir, trayectorias preprogramadas recomendadas por un terapeuta/clínico). Los resultados experimentales demostraron que el “ETS-MARSE” puede llevar a cabo eficazmente la terapia de rehabilitación pasiva.

Un trabajo que requiere una mención particular, es Q. A. Boser, *et al.*^[35] que tiene por objetivo definir las necesidades y expectativas preliminares de los usuarios finales de un exoesqueleto de mano asistivo. Se considera que los exoesqueletos de mano motorizados son una tecnología emergente que ha demostrado ser prometedora

para ayudar a las personas con problemas en la función de la mano. En la investigación se describen varios diseños de exoesqueletos de mano; aunque, la mayoría no se han basado en criterios orientados al paciente. Es por esto, que fueron recopilados datos cualitativos y cuantitativos para comprender los requisitos de diseño de los usuarios finales de exoesqueletos de asistencia para las manos. Este trabajo refuerza la importancia de implicar a los usuarios de tecnología de rehabilitación en el proceso de desarrollo de dispositivos, planteando así algunos requerimientos a considerar para futuras investigaciones y desarrollo de prototipos.

Orientado a miembros inferiores

Continuando con los exoesqueletos orientados a miembros inferiores en R. S. Calabrò, *et al.*^[33] se considera que el uso de dispositivos neurorobóticos puede mejorar la recuperación de la marcha mediante el entrenamiento de mecanismos específicos de plasticidad cerebral, lo que puede ser clave para el éxito de la rehabilitación con este método. Se evalúa si el exoesqueleto portátil “Ekso™” podía mejorar el rendimiento de la marcha en comparación con el entrenamiento convencional de la marcha sobre el suelo en pacientes con hemiparesia por ictus en fase crónica y si este fomenta la recuperación de mecanismos específicos de plasticidad cerebral. A través de esta investigación se concluye que el entrenamiento de la marcha con “Ekso™” parece prometedor en la rehabilitación de la marcha de pacientes que han sufrido una apoplejía. El estudio propone una base neurofisiológica putativa que respalda los efectos secundarios de “Ekso™”. Este conocimiento puede ser útil para planificar protocolos de rehabilitación de la marcha altamente adaptados al paciente.

Al Rezage, *et al.*^[36] presenta investigaciones sobre el desarrollo de un dispositivo de asistencia para la movilidad de personas mayores. Se Diseña un exoesqueleto como dispositivo de asistencia para mejorar la extremidad inferior y proporcionar un par de soporte que aumente el par de la cadera y la rodilla durante el ciclo de la marcha. Consiste en un humanoide y un exoesqueleto accionado en *Solid Works* y que se importan al entorno virtual *Visual Nastran 4D*. Utiliza un algoritmo de control PID difuso para controlar el exoesqueleto accionado. Realizaron tareas de marcha simuladas con un humanoide que porta el exoesqueleto. Se supone que el humanoide representa a una persona mayor, es capaz de proporcionar el 60 % del par total necesario para completar el ciclo de la marcha, y que el dispositivo de asistencia proporciona el 40 % del par total.

ReWalk es un exoesqueleto robótico que tiene por objetivo que las personas con problemas en las extremidades inferiores causadas por la paraplejía puedan realizar movimientos de cadera y rodilla para que puedan ponerse de pie y caminar erguidas. Este es un exoesqueleto corporal. En L. Zhang, *et al.*^[8] se realiza un estudio comparativo entre “*ReWalk*”, “*EAW*” y “*Lokomat*”, llevando a cabo un meta-análisis en red de ensayos controlados aleatorios y no aleatorios para evaluar las capacidades locomotoras logradas con dos tipos diferentes de programa de entrenamiento de la marcha asistido por robot (RAGT) en personas con lesión de la médula espinal (LME). El estudio analiza al dispositivo *Lokomat* y la marcha asistida por exoesqueleto vestible (EAW), ya que no se han comparado directamente con anterioridad. Ellos concluyen que el dispositivo *Lokomat* y el EAW portátil tuvieron efectos sobre el rendimiento de las capacidades de locomoción, a saber, la distancia, la velocidad y la función. El EAW portátil podría mejorar la velocidad de la marcha en comparación con el *Lokomat*.

Sistemas de control para exoesqueletos

El artículo presentado por H. Liu, *et al.*^[29] propone un método de control cooperativo humano-robot basado en señales sEMG (electromiografía de superficie) para accionar un exoesqueleto neumático de extremidades

superiores que actúe de acuerdo con las intenciones de movimiento del usuario. La información sobre la intención de movimiento del humano se estima combinando el método de regresión con el de clasificación. Basándose en el modelo de estimación del par de torsión de la articulación, que se origina a partir del modelo musculoesquelético de tipo Hill, se utiliza el método de regresión para estimar el par de torsión deseado de la articulación mediante la fusión de la señal sEMG con el ángulo de la articulación. Para evitar las sacudidas y mantener las extremidades del robot en estado estático, se desarrolla un método de clasificación con la máquina de vectores de soporte para conocer el estado de la articulación que el humano pretende mantener.

Los autores M. S. Amiri, *et al.*^[37] desarrollan un método de ajuste de un controlador proporcional-integral-derivativo para un exoesqueleto de 4 grados de libertad utilizando un híbrido de algoritmo genético y optimización de enjambre de partículas. La función de transferencia de cada eslabón del exoesqueleto de miembro inferior, adquirida a partir de un modelo de péndulo, utiliza un sistema de control proporcional-integral-derivativo de bucle cerrado, mientras que cada eslabón se asumió como un eslabón de 1 grado de libertad. En el sistema de control, aplicaron un algoritmo híbrido para medir los parámetros del controlador de cada articulación y minimizar el error. Además, se simuló un modelo tridimensional del exoesqueleto de miembro inferior para validar el controlador propuesto. La trayectoria del sistema de control con controlador proporcional-integral-derivativo optimizado sigue con precisión la señal de entrada deseada. El resultado del controlador híbrido optimizado se comparó con el algoritmo genético y la optimización por enjambre de partículas basada en estadísticas. El error medio del algoritmo propuesto se determinó mediante análisis numérico.

CONCLUSIONES

Este artículo de revisión examina las principales referencias bibliográficas y de mayor relevancia a tener en cuenta al momento de efectuar un proyecto o prototipo de exoesqueleto, orientando al investigador en la elaboración de su propuesta mejor estructurada y más completa. Durante la revisión bibliográfica se logró constatar la importancia del uso de exoesqueletos como alternativa para la rehabilitación. La evidencia sobre el uso de exoesqueletos portables de miembros superiores e inferiores en personas con alguna patología es ampliamente comprobada y ayuda a corregir los patrones en la caminata en cuanto a velocidad y distancia recorrida, aportando un beneficio psicológico y de satisfacción en los usuarios. Sin embargo, podemos afirmar que los resultados reportados en la literatura considerada en el presente estudio no son concluyentes teniendo en cuenta la heterogeneidad de las muestras consideradas en la mayoría de ellos.

Se evidencia la necesidad de profundizar en estudios metodológicamente bien diseñados y con muestras heterogéneas más amplias. El uso de exoesqueletos está comprobado que funciona en pacientes con problemas de movilidad y sirve como apoyo y asistencia de los movimientos y/o el aumento de las capacidades del paciente.

Después de revisar las publicaciones científicas que presentan mayor co-citación y co-ocurrencia, se encontraron una gran cantidad de investigaciones relacionadas directamente con el tema. Se logra confirmar la clasificación establecida de estos dispositivos según su funcionamiento que deriva en exoesqueletos activos y pasivos. Se identificó una subdivisión que los agrupa según la parte del cuerpo que recibe ayuda: orientado a miembros superior, inferior, cuerpo completo, espalda; para finalmente constatar que también pueden ser clasificados por su uso ya sea médico o para potenciar capacidades de los usuarios.

Como conclusión de esta investigación se puede afirmar que el desarrollo de los exoesqueletos de rehabilitación está orientado a las diferentes causas que provocan la pérdida de movilidad en las personas, las que pueden ir desde un trauma o accidente cardiovascular, hasta alguna condición genética.

Brechas y limitaciones detectadas

Un punto de coincidencia en la literatura revisada es la limitante en el diseño de los estudios realizados dependiendo de la heterogeneidad de la muestra de pacientes a tratar, los criterios de selección de la población para realizar las pruebas, la intensidad de los ejercicios con los diferentes dispositivos, el análisis y evaluación de los resultados; principalmente por el número reducido de sujetos de prueba y la complejidad de la evaluación clínica adecuada.

Adicionalmente estas revisiones incorporan una variedad de exoesqueletos dependiendo del objetivo de su diseño, características y aplicaciones. Esto genera una limitante ya que no todas especifican la duración de las sesiones o si fue solo una sesión en su aplicación, el número de repeticiones en los estudios, la intensidad y frecuencia con respecto de los tratamientos convencionales presentando diferencias sistemáticas entre estudios.

Las consideraciones de las revisiones clínicas respecto a esta heterogeneidad en el uso de los exoesqueletos varían por las limitaciones de las metodologías aplicadas en los estudios, lo que ha generado que los resultados de la implementación de estos dispositivos no sean concluyentes en algunos casos. Sin embargo, en el caso de exoesqueletos con mayor avance en su desarrollo se han considerado estas limitaciones y se han enfocado en adaptarlos a las características particulares de cada paciente y reducir esta variabilidad.

Desafíos

Los principales desafíos que presentan los estudios realizados se centran en el desarrollo de protocolos de operación y pruebas estandarizados con muestras heterogéneas de pacientes para diseñar terapias centradas en movimientos bien definidos, con repeticiones acorde a las capacidades del paciente, pero garantizando la efectividad, intensidad, frecuencia e impacto que requiere el paciente para obtener resultados medibles y favorables en su rehabilitación.

Otro desafío que se presenta en algunos dispositivos es la relacionada a los sistemas de control y los sensores que utilizan para la obtención de las señales que controlan la movilidad de las extremidades ya sea de articulaciones, miembros superiores, inferiores o de cuerpo completo, así como también la sensibilidad del paciente ante estos movimientos, otro punto importante a considerar es el tamaño de los dispositivos, en algunos casos la configuración que presentan por la integración de mecanismos los convierte en voluminosos y esta condición limita la sensación de libertad de movimiento en el paciente.

Una condición recurrente es la relacionada a las fuentes de energía eléctrica que requieren los dispositivos para su funcionamiento, la duración de las baterías, el peso que estas tienen y como evitar que este se transmita al paciente.

En general los exoesqueletos por encontrarse en proceso de desarrollo y estar en la fase de prototipos resultan ser de elevado costo de fabricación y venta, mayormente por la necesidad de fabricarlos como trajes a la medida de

cada paciente. Otro condicionante es el mantenimiento regular que requieren y el personal especializado que debe realizarlo, así como las refacciones que se requieren para su reparación.

Tendencias

Los exoesqueletos tienen un futuro prometedor dentro del campo de la medicina, específicamente en su implementación como alternativa de rehabilitación; con el creciente avance tecnológico en temas como: Desarrollo de nuevos materiales, la impresión en tercera dimensión, la miniaturización de los componentes electrónicos, sistemas de monitoreo y control de mayor eficiencia, poderosos sistemas de adquisición de datos y baterías de menor tamaño con mayor duración. Todo lo anterior permitirá un desarrollo futuro de dispositivos más robustos, ligeros, eficientes, económicos y ergonómicamente más cómodos para los pacientes.

Con todas estas mejoras se vislumbran exoesqueletos de rehabilitación más variados, con mayor difusión dentro de la población hospitalaria, de menor costo que brinden mayor seguridad al paciente, que presenten mayor portabilidad, facilidad de mantenimiento y operación.

Otra visión prometedora de los exoesqueletos es ampliar su campo de aplicación en la terapia física, apoyo asistencial a las personas de la 3ra edad y que permitan mejorar la vida de personas con discapacidades físicas o genéticas.

En resumen, el potencial de los exoesqueletos va en crecimiento considerando que hace menos de un lustro se consideraban fantasías y ciencia ficción, actualmente en el 2024 son una realidad que tiende a ser parte de la vida cotidiana de las personas, esta idea resulta fascinante y retadora desde el punto de vista de la ciencia para los investigadores. El uso e implementación de estos dispositivos al interactuar con el mundo físico está cambiando la percepción de los pacientes en su calidad de vida.

Los exoesqueletos están revolucionando los tratamientos de rehabilitación y fisioterapia en el campo de la medicina moderna ya que ofrecen una alternativa viable en la asistencia y apoyo a los pacientes, con el objetivo de recuperar la movilidad, la libertad de realizar actividades básicas del día a día y la funcionalidad perdida. Todo ello en asistencia a los tratamientos de enfermedades cerebrovasculares, neuromusculares, relacionadas con la medula espinal, entre otras. Aunado a esto, también desempeñan una alternativa en el tratamiento y prevención de lesiones en pacientes diagnosticados con algún nivel de descalcificación de los huesos, lesiones musculares y afecciones articulares.

Los exoesqueletos *ReWalk*, *Ekso* y *Lokomat* son los más usados y comerciales. Estos, junto con *Indego*, están aprobados bajo los estándares de la Administración de Alimentos y Drogas de Estados Unidos (FDA) por sus siglas en inglés. Recientemente se han reportado investigaciones sobre la seguridad y costo de un nuevo diseño de robot llamado *AIDER*.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al Instituto Politécnico Nacional, donde este trabajo fue desarrollado, por el soporte financiero.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

J. R. R. conceptualización, curación de datos, investigación, metodología, software, escritura del manuscrito original. J. B. R. conceptualización, investigación, metodología, escritura del manuscrito original. L. M. H. S. análisis formal, supervisión, investigación, revisión y edición de manuscrito. J. I. E. P. H. investigación, curación de datos, validación, escritura de manuscrito original.

REFERENCIAS

- [1] C. J. Yang, J. F. Zhang, Y. Chen, Y. M. Dong, and Y. Zhang, "A review of exoskeleton-type systems and their key technologies," *Proc. Inst. Mech. Eng. C: J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 222, no. 8, pp. 1599-1612, Ago. 2008, doi: <https://doi.org/10.1243/09544062JMES936>
- [2] A. Rivera, "Tratamiento de rehabilitación en enfermedades neuromusculares," *LUXMED*, vol. 18, no. 52, 2023, doi: <https://doi.org/10.33064/52lm20233603>
- [3] C. Camilo Rodríguez-Beltrán y D. Andrés Benavides-Cárdenas "Utility and benefits of different exoskeletons for strokes diseases," *Vis. Electron.*, vol. 16, no. 1, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele/article/view/18684>
- [4] N. Robinson, R. Mane, T. Chouhan y C. Guan, "Emerging trends in BCI-robotics for motor control and rehabilitation," *Curr. Opin. Biomed. Eng.*, vol. 20, art. no. 100354, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2021.100354>
- [5] B. R. Fick, J. B. Makinson, Hardiman I Prototype for Machine Augmentation of Human Strength and Endurance. USA: General Electric Co Schenectady NY Specialty Materials Handling Products Operation, 1971.
- [6] E. Swinnen, S. Duerinck, J. P. Baeyens, R. Meeusen y E. Kerckhofs, "Effectiveness of robot-assisted gait training in persons with spinal cord injury: A systematic review," *J. Rehabil. Med.*, vol. 42, no. 6, pp. 520-526, 2010, doi: <https://doi.org/10.2340/16501977-0538>
- [7] A. Rodríguez-Fernández, J. Lobo-Prat y J. M. Font-Llagunes, "Systematic review on wearable lower-limb exoskeletons for gait training in neuromuscular impairments," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 18, no. 1, art. no. 22, 2021. doi: <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00815-5>
- [8] L. Zhang, F. Lin, L. Sun, y C. Chen, "Comparison of Efficacy of Lokomat and Wearable Exoskeleton-Assisted Gait Training in People With Spinal Cord Injury: A Systematic Review and Network Meta-Analysis," *Front. Neurol.*, vol. 13, art. no. 772660, 2022. doi: <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.772660>
- [9] D. Shi, W. Zhang, W. Zhang, y X. Ding, "A Review on Lower Limb Rehabilitation Exoskeleton Robots," *Chin. J. Mech. Eng.*, vol. 32, no. 1, art. no. 74, 2019, doi: <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0389-8>
- [10] B. Kalita, J. Narayan, y S. K. Dwivedy, "Development of Active Lower Limb Robotic-Based Orthosis and Exoskeleton Devices: A Systematic Review," *Int. J. Soc. Robotics*, vol. 13, pp. 775-793, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s12369-020-00662-9>
- [11] M. P. Pantoja-Aguilar y J. R. Salazar Garza-Treviño, "Etapas de la administración: hacia un enfoque sistémico," *Rev. Esc. Adm. Neg.*, no. 87, pp. 139-154, 2019, doi: <https://doi.org/10.21158/01208160.n87.2019.2412>
- [12] C. Chen y M. Song, "Visualizing a field of research: A methodology of systematic scientometric reviews," *PLoS One*, vol. 14, no. 10, art. no. e0223994, 2019, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223994>
- [13] Y. Zhang, X. Liu, X. Qiao, y Y. Fan, "Characteristics and Emerging Trends in Research on Rehabilitation Robots from 2001 to 2020: Bibliometric Study," *J. Med. Internet Res.*, vol. 25, art. no. e42901, 2023, doi: <https://doi.org/10.2196/42901>
- [14] M. J. Page, J. E. McKenzie, P. M. Bossuyt, I. Boutron, *et al.*, "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," *BMJ*, vol. 372, art. no. n71, 2021, doi: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- [15] L. G. Fernández Álvarez, S. Núñez Nagy y R. Cano de la Cuerda, "Exoesqueletos portables en personas con lesión medular. Revisión sistemática," *RIECS*, vol. 5, no. 1, pp. 86-105, 2020, doi: <https://doi.org/10.37536/RIECS.2020.5.1.194>

- [16] Y. Shi, W. Dong, W. Lin, y Y. Gao, "Soft Wearable Robots: Development Status and Technical Challenges," *Sensors*, vol. 22, no. 19, art. no. 7584, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/s22197584>
- [17] A. C. Picalho, E. Rosangela De Oliveira Lucas, I. S. Amorim, "AtoZ novas práticas em informação e conhecimento Lógica booleana aplicada na construção de expressões de busca Boolean logic applied to the construction of search expressions", *AtoZ*, vol. 11, pp. 1-12, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://revis-tas.ufpr.br/atoz/article/view/81838/45027>
- [18] C. Chen, "CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature," *J. Am. Soc. Inf. Sci. Tec.*, vol. 57, no. 3, pp. 359-377, 2006, doi: <https://doi.org/10.1002/asi.20317>
- [19] S. H. Chang, T. Afzal, J. Berliner, G. E. Francisco, "Exoskeleton-assisted gait training to improve gait in individuals with spinal cord injury: A pilot randomized study," *Pilot Feasibility Stud.*, vol. 4, art. no. 64, 2018, doi: <https://doi.org/10.1186/s40814-018-0247-y>
- [20] A. D. Delgado, M. X. Escalon, T. N. Bryce, W. Weinrauch, S. J. Suarez, A. J. Kozlowski, "Safety and feasibility of exoskeleton-assisted walking during acute/sub-acute SCI in an inpatient rehabilitation facility: A single-group preliminary study," *J. Spinal Cord Med.*, vol. 43, no. 5, pp. 657-666, 2020, doi: <https://doi.org/10.1080/10790268.2019.1671076>
- [21] A. S. Khan, D. C. Livingstone, C. L. Hurd, J. Duchcherer, *et al.*, "Retraining walking over ground in a powered exoskeleton after spinal cord injury: A prospective cohort study to examine functional gains and neuroplasticity," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 16, no. 1, art. no. 145, 2019, doi: <https://doi.org/10.1186/s12984-019-0585-x>
- [22] P. T. P. Oliver, "Citation Indexing for Studying Science," *Nature*, vol. 227, no. 5260, art. no. 870, 1970, doi: <https://doi.org/10.1038/227870b0>
- [23] V. A. Domínguez Ríos y M. Ángel López Santillán, "Teoría General de Sistemas, un enfoque práctico: General Systems Theory, a practical approach," *Tecnociencia Chih.*, vol. 10, no. 3, pp. 125-132, 2017, doi: <https://doi.org/10.54167/tch.v10i3.174>
- [24] J. Howick, I. Chalmers, P. Glasziou, T. Greenhalgh, *et al.*, Thornton "Explanation of the 2011 Oxford Centre for Evidence-Based Medicine (OCEBM) Levels of Evidence (Background Document)." Oxford Centre for Evidence-Based Medicine. <https://www.cebm.ox.ac.uk/resources/levels-of-evidence/explanation-of-the-2011-ocbml-levels-of-evidence>
- [25] B. Kim y A. D. Deshpande, "An upper-body rehabilitation exoskeleton Harmony with an anatomical shoulder mechanism: Design, modeling, control, and performance evaluation," *Int. J. Robot. Res.*, vol. 36, no. 4, pp. 414-435, 2017, doi: <https://doi.org/10.1177/0278364917706743>
- [26] D. Huamanchahua, D. Rosales-Gurmendi, Y. Taza-Aquino, D. Valverde-Alania, M. Cama-Iriarte, A. Vargas-Martinez, R. A. Ramirez-Mendoza, "A robotic prosthesis as a functional upper-limb aid: An innovative review," en 2021 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS), Toronto, ON, Canada, 2021, pp. 1-8, doi: <https://doi.org/10.1109/IEMTRONICS52119.2021.9422648>
- [27] T. Bützer, O. Lambercy, J. Arata, R. Gassert, "Fully Wearable Actuated Soft Exoskeleton for Grasping Assistance in Everyday Activities," *Soft Robot.*, vol. 8, no. 2, pp. 128-143, 2020, doi: <https://doi.org/10.1089/soro.2019.0135>
- [28] E. Trigili, S. Crea, M. Moise, A. Baldoni, *et al.*, "Design and experimental characterization of a shoulder-elbow exoskeleton with compliant joints for post-stroke rehabilitation," *IEEE/ASME Trans. Mech.*, vol. 24, no. 4, pp. 1485-1496, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2019.2907465>
- [29] H. Liu, J. Tao, P. Lyu, y F. Tian, "Human-robot cooperative control based on sEMG for the upper limb exoskeleton robot," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 125, art. no. 103350, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.103350>
- [30] F. Molteni, G. Gasperini, G. Cannaviello, E. Guanziroli, "Exoskeleton and End-Effector Robots for Upper and Lower Limbs Rehabilitation: Narrative Review," *PM R*, vol. 10, no. 9, pp. S174-S188, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmri.2018.06.005>
- [31] T. Du Plessis, K. Djouani, C. Oosthuizen, "A Review of Active Hand Exoskeletons for Rehabilitation and Assistance," *Robotics*, vol. 10, no. 1, art. no. 40, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/robotics10010040>
- [32] C. Y. Chu y R. M. Patterson, "Soft robotic devices for hand rehabilitation and assistance: A narrative review," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 15, no. 1, art. no. 9, 2018, doi: <https://doi.org/10.1186/s12984-018-0350-6>
- [33] R. S. Calabrò, A. Naro, M. Russo, P. Bramanti, *et al.*, "Shaping neuroplasticity by using powered exoskeletons in patients with stroke: a randomized clinical trial," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 15, no. 1, art. no. 35, 2018, doi: <https://doi.org/10.1186/s12984-018-0377-8>
- [34] T. Chen, R. Casas, P. S. Lum, "An Elbow Exoskeleton for Upper Limb Rehabilitation with Series Elastic Actuator and Cable-Driven Differential," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 35, no. 6, pp. 1464-1474, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/FTRO.2019.2930915>
- [35] Q. A. Boser, M. R. Dawson, J. S. Schofield, G. Y. Dziwenko, J. S. Hebert, "Defining the design requirements for an assistive powered hand exoskeleton: A pilot explorative interview study and case series," *Prosthet. Orthot. Int.*, vol. 45, no. 2, pp. 161-169, 2021, doi: <https://doi.org/10.1177/0309364620963943>
- [36] G. Al Rezaie, M. O. Tokhi, "Fuzzy PID control of lower limb exoskeleton for elderly mobility," en 2016 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR), Cluj-Napoca, Romania, 2016, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/AQTR.2016.7501310>

- [37] M. S. Amiri, R. Ramli, y M. F. Ibrahim, "Hybrid design of PID controller for four DoF lower limb exoskeleton," *Appl. Math. Model.*, vol. 72, pp. 17-27, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.03.002>
- [38] D. Marconi, A. Baldoni, Z. McKinney, M. Cempini, S. Crea, N. Vitiello, "A novel hand exoskeleton with series elastic actuation for modulated torque transfer," *Mechatronics*, vol. 61, pp. 69-82, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2019.06.001>
- [39] B. A. De la Cruz-Sánchez, M. Arias-Montiel, E. Lugo-González, "Development of Hand Exoskeleton Prototype for Assisted Rehabilitation," en *Mechanism Design for Robotics*, A. Gasparetto y M. Ceccarelli, Eds., Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2019, pp. 378-385, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-00365-4_45
- [40] E. S. Donkor, "Stroke in the 21st Century: A Snapshot of the Burden, Epidemiology, and Quality of Life," *Stroke Res. Treat.*, vol. 2018, art. no. 3238165, 2018. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/3238165>
- [41] M. H. Rahman, M. J. Rahman, O.L. Cristobal, M. Saad, J.P. Kenné, P.S. Archambault, "Development of a whole arm wearable robotic exoskeleton for rehabilitation and to assist upper limb movements," *Robotica*, vol. 33, no. 1, pp. 19-39, 2015, doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574714000034>
- [42] F. Aggogeri, T. Mikolajczyk, J. O'Kane, "Robotics for rehabilitation of hand movement in stroke survivors," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 11, no. 4, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814019841921>
- [43] E. Ambrosini, J. Zajc, S. Ferrante, G. Ferrigno, *et al.*, "A Hybrid Robotic System for Arm Training of Stroke Survivors: Concept and First Evaluation," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 12, pp. 3290-3300, doi: <https://doi.org/10.1109/tbme.2019.2900525>
- [44] H. Al-Fahaam, S. Davis, S. Nefti-Meziani, T. Theodoridis, "Novel soft bending actuator-based power augmentation hand exoskeleton controlled by human intention," *Intell. Serv. Robotics*, vol. 11, no. 3, pp. 247-268, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s11370-018-0250-4>