



fecha de presentación: 03/03/2025, fecha de aceptación: 01/04/2025, fecha de publicación: 01/05/2025

Adrián Camacho-Ramírez

E-mail: acamachor@uaemex.mx

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7123-6833>

Juan Carlos Ávila-Vilchis

E-mail: avilav@uaemex.mx

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1331-010X>

Adriana Herlinda Vilchis-González

E-mail: avilchisg@uaemex.mx

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5422-5593>

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Camacho-Ramírez, A., Ávila-Vilchis, J. C., & Vilchis-González, A. H. (2025). Desafíos y avances en la robótica de rehabilitación: un enfoque en la inclusión y la innovación. *Revista Sociedad & Tecnología*, 8(S1), 18-38. DOI: <https://doi.org/10.51247/st.v8iS1.558>.

==== o ====

Desafíos y avances en la robótica de rehabilitación: un enfoque en la inclusión y la innovación

RESUMEN

Este artículo de revisión tiene como objetivo resaltar la importancia del uso de robots de rehabilitación en la mejora de la calidad de vida de personas en procesos de recuperación funcional. Se realizó una revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica disponible en bases de datos especializadas, complementada con la experiencia de los autores en el campo de la robótica de rehabilitación. La revisión destaca el potencial de los robots de rehabilitación para proporcionar terapias efectivas, accesibles y personalizadas. Estos dispositivos no buscan reemplazar a los terapeutas, sino asistirlos, permitiendo aumentar la capacidad de atención y reducir los tiempos de tratamiento. Se identificaron avances significativos en el diseño de robots adaptables, la integración de tecnologías de inteligencia artificial y la implementación de sistemas de retroalimentación para mejorar la eficacia de la rehabilitación. Se concluye que la robótica de rehabilitación representa una herramienta valiosa para mejorar la calidad de vida de personas en procesos de recuperación funcional. A pesar de los desafíos existentes, como la falta de inversión en investigación y la dependencia de tecnologías extranjeras, el interés académico y la colaboración entre instituciones sugieren un futuro prometedor para el desarrollo y la implementación de estas tecnologías.

Palabras clave: Innovación, dispositivo médico, rehabilitación, robótica.

Challenges and advances in rehabilitation robotics: a focus on inclusion and innovation

ABSTRACT

This review article aims to highlight the importance of using rehabilitation robots in improving the quality of life of people undergoing functional recovery processes. A comprehensive review of the scientific and technical literature available in specialized databases was conducted, complemented by the authors' experience in the field of rehabilitation robotics. The review highlights the potential of rehabilitation robots to provide effective, accessible and personalized therapies. These devices do not seek to replace therapists, but rather to assist them, allowing for increased care capacity and reduced treatment times. Significant advances were identified in the design of adaptable robots, the integration of artificial intelligence technologies and the implementation of feedback systems to improve the effectiveness of rehabilitation. It is concluded that rehabilitation robotics represents a valuable tool to improve the quality of life of people undergoing functional recovery processes. Despite existing challenges, such as lack of investment in research and dependence on foreign technologies, academic interest and collaboration between institutions suggest a promising future for the development and implementation of these technologies.

Keywords: Innovation, medical device, rehabilitation, robotics.

==== o =====

Desafios e avanços na robótica de reabilitação: foco na inclusão e inovação

RESUMO

Este artigo de revisão tem como objetivo destacar a importância do uso de robôs de reabilitação na melhoria da qualidade de vida de pessoas em processos de recuperação funcional. Foi realizada uma revisão abrangente da literatura científica e técnica disponível em bases de dados especializadas, complementada pela experiência dos autores na área de robótica de reabilitação. A revisão destaca o potencial dos robôs de reabilitação para fornecer terapias eficazes, acessíveis e personalizadas. Esses dispositivos não buscam substituir os terapeutas, mas sim auxiliá-los, permitindo-lhes aumentar a capacidade de atenção e reduzir o tempo de tratamento. Avanços significativos foram identificados no design de robôs adaptativos, na integração de tecnologias de inteligência artificial e na implementação de sistemas de feedback para melhorar a eficácia da reabilitação. Conclui-se que a robótica de reabilitação representa uma ferramenta valiosa para melhorar a qualidade de vida de pessoas em processos de recuperação funcional. Apesar dos desafios existentes, como a falta de investimento em pesquisa e a dependência de tecnologias estrangeiras, o interesse acadêmico e a colaboração entre instituições sugerem um futuro promissor para o desenvolvimento e a implementação dessas tecnologias.

Palavras-chave: Inovação, dispositivo médico, reabilitação, robótica.

==== o =====

INTRODUCCIÓN

La discapacidad física y la pérdida de habilidades motoras tienen un profundo impacto social que va mucho más allá de la simple pérdida de movilidad; estas condiciones pueden afectar la autonomía, la autoestima o la participación en la comunidad de quienes las padecen. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (Organization, 2022), cerca del 16% de la población mundial sufre algún tipo de discapacidad que le dificulta realizar las actividades de la vida diaria (AVD) lo cual resulta en una problemática en el ámbito de la salud pública. Por

ejemplo, en México, de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020, en hay poco más de seis millones de personas con algún tipo de discapacidad, lo que representa cerca del 5% de la población total de este país (INEGI, 2020). Estos datos muestran la necesidad de atender esta problemática y la oportunidad de mejorar la calidad de vida de las personas afectadas. A través de la robótica, se han creado diferentes dispositivos, herramientas y mecanismos para la atención y tratamiento de diversas dificultades físicas que enfrentan las personas que sufren de alguna disfunción física buscando una reintegración activa en la sociedad.

La rehabilitación física no sólo tiene el objetivo de restaurar habilidades motoras, también busca reestablecer la autonomía y la calidad de vida de las personas con alguna disfunción física temporal. Cada progreso que una persona logra en su recuperación —ya sea en términos de movilidad o en su capacidad para realizar tareas cotidianas— es un paso hacia la independencia y la reintegración social. La recuperación de habilidades no debe percibirse únicamente desde la perspectiva médica, sino también como un derecho humano y una necesidad social que involucra tanto a los individuos como a sus familias y a la comunidad en general (Núñez et al., 2014). La eficacia se consigue mediante la combinación de diferentes estrategias y habilidades del terapeuta. No obstante, ejercicios orientados a las AVD determinan la eficacia en la recuperación de habilidades funcionales, sumado a la intensidad y repetitividad del tratamiento (Giangarra & Manske, 2017).

Ante el aumento de casos de lesiones, accidentes o enfermedades cerebrovasculares, la importancia de la rehabilitación crece significativamente, por lo cual, se hace necesario incrementar la versatilidad de los dispositivos usados para atender esta demanda creciente, procurando que los pacientes puedan reintegrarse a sus actividades cotidianas lo antes posible. Para atender las necesidades mencionadas, nuevas tecnologías se han desarrollado, como la realidad virtual o los sistemas robóticos (Meneses Castaño et al., 2023). Estos dispositivos permiten, además, que el proceso de rehabilitación sea menos dependiente de la disponibilidad del personal médico especializado, posibilitando que más personas accedan a terapias de alta calidad con mayor frecuencia y en entornos que pueden adaptarse a las necesidades particulares de cada paciente (Chellal et al., 2021).

Diversas investigaciones en la literatura científica muestran que los sistemas robóticos pueden ser tan efectivos como la terapia física tradicional, reduciendo no solo el tiempo de hospitalización sino también los costos asociados (Harwin et al., 2011; Masiero et al., 2014). Sin embargo, más allá de su eficacia en términos médicos, es necesario reconocer que estas innovaciones tienen un valor social trascendental al facilitar la integración de personas con discapacidad en sus actividades habituales. La posibilidad de que los pacientes participen activamente en su recuperación en un ambiente interactivo con el uso de robots de rehabilitación y terapéuticos contribuye a su autoestima y motivación, factores esenciales para su reintegración en la sociedad.

Por otro lado, el desarrollo de tecnologías para la rehabilitación también plantea una serie de desafíos éticos y sociales que deben abordarse cuidadosamente. Es fundamental que los dispositivos diseñados respeten estándares de seguridad y ergonomía, no solo para evitar

lesiones, sino para asegurar que las personas puedan utilizarlos con confianza y dignidad (Pisla et al., 2021). Además, es necesario que las políticas públicas apoyen el acceso equitativo a estas tecnologías, garantizando que las personas de todas las clases sociales, géneros y edades puedan beneficiarse de los avances en rehabilitación unes

Dispositivos médicos para rehabilitación

El desarrollo de dispositivos robóticos para rehabilitación física ha revolucionado la forma en que se pueden abordar los tratamientos de recuperación motora. Estos sistemas mecánicos, electrónicos y computarizados están diseñados no solo para realizar funciones que apoyen la recuperación física, sino también para ofrecer una experiencia de rehabilitación integral que pueda incluir retroalimentación visual y táctil, lo cual es crucial para el proceso de aprendizaje y readaptación del paciente (Cooper et al., 2008; Zhang et al., 2013). Esto ha permitido que su uso pueda ser llevado en terapias de rehabilitación.

Un robot o dispositivo rehabilitador tiene como objetivo ser un sistema no invasivo, de control relativamente fácil, con poco riesgo para el paciente y efectivo en rehabilitación (Costa & Díez, 2019). Para lograr esto, los dispositivos deben poder detectar los movimientos del usuario mediante sensores y ajustarse en tiempo real mediante actuadores para cubrir sus necesidades específicas, promoviendo un tratamiento más personalizado, lo que es fundamental para el tratamiento de rehabilitación.

Los robots para rehabilitación son especializados, es decir, se diseñan para atender una afectación en una parte específica del cuerpo humano (brazos, manos o piernas, por ejemplo) o para atender tareas particulares (marcha, plataformas vibratorias, plataformas de equilibrio, ergómetros y cicloergómetros modificados, isocinéticos, bipedestadores, sillas de ruedas o exoesqueletos, por ejemplo) (Laut et al., 2016).

La rehabilitación robótica es altamente efectiva porque se basa en movimientos repetitivos y supervisados, que son esenciales para la readaptación neuromuscular. Estos movimientos programados y controlados ayudan a mejorar la coordinación y el tono muscular, además de incrementar la independencia funcional del paciente. Los robots permiten, además, la reproducción exacta de ejercicios de rehabilitación, asegurando una terapia constante y medible, lo que a su vez mejora la calidad y el alcance de la asistencia (Marchal-Crespo & Reinkensmeyer, 2009).

El objetivo de la rehabilitación robótica no es el de reemplazar al terapeuta físico, sino el de apoyarle en la realización de su trabajo, buscando lograr una rehabilitación completa y una reducción del tiempo empleado en ella (Díaz et al., 2011), ya que ofrece ciertas ventajas como la reproducibilidad de ejercicios, la programación orientada a tareas específicas, la progresión cuantificada, las actividades lúdicas, la reeducación motriz, el incremento en la fuerza y tono muscular, la mejoría de la coordinación y una mayor independencia funcional.

Un sistema robótico de rehabilitación debe ser programado y supervisado por el profesional de la salud (terapeuta físico), que decidirá, en función de la condición física de cada paciente y de un protocolo de rehabilitación apropiado, las tareas que el robot deberá realizar.

La rehabilitación robótica presenta desventajas, como el alto costo de construcción y mantenimiento del sistema, el alto nivel de especialización para su desarrollo y operación, el requerir espacio físico apropiado, la capacitación que requiere el operador, o la dependencia de sistemas computacionales y de energía eléctrica (Cooper et al., 2008). La Figura 1 ilustra algunas ventajas y desventajas de las rehabilitaciones robótica y tradicional.

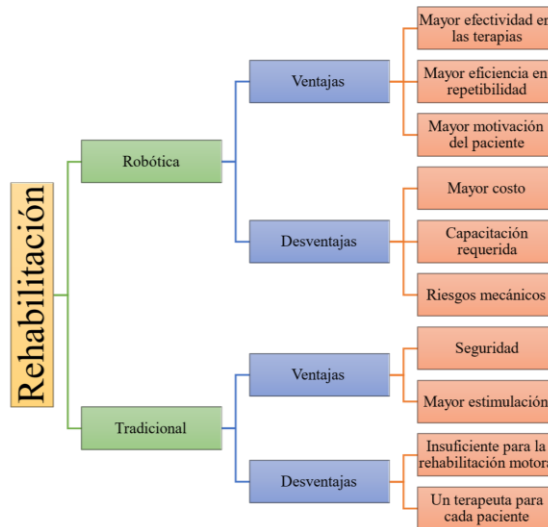


Figura 1. Rehabilitación robótica y rehabilitación tradicional.

La selección de pacientes para la rehabilitación robótica es un aspecto crucial, ya que no todos los pacientes son candidatos adecuados para este tipo de tratamiento. Los pacientes deben cumplir con ciertas características específicas en cuanto a su condición médica y nivel de movilidad para beneficiarse plenamente de estos dispositivos, ya que la utilización de robots de rehabilitación podría, en ciertos casos, requerir terapia complementaria. La decisión sobre el uso de tecnología robótica debe basarse en la tarea específica que se busca desarrollar, así como en el análisis costo-beneficio que esta rehabilitación puede ofrecer. Una valoración por el profesional de la salud es requerida para decidir sobre el uso de la tecnología robótica.

La robótica aplicada a la rehabilitación física ha emergido como una alternativa innovadora que complementa los principios fundamentales de la terapia convencional. Uno de los objetivos principales para la creación e implementación de los sistemas robóticos de rehabilitación es incluir características de la terapia convencional como parte de su desempeño, de tal forma que estos puedan reproducir las AVD, incorporando el rango de movimiento o ROM (del inglés Range of Motion) pleno y diferentes estímulos sensoriales y motores. Así, los sistemas robóticos de rehabilitación ofrecen una plataforma que permite a los pacientes practicar movimientos específicos de manera controlada, repetitiva e intensiva, optimizando el proceso

de readaptación física y proporcionando una experiencia lo más cercana posible a la terapia convencional, pero con mayor precisión y repetibilidad, entre otras ventajas.

El objetivo del presente trabajo es el de resaltar la importancia de la robótica de rehabilitación en la actualidad y cómo se puede convertir en un factor decisivo para mejorar, relativamente rápidamente, la calidad de vida de los pacientes que se encuentran en procesos de rehabilitación física.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevó a cabo una exhaustiva revisión de la literatura existente sobre robótica, eligiendo un país como caso de estudio y centrándose específicamente en la robótica de rehabilitación y los dispositivos desarrollados en dicho país, con el objetivo de comprender el estado actual y las limitaciones que se enfrentan en este campo. Este análisis permite evaluar el estado actual del campo en el país, identificar las barreras que limitan su avance y explorar las innovaciones logradas a nivel nacional en colaboración con instituciones internacionales. A través de esta revisión, se busca resaltar tanto los desafíos financieros y tecnológicos que enfrenta México como las oportunidades y recomendaciones para mejorar la accesibilidad y eficacia de la robótica de rehabilitación. De este modo se ha tratado de presentar algunas recomendaciones que buscan no solo mejorar la funcionalidad técnica, sino también facilitar la inclusión social y la independencia de los pacientes, promoviendo el acceso a una rehabilitación más intensiva y adaptada a sus necesidades individuales.

Caso de estudio: México

La recolección de información se dividió tres secciones.

En la primera sección se atienden las barreras que afectan el avance de la robótica médica en México, destacando aspectos como la escasez de recursos financieros, la falta de inversión en investigación y desarrollo y las dificultades para adquirir componentes avanzados a precios accesibles. Además, el contexto social y la limitada infraestructura tecnológica en diversas áreas del país presentan desafíos adicionales. Estos factores subrayan la necesidad de políticas de apoyo y programas de inversión que faciliten el acceso a la robótica de rehabilitación, particularmente en regiones con recursos limitados.

En la segunda sección, se examinan los dispositivos de rehabilitación desarrollados a nivel nacional, entre los cuales tres se han creado en colaboración con instituciones internacionales. Esta cooperación ha permitido el acceso a tecnologías avanzadas y conocimientos especializados que, de otra forma, serían difíciles de adquirir localmente. Los dispositivos desarrollados reflejan un esfuerzo por adaptar las tecnologías de rehabilitación a las necesidades y características de pacientes mexicanos, permitiendo una mayor eficacia y accesibilidad en la recuperación de capacidades motoras.

En la tercera sección, se abordan las recomendaciones para diseñar robots de rehabilitación en México, destacando la importancia de modelos matemáticos y algoritmos de control avanzados

que permiten una adaptación personalizada a las necesidades del paciente. Estos sistemas no solo restauran habilidades motoras, sino también promueven la inclusión y la independencia, mejorando la calidad de vida y participación social de las personas.

RESULTADOS

México, como país en vías de desarrollo, enfrenta diversos retos en su esfuerzo por integrar tecnología avanzada en el sector salud, particularmente asociados con la robótica médica y los dispositivos de rehabilitación. A continuación, se presentan algunos de los principales obstáculos que México debe enfrentar para avanzar en la inclusión y desarrollo de tecnología de rehabilitación.

Desafíos para la robótica médica

Estos desafíos no solo afectan la capacidad tecnológica del país, también tienen un impacto profundo en la vida de miles de personas que dependen de estas innovaciones para mejorar su calidad de vida y recuperar su movilidad.

Dependencia de tecnologías extranjeras: Una gran parte de la tecnología utilizada en México tiene su origen en otros países, lo que genera una dependencia que limita la autonomía en investigación y desarrollo y, expone a las instituciones mexicanas a condiciones y restricciones impuestas desde su exterior. Esto se observa claramente en sectores como la industria automotriz, o los sectores farmacéutico y aeroespacial, donde el acceso a tecnología avanzada es fundamental pero, al depender del exterior, se dificulta la creación de soluciones accesibles y adaptadas a las necesidades locales (Tellaeché, 2020).

Brecha digital: La desigualdad en el acceso a tecnología es un desafío significativo en la sociedad mexicana, especialmente en zonas rurales, donde el acceso a internet y a la infraestructura tecnológica es limitado. Esta brecha impide que las comunidades más vulnerables tengan acceso a tecnologías de rehabilitación que podrían mejorar sus condiciones de vida, promoviendo la desigualdad social y limitando las oportunidades de inclusión y desarrollo (Cortés & Islas, 2021).

Educación tecnológica: La rápida evolución de la tecnología presenta un desafío para el sistema educativo mexicano, que a menudo se ve rezagado en términos de contenido y capacitación debido a la falta de recursos financieros. La obsolescencia de material educativo y la falta de capacitación docente reducen las oportunidades para que las y los jóvenes estudiantes puedan acceder a carreras en tecnología y robótica, limitando así el desarrollo de talento nacional y dificultando que el país avance en sectores innovadores (Secretaría de Educación Pública, 2023).

Escasa inversión en investigación y desarrollo: A pesar de contar con dependencias gubernamentales y programas que apoyan a jóvenes e investigadores para realizar estudios de posgrado e investigación como el CONAHCYT (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías), el COMECYT (Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología), el SNII (Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores) y la SEP (Secretaría de Educación Pública) por

mencionar algunos, la inversión pública no es suficiente para que el país pueda crear tecnologías innovadoras y de vanguardia. A título de ejemplo, la inversión en investigación y desarrollo en 2021 en México fue del 0.28% del PIB (Producto Interno Bruto) del país, en comparación con el 4.93% por parte de Corea del Sur (RED DE INDICADORES DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA, 2023).

Escasez de personas calificadas: Al combinar los desafíos antes mencionados con problemas como la emigración de talento, la falta de capacitación especializada, las barreras de género o las desigualdades socioeconómicas, se genera una limitación en la existencia de profesionales en áreas fundamentales para el desarrollo tecnológico como ingeniería, robótica médica, ciencia de datos, inteligencia artificial o procesos de manufactura, entre otras. Esto se puede ver más claramente en el número de investigadores dedicados a investigación y desarrollo por cada millón de personas que, en el caso de México, en el año 2020 era de 358 mientras que en Estados Unidos, Canadá y Singapur era de 4452, 5076 y 7225, respectivamente (*World Bank Open Data*, s. f.).

Inversión y financiamiento: El poco o nulo interés por parte de sectores públicos y privados para la generación de tecnología, hace que los laboratorios, centros de investigación, equipos de investigadores y equipo especializado sean insuficientes en México ante la demanda del mercado mundial. La falta de inversión privada puede ocasionar la desaparición de proyectos, la falta de creación de patentes e inventos prometedores y, cuando se otorga algún tipo de financiamiento, este está dirigido a cubrir necesidades específicas (Góngora Jaramillo, 2021).

Muchos de los robots para rehabilitación existentes son relativamente caros, con valor de 50 000 a 100 000 USD por unidad (Wagner et al., 2011). Por esta razón, resulta imperativo desarrollar sistemas robóticos que sean más asequibles y adecuados a las circunstancias actuales de cada persona y al sector salud de cada país. Diseñar y desarrollar un robot o dispositivo de rehabilitación requiere una inversión sustancial y, debido a los desafíos antes mencionados, muchos proyectos solo quedan en diseño o en prototipos de laboratorio. Una estrategia viable para abordar las limitaciones económicas es la implementación de componentes de bajo costo como actuadores, sensores, microcontroladores y partes mecánicas fabricadas con impresoras 3D. De esta forma, y con un enfoque más humanista, más personas podrían beneficiarse, lo que fortalecería la inclusión social y reduciría las barreras de acceso a la salud.

A pesar de los retos mencionados, el creciente interés por la robótica de rehabilitación en universidades y centros de investigación en México sigue creciendo. A través de colaboraciones académicas e iniciativas gubernamentales, se busca superar las barreras actuales para que, en el futuro, más personas puedan acceder a tecnologías de rehabilitación asequibles, desarrolladas por talento local y adaptadas a la realidad del país.

A continuación, se presentan algunos dispositivos diseñados y desarrollados en México, creados en centros de investigación o universidades.

Robots de rehabilitación desarrollados en México

Hoy en día, el concepto de robot para rehabilitación abarca un amplio rango de dispositivos mecatrónicos, que van desde las prótesis inteligentes hasta los robots de asistencia utilizados para ayudar en el proceso de rehabilitación. Estos robots no solo han podido colaborar en el esfuerzo físico de la terapia, también han ayudado a acortar el tiempo de recuperación del paciente.

Algunos aspectos significativas de la rehabilitación robótica reportados en la literatura comprenden aplicaciones de monitoreo con realimentación del movimiento en terapias, estrategias para la recuperación motriz de pacientes que han sufrido un accidente cerebro vascular (O'Dell et al., 2009), implementación de computadores para lograr aplicaciones de realidad virtual (Levac & Galvin, 2013) y robots sociales (Leite et al., 2013), por ejemplo.

Los dispositivos robóticos para rehabilitación pueden ser divididos en dos tipos: prótesis y órtesis. Una prótesis es un sistema o aparato artificial que se coloca o se implanta en el cuerpo del ser humano para sustituir o potenciar un miembro dañado o faltante. Las órtesis son dispositivos o soportes ortopédicos usados para asistir, alinear, prevenir o corregir deformidades o mejorar algunas funciones de movimiento de las partes del cuerpo humano. Las órtesis pueden ser divididas en dos categorías principales:

Categoría 1: Dispositivos que son hechos para alinear el efector final con el usuario como en (Vidrios-Serrano et al., 2018) que realiza la integración de un sistema robótico de terapia ocupacional para extremidades superiores con estimulación visual/táctil por medio de juegos, permitiendo una interacción, relativamente sencilla, del usuario mediante entornos virtuales. Una ventaja de esta técnica es que la interfaz es no invasiva para el paciente. Otro ejemplo se puede mostrar en (Camacho-Ramirez et al., 2022) que presenta un dispositivo de rigidez ajustable para antebrazo y muñeca, el cual realiza movimientos pasivos, activo-asistidos y activos. La rigidez se modifica, por valoración del terapeuta, de acuerdo con la etapa de rehabilitación en la que se encuentre el paciente, dicha rigidez varía por medio de dos motores lineales, dos resortes y una serie de cables y poleas para redireccionar el movimiento.

Categoría 2: Aquí están los exoesqueletos o dispositivos electromecánicos que están alineados a alguna de las extremidades del cuerpo humano. Los robots de tipo exoesqueleto presentan mayores complicaciones, que los de la categoría 1, en su uso debido a la interacción que tienen con el paciente, pero su precisión es aceptable en el control del movimiento. El objetivo de los exoesqueletos es el de asistir en los movimientos o incrementar fuerza, velocidad y rendimiento. Algunos sistemas que se han diseñado y desarrollado en México son el ERMIS que es un dispositivo para la rehabilitación del miembro superior que realiza rehabilitación pasiva para el hombro, codo y muñeca; se implementó una metodología que verifica la eficacia del exoesqueleto a través de la realización de tareas específicas (Cruz Martínez & Z. -Avilés, 2020). Un exoesqueleto de tres grados de libertad para el miembro superior derecho se diseñó en (Khin et al., 2020) con base en las medidas antropométricas de una persona mexicana, el dispositivo probó su correcto funcionamiento en una persona de 170 cm y 65 kg para verificar la flexión y extensión a lo largo del ROM del codo.

Algunos proyectos (ver

Tabla 1) desarrollados en universidades y centros de investigación mexicanos, representan un avance importante hacia una mayor inclusión y autonomía de las personas.

Tabla 1.

Características de robots de rehabilitación diseñados y desarrollados en México

Dispositivo	Autores	Parte del cuerpo	Características	Tipo	Institución
Sistema de rehabilitación mediante interfaz háptica	Vidrios-Serrano et al., 2018	Miembro superior	Movimiento del brazo mediante la interacción con objetos virtuales	Prototipo	Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Sistema de rehabilitación para antebrazo y muñeca	Camacho-Ramirez et al., 2022	Antebrazo y muñeca	Pronación y supinación del miembro afectado a través de trayectorias y torques establecidos	Prototipo	Universidad Autónoma del Estado de México
Sistema robótico paralelo para miembro inferior	Valdez et al., 2020	Miembro inferior	Trayectorias establecidas en el pie que ayudan a simular la marcha humana	Diseño	CENTROGEO, Tecnológico de Monterrey e Instituto Politécnico Nacional
Exoesqueleto para miembro superior	Méndez et al., 2017	Hombro	Exoesqueleto para rehabilitación de hombro, diseñado para una población mexicana objetivo	Diseño	Universidad Tecnológica de la Mixteca
ERMIS	Cruz Martínez & Z. -Avilés, 2020	Miembro superior	Realiza movimientos de rehabilitación de hombro en sus tres tipos de movimiento, codo en flexión-extensión y muñeca en pronación-supinación	Prototipo	Universidad Autónoma del Estado de México
Exoesqueleto para miembro superior	Khin et al., 2020	Brazo derecho	Movimiento de abducción-aducción en hombro y flexión-extensión en codo validado en simulación en MATLAB y FUSION 360	Prototipo	Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Exoesqueleto para miembro inferior	Veléz-Díaz et al., 2020	Miembro inferior	Análisis hecho a través de elemento finito en SolidWorks y análisis numérico en MATLAB de un exoesqueleto para la ayuda de la marcha humana	Diseño	Universidad de Colima y Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Exoesqueleto para miembro superior a través de interfaces físicas	González-Mendoza et al., 2022	Miembro superior	Exoesqueleto que realiza ejercicios pasivos y activos, diseñado utilizando el ISO09241 para garantizar seguridad, ROM y acoplamiento con el usuario	Diseño	CINVESTAV e Instituto Nacional de Rehabilitación
Exoesqueleto para miembro superior para rehabilitación aptica	Pérez-San Lázaro et al., 2021	Miembro inferior	Exoesqueleto diseñado para las dimensiones de niños entre 30 y 66 kg, simula movimientos de cadera, rodilla y tobillo	Diseño y prototipo	Instituto Politécnico Nacional y Tecnológico de Monterrey
Exoesqueleto para antebrazo y muñeca	Martínez-Peón et al., 2021	Antebrazo y muñeca	Modelado y control de un exoesqueleto de 3 grados de libertad, considera espasticidad de pacientes	Diseño	Instituto Tecnológico de Nuevo León, CINVESTAV, Instituto Tecnológico Superior de Poza Rica
Exoesqueleto para mano	De la Cruz-Sánchez et al., 2022	Mano	Rehabilitación pasiva y activa para mano mediante movimientos básicos con trabajo bimanual	Prototipo	Universidad Tecnológica de la Mixteca y École de Technologie Supérieure (Canadá)
Robot dirigido por cables para brazo	Hernández et al., 2018	Miembro superior	Diseño de robot manipulador, realiza ejercicios de rehabilitación para brazo, validado por simulaciones numéricas	Diseño	Instituto Politécnico Nacional, CIMAT y University of Cassino (Italia)

Exoesqueleto para mano	SandovalGonzalez et al., 2016	Mano	Robot de rehabilitación para movimientos pasivos y activos, se somete a estudio clínico para evaluar su efectividad	Prototipo	Tecnológico Nacional de México, Universidad Autónoma del Estado de México y Scuola Superiore Sant'Anna (Italia)
ROBMMOR	Navarrete et al., 2018	Rodilla	Manipulador robótico para rehabilitar rodilla en flexión-extensión, movimientos pasivos suficiente velocidad para garantizar los ejercicios	Prototipo	Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz e INFOTEC

La revisión de la literatura sobre robótica de rehabilitación en México pone en evidencia que la mayoría de los dispositivos desarrollados se encuentran en etapas de prototipo y, en muchos casos, están fabricados con componentes económicos. Esta realidad responde tanto a las limitaciones de recursos como al objetivo de crear soluciones más accesibles y adaptadas a las necesidades de pacientes locales. Algunos de los diseños son analizados mediante simulaciones numéricas antes de su implementación práctica, lo que permite evaluar su viabilidad y efectividad sin incurrir en costos de fabricación.

Recomendaciones para el Diseño y Desarrollo de Robots de Rehabilitación: Enfoque en Accesibilidad y Personalización

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se detallan las recomendaciones que los autores han señalado para guiar el diseño y desarrollo de nuevos sistemas de rehabilitación robótica. Estas directrices buscan optimizar la funcionalidad y accesibilidad de los dispositivos, garantizando que cumplan con los estándares necesarios para atender de manera efectiva y segura a los pacientes en el contexto mexicano.

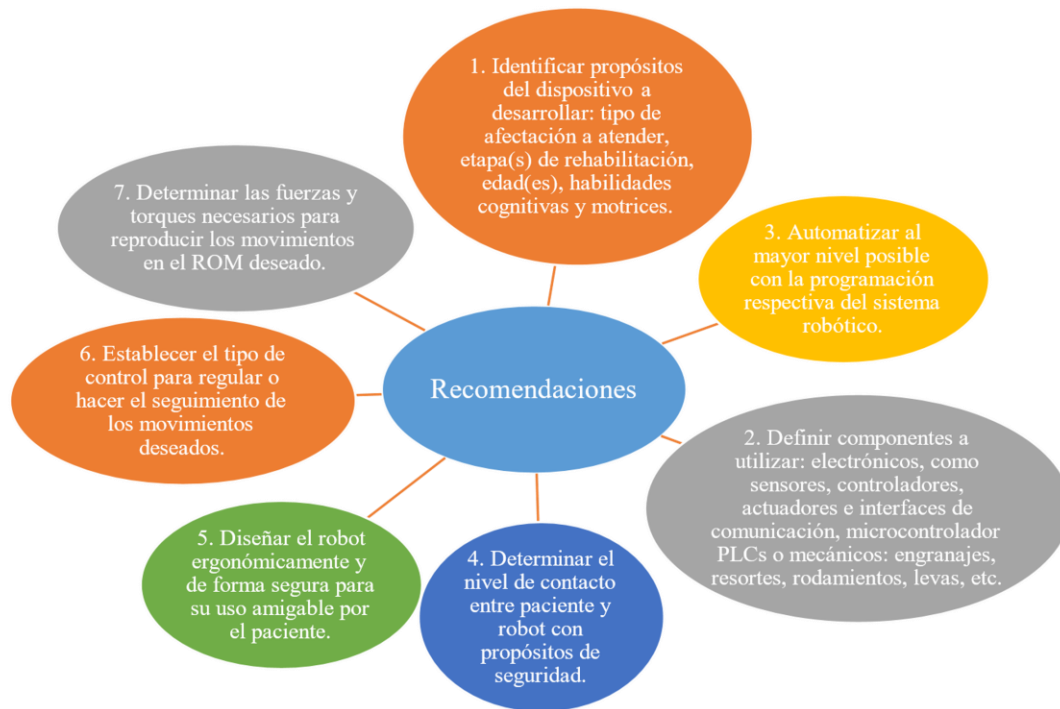


Figura 2. Recomendaciones de diseño y construcción de dispositivos robóticos de rehabilitación.

El desarrollo de robots de rehabilitación es un proceso complejo que implica múltiples aspectos y requiere atención detallada en cada etapa de su diseño y construcción. Aunque el diseño de estos dispositivos se fundamenta en modelos matemáticos precisos y algoritmos de control avanzados, su relevancia va más allá del ámbito técnico, impactando de manera significativa en la vida de las personas y en la sociedad en general.

Los modelos matemáticos no son simplemente formulaciones abstractas; representan herramientas esenciales que permiten a los robots reproducir movimientos y fuerzas de manera controlada y segura. La creación de estos modelos es un paso crítico y arduo que proporciona una base necesaria para optimizar el diseño y garantizar una interacción eficaz entre el robot y el paciente. Este enfoque permite que los dispositivos se adapten a las necesidades individuales de cada usuario (fuerza, rango de movimiento y velocidad), ofreciendo un rango de movimiento adecuado y una retroalimentación sensorial y motriz, elementos clave para una experiencia de rehabilitación enriquecedora.

Un enfoque social de la implementación de estos modelos y algoritmos subraya su papel en la mejora de la calidad de vida de los pacientes. La tecnología de rehabilitación no solo busca restaurar habilidades motoras, sino también devolver a las personas su independencia, aumentando así su capacidad para participar de manera activa en la sociedad. Gracias a la precisión de los modelos matemáticos y a los algoritmos de control en lazo cerrado, los robots pueden monitorizar en tiempo real las respuestas de los usuarios y ajustar sus movimientos y fuerzas para mantenerlos dentro de parámetros seguros. Esto es esencial para proteger al

paciente y garantizar una rehabilitación sin riesgos, especialmente en terapias intensivas donde cada repetición cuenta.

La integración de controles avanzados, como el control de fuerza, el control de impedancia y las redes neuronales, permite que los robots se adapten de manera más precisa a las características de cada persona, ofreciendo un tratamiento personalizado que se ajuste a las diferentes etapas y necesidades de la rehabilitación (pasiva, activa o activa asistida, por ejemplo). Este nivel de personalización no solo mejora los resultados terapéuticos, sino que también contribuye a la motivación del paciente, al proporcionarle una experiencia de rehabilitación que respeta su ritmo y capacidades individuales; más aún cuando el dispositivo robótico se complementa con ambientes de realidad virtual o aumentada.

El impacto social de estos desarrollos es significativo. Los robots de rehabilitación basados en modelos matemáticos y algoritmos de control permiten que personas con limitaciones físicas accedan a tratamientos más intensivos y supervisados, lo que a su vez incrementa sus oportunidades de recuperar movilidad y funcionalidad en menos tiempo. La rehabilitación no es solo un proceso médico, sino un derecho que apoya la inclusión social y la igualdad de oportunidades.

DISCUSIÓN

Además de México, otros países enfrentan desafíos significativos para integrar tecnologías avanzadas en el sector de rehabilitación médica, debido a su dependencia de tecnologías extranjeras, brechas en acceso tecnológico, educación inadecuada en áreas técnicas o baja inversión en investigación y desarrollo. Estas limitaciones impiden el acceso inclusivo a tecnologías de rehabilitación, especialmente en comunidades vulnerables. Sin embargo, existe una oportunidad de cambio impulsada por el interés creciente en robótica de rehabilitación en universidades y centros de investigación. El uso de componentes de bajo costo, la fabricación local de dispositivos y la inteligencia del ser humano representan factores reales para hacer la tecnología de rehabilitación más accesible y adaptada a las necesidades de cada país. A largo plazo, las colaboraciones entre instituciones académicas, centros de investigación y gobiernos pueden ayudar a superar los obstáculos aquí discutidos, promoviendo la inclusión social y mejorando la calidad de vida de personas en necesidad de rehabilitación para su reincorporación a las AVD.

Si bien la *Tabla 1* muestra el desarrollo de prototipos accesibles y adaptados a las necesidades de rehabilitación robótica en México, destacando la creatividad de investigadores para superar limitaciones de recursos mediante componentes económicos y simulaciones numéricas, estrategias similares pueden implementarse en otros países en condiciones parecidas. La mayoría de los dispositivos reportados, como prótesis, órtesis y exoesqueletos, se encuentran en fases de diseño y prueba, lo cual permite evaluar su viabilidad sin los altos costos de producción a gran escala. A pesar de los desafíos financieros y tecnológicos, el creciente interés en esta área sugiere un potencial significativo para mejorar la calidad de vida de personas con

movilidad reducida o funcionalidad en México, impulsando tanto su autonomía como su inclusión social a través de dispositivos de rehabilitación cada vez más avanzados y accesibles.

El diseño de robots de rehabilitación debe priorizar la seguridad, accesibilidad y adaptación a las necesidades del paciente. Las recomendaciones clave incluyen movimientos controlados dentro de rangos seguros para evitar lesiones, el uso de componentes compactos y ligeros para facilitar el uso, la portabilidad y reducir la invasión, así como el uso de actuadores eficientes que ofrezcan un buen rendimiento con bajo ruido. Además, se sugiere utilizar modelos matemáticos simplificados para facilitar el control y reducir la complejidad del sistema. La suavidad en los movimientos y una interacción adaptable permiten ajustar el nivel de asistencia en las distintas etapas de la rehabilitación, promoviendo una experiencia amigable y efectiva para el paciente.

Actualmente, diferentes investigadores apreciaron un panorama de amplio desarrollo e influencia en el sector salud para la rehabilitación robótica (Yakub et al., 2014). Entender la tarea de rehabilitación robótica no es tarea fácil y, para hacerlo, se debe responder una serie de preguntas como se afirma en (Hidler & Lum, 2011). Algunas preguntas de interés son las que se muestran en la Figura 3.



Figura 3. Robótica en rehabilitación: barreras, metas y requisitos para nuevos dispositivos.

Es necesario mencionar que la Organización de las Naciones Unidas en su AGENDA 2030 (UNESCO, 2017) establece una serie de recomendaciones donde se incluyen algunas para el desarrollo de nuevos dispositivos médicos y donde se destacan las siguientes:

- Asequibles para la mayoría de la población
- Ligeros

- Portátiles

A partir de diversos estudios y de los avances alcanzados, se espera que los robots de rehabilitación tengan cada vez más funciones como aprender del paciente, detectar y reconocer cada día nuevos objetos, reconocer posturas y movimientos individuales, interactuar de forma visual y usar más tecnologías táctiles (Yakub et al., 2014). De igual forma, se podrán integrar robots con telepresencia, lo que ofrecería la posibilidad de la telerehabilitación (Kristoffersson et al., 2011). Al mismo tiempo, se deberá brindar cada vez más seguridad, privacidad, intimidad y autonomía al paciente.

LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Este estudio se basa en una revisión sistemática de la literatura existente, lo que conlleva ciertas limitaciones inherentes a este tipo de metodología. En primer lugar, la selección de estudios incluidos en la revisión puede estar sujeta a sesgos, ya que la disponibilidad y accesibilidad de las publicaciones pueden variar. Además, la calidad y rigor metodológico de los estudios revisados pueden influir en los resultados y conclusiones de esta revisión. La diversidad de enfoques y metodologías utilizadas en los estudios primarios dificulta la comparación directa y la síntesis de los hallazgos. Por último, la revisión se limita a la literatura publicada en bases de datos específicas y en idiomas particulares, lo que podría excluir estudios relevantes publicados en otras fuentes o idiomas.

ESTUDIOS FUTUROS

Para superar las limitaciones de este estudio y ampliar nuestra comprensión de la robótica de rehabilitación, se proponen varias líneas de investigación futura. En primer lugar, se necesitan estudios con muestras más grandes y diversas para confirmar la generalización de los hallazgos. Además, se sugiere investigar el impacto de la robótica de rehabilitación en diferentes poblaciones clínicas, como pacientes con lesiones medulares o enfermedades neurodegenerativas. Sería valioso explorar la combinación de la robótica con otras terapias, como la realidad virtual o la estimulación eléctrica, para potenciar los efectos de la rehabilitación. Asimismo, se recomienda realizar estudios longitudinales para evaluar los efectos a largo plazo de la intervención robótica y su impacto en la calidad de vida de los pacientes. Finalmente, se insta a desarrollar nuevas tecnologías robóticas que sean más accesibles, personalizables y adaptadas a las necesidades individuales de los pacientes.

RECONOCIMIENTO

El primer autor desea expresar su sincero agradecimiento al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por el apoyo financiero brindado a través de la subvención ESYCA2023-14019, que hizo posible la realización de esta investigación. Asimismo, extendemos nuestro profundo agradecimiento a todos los colegas que compartieron su valiosa experiencia y conocimientos, enriqueciendo significativamente este trabajo. Reconocemos especialmente la colaboración de los bibliotecarios, quienes facilitaron el acceso a recursos

bibliográficos esenciales y brindaron un apoyo inestimable durante el proceso de investigación. Su dedicación y profesionalismo fueron fundamentales para el desarrollo de este estudio.

CONTRIBUCIÓN DE LOS COAUTORES

- **Adrián Camacho-Ramírez:** Fue el responsable de la conceptualización, metodología, análisis de datos, redacción del borrador original.
- **Juan Carlos Ávila-Vilchis:** Se encargó de investigación, recopilación de datos, revisión y edición del manuscrito.
- **Adriana H. Vilchis-González:** Realizó la validación, supervisión, revisión y edición del manuscrito, administración del proyecto.

CONCLUSIONES

El campo de la rehabilitación robótica en ha ido en aumento en los últimos años a pesar de los desafíos mencionados. De igual forma, los sistemas creados se vuelven cada vez más complejos, debido a que su desarrollo involucra varias ramas de la ingeniería como la electrónica, los sistemas de comunicación, la mecánica, el control, la instrumentación y el área médica de rehabilitación, por ejemplo. Estos sistemas de rehabilitación no pretenden sustituir al terapeuta físico; pero sí buscan asistirlo y, en consecuencia, disminuir su carga de trabajo permitiendo la atención de un mayor número de pacientes en menor tiempo con, al menos, la misma eficacia que un proceso de rehabilitación convencional.

El desarrollo de la rehabilitación robótica ha avanzado pese a diversos obstáculos económicos y técnicos. Los sistemas diseñados contribuyen al tratamiento, apoyando al personal médico y mejorando la eficiencia de las terapias. Estos dispositivos no solo ofrecen beneficios médicos, también promueven la inclusión y la participación de los pacientes en la sociedad. Sin embargo, para que estos avances se consoliden, es crucial aumentar la inversión en tecnología, la formación de talento y las políticas públicas que fomenten el acceso equitativo a estas innovaciones.

La robótica de rehabilitación, al igual que otras tecnologías, ha ido incorporando cada vez más significativamente las implicaciones sociales y humanistas de su desarrollo y uso en diferentes comunidades.

Conflictos de intereses:

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

REFERENCIAS

- Camacho-Ramirez, A., Ávila-Vilchis, J. C., Saldivar, B., Vilchis-González, A. H., & Jacinto-Villegas, J. M. (2022). Adjustable Stiffness-Based Supination–Pronation Forearm Physical Rehabilitator. *Applied Sciences*, 12(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/app12126164>
- Chellal, A. A., Lima, J., Fernandes, F. P., Gonçalves, J., Pacheco, M. F., & Monteiro, F. C. (2021). Overview of Robotic Based System for Rehabilitation and Healthcare. En A. I. Pereira, F. P. Fernandes, J. P. Coelho, J. P. Teixeira, M. F. Pacheco, P. Alves, & R. P. Lopes (Eds.), *Optimization, Learning Algorithms and Applications* (pp. 515-530). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91885-9_38

- Cooper, R. A., Dicianno, B. E., Brewer, B., LoPresti, E., Ding, D., Simpson, R., Grindle, G., & Wang, H. (2008). A perspective on intelligent devices and environments in medical rehabilitation. *Medical Engineering & Physics*, 30(10), 1387-1398. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2008.09.003>
- Cortés, F. V., & Islas, D. S. C. (2021). La brecha digital como una nueva capa de vulnerabilidad que afecta el acceso a la educación en México. *Academia y Virtualidad*, 14(1), Article 1. <https://doi.org/10.18359/ravi.5395>
- Costa, Ú., & Díez, S. (2019). Robótica para la rehabilitación. *Sobre ruedas, Tech. Rep*, 102, 16-20. https://siidon.guttman.com/files/sr_102_robotica_costa_diez.pdf
- Cruz Martínez, G. M., & Z. -Avilés, L. A. (2020). Design Methodology for Rehabilitation Robots: Application in an Exoskeleton for Upper Limb Rehabilitation. *Applied Sciences*, 10(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/app10165459>
- De la Cruz-Sanchez, B. A., Arias-Montiel, M., & Lugo-González, E. (2022). EMG-controlled hand exoskeleton for assisted bilateral rehabilitation. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 42(2), 596-614. <https://doi.org/10.1016/j.bbe.2022.04.001>
- Díaz, I., Gil, J. J., & Sánchez, E. (2011). Lower-Limb Robotic Rehabilitation: Literature Review and Challenges. *Journal of Robotics*, 2011(1), 759764. <https://doi.org/10.1155/2011/759764>
- Giangarra, C. E., & Manske, R. C. (2017). *Clinical Orthopaedic Rehabilitation: A Team Approach E-Book*. Elsevier Health Sciences.
- Góngora Jaramillo, E. M. (2021). Financiamiento por concurso para investigación científica en México: Lógicas de competencia y experiencias de científicos. *Revista mexicana de investigación educativa*, 26(88), 149-172. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmie/v26n88/1405-6666-rmie-26-88-149.pdf>
- González-Mendoza, A., Quiñones-Urióstegui, I., Salazar-Cruz, S., Perez-Sanpablo, A.-I., López-Gutiérrez, R., & Lozano, R. (2022). Design and Implementation of a Rehabilitation Upper-limb Exoskeleton Robot Controlled by Cognitive and Physical Interfaces. *Journal of Bionic Engineering*, 19(5), 1374-1391. <https://doi.org/10.1007/s42235-022-00214-z>
- Harwin, W. S., Murgia, A., & Stokes, E. K. (2011). Assessing the effectiveness of robot facilitated neurorehabilitation for relearning motor skills following a stroke. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 49(10), 1093-1102. <https://doi.org/10.1007/s11517-011-0799-y>
- Hernandez, E., Valdez, S. I., Carbone, G., & Ceccarelli, M. (2018). Design Optimization of a Cable-Driven Parallel Robot in Upper Arm Training-Rehabilitation Processes. En J. C. M. Carvalho, D. Martins, R. Simoni, & H. Simas (Eds.), *Multibody Mechatronic Systems* (pp. 413-423). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67567-1_39

- Hidler, J., & Lum, P. S. (2011). The road ahead for rehabilitation robotics. *The Journal of Rehabilitation Research and Development*, 48(4), vii. <https://doi.org/10.1682/JRRD.2011.02.0014>
- INEGI. (2020). *Presentación de resultados. Estados Unidos Mexicanos* (Censo de Población y Vivienda 2020). https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ccpv/2020/doc/Censo2020_Principales_resultados_EUM.pdf
- Khin, R. A., Carlos, M. M. R., Badillo, G., Guillermina, G. M., & Jimmy, J. R. J. (2020). *Diseño de exoesqueleto de tres grados de libertad para miembro superior*. 9(3). <http://www.mecamex.net/revistas/LMEM/revistas/LMEM-V09-N03-01.pdf>
- Kristoffersson, A., Coradeschi, S., Loutfi, A., & Severinson-Eklundh, K. (2011). An Exploratory Study of Health Professionals' Attitudes about Robotic Telepresence Technology. *Journal of Technology in Human Services*, 29(4), 263-283. <https://doi.org/10.1080/15228835.2011.639509>
- Laut, J., Porfiri, M., & Raghavan, P. (2016). The Present and Future of Robotic Technology in Rehabilitation. *Current Physical Medicine and Rehabilitation Reports*, 4(4), 312-319. <https://doi.org/10.1007/s40141-016-0139-0>
- Leite, I., Pereira, A., Mascarenhas, S., Martinho, C., Prada, R., & Paiva, A. (2013). The influence of empathy in human-robot relations. *International Journal of Human-Computer Studies*, 71(3), 250-260. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2012.09.005>
- Levac, D. E., & Galvin, J. (2013). When Is Virtual Reality "Therapy"? *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 94(4), 795-798. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2012.10.021>
- Marchal-Crespo, L., & Reinkensmeyer, D. J. (2009). Review of control strategies for robotic movement training after neurologic injury. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 6(1), 20. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-6-20>
- Martinez-Peon, D., Olguín-Díaz, E., Muñoz-Vázquez, A. J., Francisco, P. C., & Méndez, D. S. (2021). Modeling and control of exoskeleton for wrist and forearm rehabilitation. *Biomedical Signal Processing and Control*, 70, 103022. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.103022>
- Masiero, S., Poli, P., Rosati, G., Zanutto, D., Iosa, M., Paolucci, S., & Morone, G. (2014). The value of robotic systems in stroke rehabilitation. *Expert Review of Medical Devices*, 11(2), 187-198. <https://doi.org/10.1586/17434440.2014.882766>
- Méndez, D. S., Montiel, M. A., & González, E. L. (2017). Diseño de un Prototipo de Exoesqueleto para Rehabilitación del Hombro. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomedica*, 38(1), Article 1. <https://doi.org/10.17488/RMIB.38.1.29>
- Meneses Castaño, C., Penagos, P., & Yamile Jaramillo, B. (2023). Efectividad de la tecnología robótica y la realidad virtual para la rehabilitación de la función motora en la parálisis

- cerebral. Revisión sistemática. *Rehabilitación*, 57(3), 100752. <https://doi.org/10.1016/j.rh.2022.07.001>
- Navarrete, G. A., Baca, Y. R., Villanueva, D., & Martínez, D. (2018). ROBMMOR: An Experimental Robotic Manipulator for Motor Rehabilitation of Knee. En I. Batyrshin, M. de L. Martínez-Villaseñor, & H. E. Ponce Espinosa (Eds.), *Advances in Computational Intelligence* (pp. 304-317). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04497-8_25
- Núñez, A. Y. A., López, S. L., Rodríguez, J. H. D., & Riva, D. V. de la. (2014). La rehabilitación física de mujeres mastectomizadas desde la perspectiva de ciencia, tecnología y sociedad. *Mediciego*, 20(2). <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=53666>
- Organization, W. H. (2022). *Global report on health equity for persons with disabilities*. World Health Organization.
- Pérez-San Lázaro, R., Salgado, I., & Chairez, I. (2021). Adaptive sliding-mode controller of a lower limb mobile exoskeleton for active rehabilitation. *ISA Transactions*, 109, 218-228. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.10.008>
- Pisla, D., Tarnita, D., Tucan, P., Tohanean, N., Vaida, C., Geonea, I. D., Bogdan, G., Abrudan, C., Carbone, G., & Plitea, N. (2021). A Parallel Robot with Torque Monitoring for Brachial Monoparesis Rehabilitation Tasks. *Applied Sciences*, 11(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/app11219932>
- RED DE INDICADORES DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA. (2023). *El estado de la ciencia Principales Indicadores de Ciencia y Tecnología Iberoamericanos / Interamericanos 2023*. <https://www.ricyt.org/wp-content/uploads/2023/12/EL-ESTADO-DE-LA-CIENCIA-2023.pdf>
- Sandoval-Gonzalez, O., Jacinto-Villegas, J., Herrera-Aguilar, I., Portillo-Rodriguez, O., Tripicchio, P., Hernandez-Ramos, M., Flores-Cuautle, A., & Avizzano, C. (2016). Design and Development of a Hand Exoskeleton Robot for Active and Passive Rehabilitation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 13(2), 66. <https://doi.org/10.5772/62404>
- Secretaría de Educación Pública. (2023). *Principales Cifras del Sistema Educativo Nacional 2022-2023*. https://www.planeacion.sep.gob.mx/Doc/estadistica_e_indicadores/principales_cifras/principales_cifras_2022_2023_bolsillo.pdf
- Tellaeché, J. R. (2020). Los retos de la economía mexicana: Comercio, inversión extranjera, industria nacional y cambio tecnológico / The challenges of the Mexican economy: trade, foreign investment, domestic industry and technological change. *EconomíaUNAM*, 17(51), Article 51. <https://doi.org/10.22201/fe.24488143e.2020.51.576>

- UNESCO. (2017). *UNESCO moving forward the 2030 Agenda for Sustainable Development*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247785/PDF/247785eng.pdf.multi>
- Valdez, S. I., Gutierrez-Carmona, I., Keshtkar, S., & Hernandez, E. E. (2020). Kinematic and dynamic design and optimization of a parallel rehabilitation robot. *Intelligent Service Robotics, 13*(3), 365-378. <https://doi.org/10.1007/s11370-020-00319-6>
- Veléz-Díaz, D., Pozo-Méndez, A., Gudiño-Lau, J., Alcalá, J., & Charre-Ibarra, S. (2020). Diseño y co-simulación de un exoesqueleto. *XIKUA Boletín Científico de la Escuela Superior de Tlahuelilpan, 8*(16), Article 16. <https://doi.org/10.29057/xikua.v8i16.5946>
- Vidrios-Serrano, C. A., Maldonado-Fregoso, B. R., Bonilla-Gutiérrez, I., Mendoza-Gutiérrez, M. O., & González-Galván, E. J. (2018). Integración de un Sistema Robótico de Terapia Ocupacional para Extremidades Superiores con Estimulación Visual/Táctil de Los Pacientes. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomedica, 39*(2), Article 2. <https://doi.org/10.17488/RMIB.39.2.2>
- Wagner, T. H., Lo, A. C., Peduzzi, P., Bravata, D. M., Huang, G. D., Krebs, H. I., Ringer, R. J., Federman, D. G., Richards, L. G., Haselkorn, J. K., Wittenberg, G. F., Volpe, B. T., Bever, C. T., Duncan, P. W., Siroka, A., & Guarino, P. D. (2011). An Economic Analysis of Robot-Assisted Therapy for Long-Term Upper-Limb Impairment After Stroke. *Stroke, 42*(9), 2630-2632. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.110.606442>
- World Bank Open Data*. (s. f.). World Bank Open Data. Recuperado 27 de agosto de 2024, de <https://data.worldbank.org>
- Yakub, F., Md. Khudzari, A. Z., & Mori, Y. (2014). Recent trends for practical rehabilitation robotics, current challenges and the future. *International Journal of Rehabilitation Research, 37*(1), 9. <https://doi.org/10.1097/MRR.0000000000000035>
- Zhang, M., Davies, T. C., & Xie, S. (2013). Effectiveness of robot-assisted therapy on ankle rehabilitation – a systematic review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 10*(1), 30. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-10-30>