

¿Podría la robótica ser aliada en la rehabilitación osteomuscular del paciente?

Ana María Montealegre Torres¹, Maicol Geobanny Forero Ocampo², Lina Maryudi Rodríguez López³

1 Ana María Montealegre Torres*, Universidad de Caldas, anamariamt.2609@gmail.com

2 Maicol Geobanny Forero Ocampo, Universidad Nacional, Mgforero0@gmail.com

3 Lina Maryudi Rodríguez López, Universidad del Tolima, linismrl@gmail.com

Historia del Artículo:

Recibido: Agosto 2024

Aceptado: Marzo 2025

Publicado: Abril 2025

Palabras Clave:

Robótica, espasmo, espástico, ACV, funcional, muscular, rehabilitación.

Keywords: Robotics, spasm, spastic, CVA, functional, muscular, rehabilitation.

Resumen

Las diferentes enfermedades espásticas del sistema osteomuscular, y los mismo procesos inmersos de rehabilitación, han llevado a la medicina a plantearse soluciones diferentes, que coadyuven en el manejo y evolución favorable del paciente, durante esta revisión sistemática de la literatura, abordaremos desde la perspectiva de la fisiatría y la neurología, como el papel de la robótica puede cambiar el pronóstico del paciente, en las dos patologías más prevalentes y de mayor secuela, como lo son el Accidente Cerebro Vascular-ACV, y la espasticidad de mano y muñeca. Si bien, la tecnología, nunca remplazara el criterio médico, si será su mejor aliado, cuando se aprende a implementar.

Algunas personas, pueden quedar con limitaciones funcionales irreparables, pero un robot o dispositivo inmerso en su organismo, puede complementar y hasta realizar dicha función perdida, siendo esta, una nueva esperanza de vida, para el ejercicio de una medicina más humanizada.

Abstract

Various spastic diseases of the musculoskeletal system, along with their associated rehabilitation processes, have led medicine to explore different solutions to aid in the favorable management and evolution of patients. Through this systematic literature review, we will address, from the perspectives of physiatry and neurology, how robotics can change patient outcomes in the two most prevalent and disabling conditions: cerebrovascular accident (CVA) and hand and wrist spasticity. While technology will never replace medical judgment, it can become its greatest ally when properly implemented. Some individuals may be left with irreparable functional limitations, but a robot or device integrated into their bodies can complement or even replace the lost function, offering new hope for practicing a more humanized medicine.

* Autor para correspondencia:

Ana María Montealegre Torres, Universidad de Caldas, anamariamt.2609@gmail.com

Cómo citar:

Montealegre et al. ¿Podría la robótica ser aliada en la rehabilitación osteomuscular del paciente?. S&EMJ. Año 2025; Vol. 5: 33-50.

Introducción

Implementar la tecnología como base del objetivo de un programa de rehabilitación integral, brinda la oportunidad al paciente, de aumentar la intensidad y la frecuencia de la terapia restaurativa, o incluso, suplementativa, fomentando de este modo, una mejoría en condiciones de espasticidad en ocasiones predecible y en otras no reversibles. Gracias a la realización de movimientos repetitivos continuos, los sistemas robóticos ayudan a mejorar la fuerza, la resistencia y el equilibrio de los pacientes en clínicas de todo el mundo, aumentando su motivación y esperanza de recuperación. (1).

Ahora bien, la situación de la neurorrehabilitación en la actualidad, se ha incrementado en todo el mundo, debido al número de personas que la requieren, esto como consecuencia de haber padecido enfermedades de origen neurológico, como las lesiones de la médula espinal, accidentes cerebrovasculares (ACV), traumatismos craneoencefálicos, esclerosis múltiple, enfermedad de Parkinson, infecciones neurológicas o tumores cerebrales.

Dicho lo anterior, son dos flagelos, que inciden directamente en este proceso, el primero de ellos, el envejecimiento propio de la pirámide poblacional y el segundo, los mismo hábitos de vida no saludables de la población.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), más de seis millones de personas mueren cada año por ACV y la cantidad de personas que sufren una discapacidad permanente por esta razón es aproximadamente la misma.

La Asociación Nacional de Accidentes Cardiovasculares-ACV del Reino Unido, ha realizado una encuesta nacional, donde han observado que el 49% de las personas que sobreviven a un ACV, tiene problemas en una rehabilitación. Un 52%, sufren problemas en la mano, que merman su independencia y un 54%, presentan limitaciones para caminar; cifras no distantes a las colombianas, en donde el 70 % de pacientes, con las condiciones anteriormente nombradas, quedan con una limitación funcional de por vida, siendo este factor, un decadente en la calidad de vida del paciente y de su entorno, ya que restan autonomía vital en su cotidianidad.

Lo anterior, posiciona a la robótica como una herramienta indispensable, en el proceso de rehabilitación temprana y efectiva del paciente; siendo este, el reto más presente en nuestra actualidad, y de la cual a continuación, vamos a recopilar, dejando la invitación abierta a crear soluciones tecnológicas, que optimicen el recurso existente en salud y específicamente en las

especialidades Fisiatría y Neurología.(1-2).

Objetivo

Ilustrar, cual es el papel de la robótica, en especialidades como la fisiatría y la neurología, en patologías, de mayor condición secular en el paciente, como el Accidente Cerebro Vascular-ACV, y la espasticidad mano y muñeca.

Métodología

Se realizó una búsqueda sistemática de literatura, entre marzo del 2018 a hasta Julio 2024, en las bases de *PubMed*, *ScienceDirect*, *SCIELO*, y Google académico, con los términos *MeSH (Medical Subject Headings): orphan diseases, preanesthesia assessment, anesthesiology, morbidity, mortality* y con los no *MeSH*: enfermedades raras vs anestesiología, enfermedades raras en pediatría, enfermedades raras en la adultez, valoración perioperatoria. Se consideraron 240 artículos tipo revisión sistemática de literatura, reportes de casos, estudios comparativos, investigaciones originales. Al final luego de aplicación escala CASPE con 70 % de puntuación se incluyeron finalmente 41 artículos del tema en mención. Finalmente se aplica validación prisma 2020.

Conclusiones

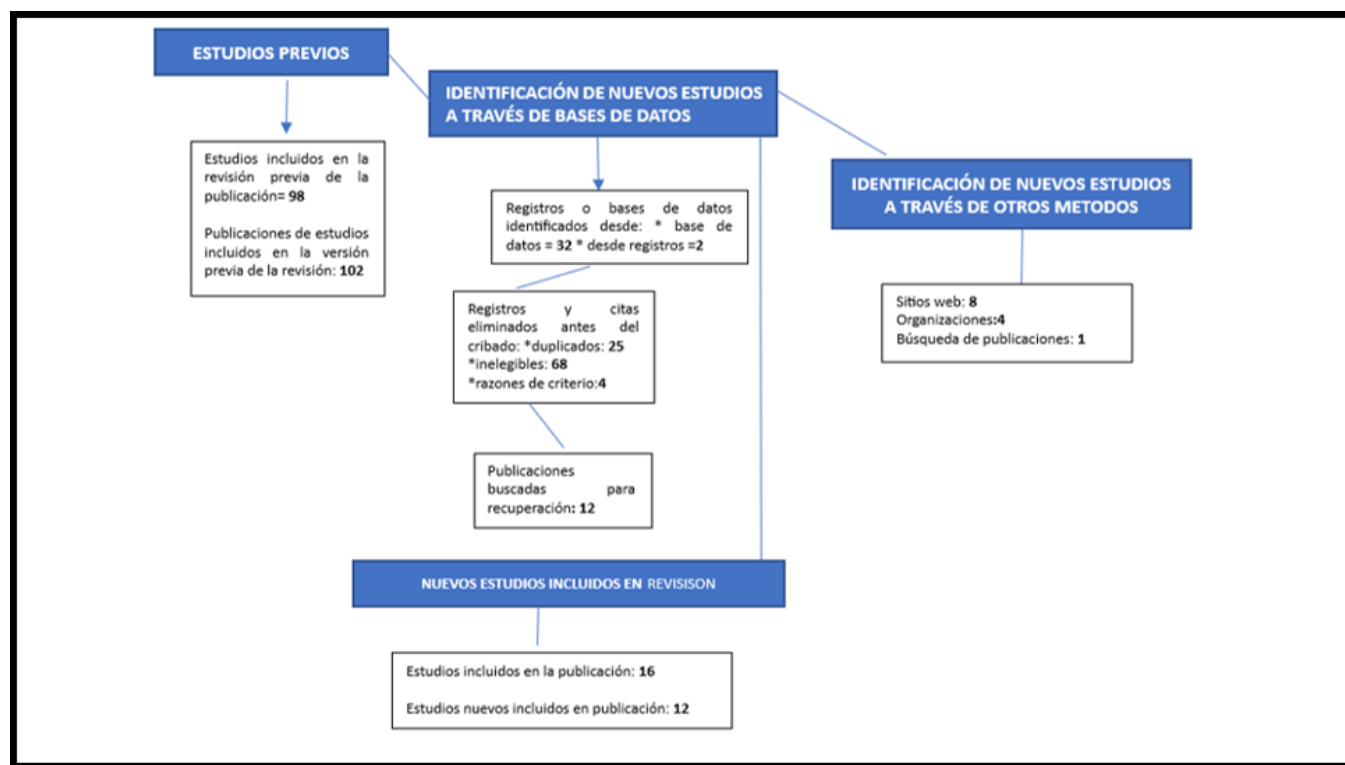
Lograr incorporar la movilidad temprana, activa y pasiva, con ortesis robóticas, en los pacientes con ACV, o con espaticidad residual, por lesiones de neurona motora superior, logra disminuir las secuelas de la limitación autónoma del paciente, así como, impacta en la disminución del dolor, en el aumento del arco de movilidad, y finalmente en la calidad de vida del paciente y su entorno.

Introduction

Implementing technology as the foundation of a comprehensive rehabilitation program offers patients the opportunity to increase the intensity and frequency of restorative or supplemental therapy, thus fostering improvement in spastic conditions, sometimes predictably and sometimes not reversibly. Through continuous repetitive movements, robotic systems help improve strength, endurance, and balance in patients worldwide, increasing motivation and hope for recovery. (1)

Currently, the demand for neurorehabilitation has grown globally due to the rising number of individuals suffering from neurological diseases such as spinal cord injuries, strokes, traumatic brain injuries, multiple sclerosis, Parkinson's disease, neurological infections, or brain tumors. Two main factors directly impact this: the natural

Figura 1. Validación prisma de búsqueda



Fuente: Elaboración propia de los autores, para fines de este estudio

aging of the population and unhealthy lifestyle habits. According to the World Health Organization (WHO), over six million people die from strokes each year, and a similar number are left with permanent disabilities. The UK National Stroke Association conducted a national survey finding that 49% of stroke survivors face rehabilitation problems; 52% have hand problems affecting their independence, and 54% experience walking difficulties. These numbers are similar in Colombia, where about 70% of patients with the conditions mentioned suffer lifelong functional limitations, negatively impacting their quality of life and that of their families. This positions robotics as an indispensable tool in early and effective rehabilitation efforts, representing a significant current challenge and opportunity to optimize healthcare resources, especially in Psychiatry and Neurology. (1-2)

Objective

To illustrate the role of robotics in specialties like physiatry and neurology for managing major disabling conditions such as cerebrovascular accident (CVA) and hand and wrist spasticity.

Methodology

A systematic literature search was conducted from March 2018 to July 2024 in PubMed,

ScienceDirect, SCIELO, and Google Scholar. MeSH terms included: orphan diseases, preanesthesia assessment, anesthesiology, morbidity, mortality. Non-MeSH terms used included: rare diseases vs anesthesiology, rare diseases in pediatrics, rare diseases in adulthood, perioperative assessment. A total of 240 articles were reviewed, including systematic literature reviews, case reports, comparative studies, and original research. After applying the CASPE validation scale with a minimum 70% adherence score, 41 articles were included. PRISMA 2020 guidelines were applied for final validation.

Conclusions

Incorporating early active and passive mobility with robotic orthoses in patients with CVA or residual spasticity due to upper motor neuron lesions reduces autonomous limitations. It also helps decrease pain, increase range of motion, and significantly enhance the patient's and their family's quality of life.

Paralelo de la situación actual y de la futura en la rehabilitación robótica

En un estudio europeo realizado en el año 2022, se hizo evidente, que los pacientes ingresados por ACV o espasticidad de miembro superior, pasan el 76 % del tiempo inactivos, desde el momento cero,

incluso en países, con sistemas de salud punteros, como Suiza o Alemania, y que, del tiempo dedicado a la terapia, tan solo alrededor del 30% se dedica a la recuperación de la función motora. (**Fig 2**). Y el restante de tiempo que se recibe la terapia pasa a ser insuficiente ya que no se cuenta con el tiempo y el recurso humano disponible para la demanda actual.

En dos estudios realizados en el año 2017, en pacientes con lesión medular y accidente cerebrovascular-ACV, se observó que:

- El 40% del tiempo de terapia se dedicó a tareas no terapéuticas, como transferencias previas o preparación de la sesión.
- Los pacientes en los grupos de más repeticiones no realizaban más de 100 movimientos al día, sumando la terapia ocupacional y la fisioterapia.
- Los pacientes con accidente cerebrovascular realizaban una media de 291 pasos al día, pero tan solo 38 movimientos del brazo y la mano.

Estos datos sobre el número de repeticiones son muy inferiores a los recomendados, ya que, en estudios con animales, se ha descubierto que se necesitan entre 400 y 600 repeticiones de la extremidad superior para promover cambios plásticos en el cerebro.

Otro factor clave que genera preguntas, es el tiempo transcurrido desde la lesión; comúnmente, se utiliza la frase "el tiempo es cerebro," ya que, cuanto más se retrasa el inicio del proceso de rehabilitación, menor será la posibilidad de conseguir una recuperación óptima. Según investigaciones recientes, el momento óptimo para iniciar la rehabilitación se sitúa entre las 24 y las 48

horas, lo que implica que, en la mayoría de casos, debería iniciarse en unidades de hospitalización aguda, antes de acudir a un centro de rehabilitación especializado.

Lamentablemente, la falta de recursos humanos o económicos, limitan a menudo la aplicación de estos principios, especialmente en los pacientes más severos, que requieren mayor asistencia, para realizar las tareas de rehabilitación. Finalmente la verdad actual, es que el tiempo dedicado a esta parte crucial del paciente, no son óptimos, y por ende, el resultado tampoco.(3-4)

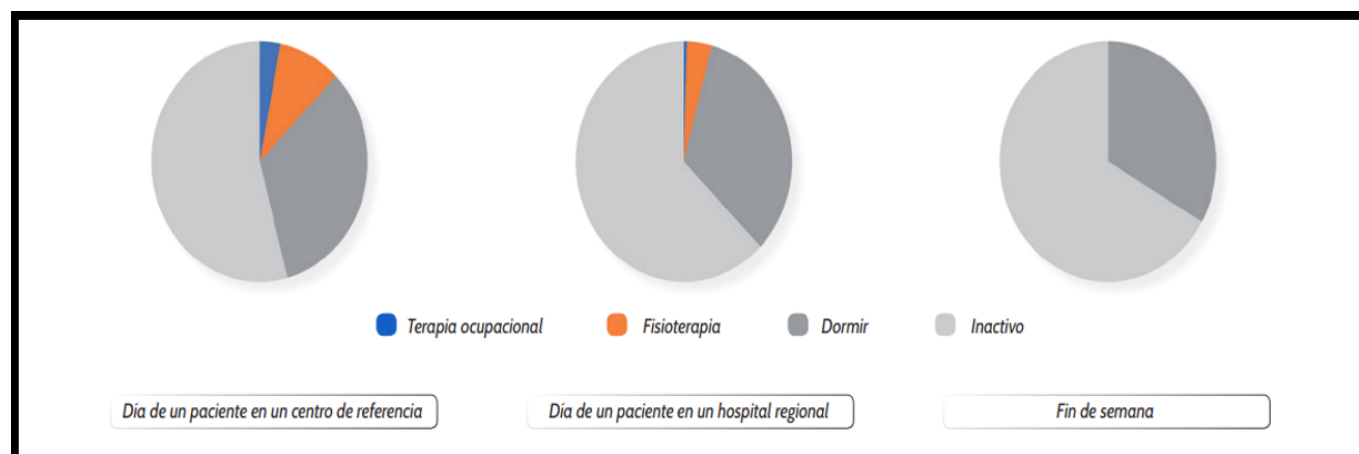
Papel determinante en la rehabilitación actual

Los primeros sistemas robóticos de rehabilitación, creados en el ámbito investigador, se diseñaron en los años ochenta y permitieron avanzar en el conocimiento de la robótica, sembrando las bases para los equipos usados actualmente en el contexto clínico (5).

El mayor hito se consiguió en el año 1999, cuando el Lokomat® fue el primer dispositivo robótico comercial para la rehabilitación de la marcha. En más de sus 20 años de historia, la robótica se ha adaptado a ser una herramienta fundamental en la recuperación de la movilidad de extremidades y la verticalización temprana del equilibrio,(6); incluso se propone actualmente usarlos, no solo en rehabilitación, sino también en la evaluación de la capacidad motora de los pacientes, mostrando una evaluación en tiempo real, al neurólogo y al fisiatra, permitiéndoles instaurar planes más individuales, según la secuela o pronóstico del paciente.

Un metaanálisis realizado en el año 2017, concluyó que las personas que tuvieron un ACV y

Figura 2. Tiempo paciente en programa de rehabilitación en la actualidad



Fuente: Tomada y modificada con fines académicos de Robótica para la rehabilitación, Úrsula Costa Fisioterapeuta. Directora clínica en Hocoma. Silvia Díez Fisioterapeuta. Gerente de aplicaciones Clínicas en Hocoma LATAM.2024. (1).

que reciben entrenamiento de la marcha asistida electromecánicamente, junto con fisioterapia convencional, tienen un 48% de más probabilidades para lograr caminar independientemente, que las personas que no reciben esta terapia.(7).

También se han observado beneficios similares con la robótica, para la rehabilitación de la extremidad superior, que permite, realizar un mayor número de repeticiones, y contribuye a una mayor funcionalidad del brazo y la mano, así como a la mejora de las actividades de la vida diaria.

Estos avances, no se limitan a pacientes en fase aguda o lesiones recientes, ya que, con un programa adaptado, intensivo y con tecnología, los pacientes obtienen cambios importantes en la función del brazo y la mano, que les permiten, recuperar la independencia en su vida diaria, meses después de haber sufrido la lesión. (8) Quizá una de las aplicaciones menos conocidas de la robótica se da en el ámbito de la rehabilitación temprana, donde los sistemas robóticos permiten movilizar y verticalizar a pacientes de forma segura incluso en Unidades de Cuidados Intensivos (UCI).(9).

Condición Clínica específica del ACV y la espasticidad de mano y muñeca

Las extremidades del ser humano, pueden verse afectadas por muchos factores, y uno de ellos, son

consecuencias de accidentes cerebro vasculares (ACV), que pueden disminuir total o parcialmente la movilidad de una o varias partes del cuerpo.

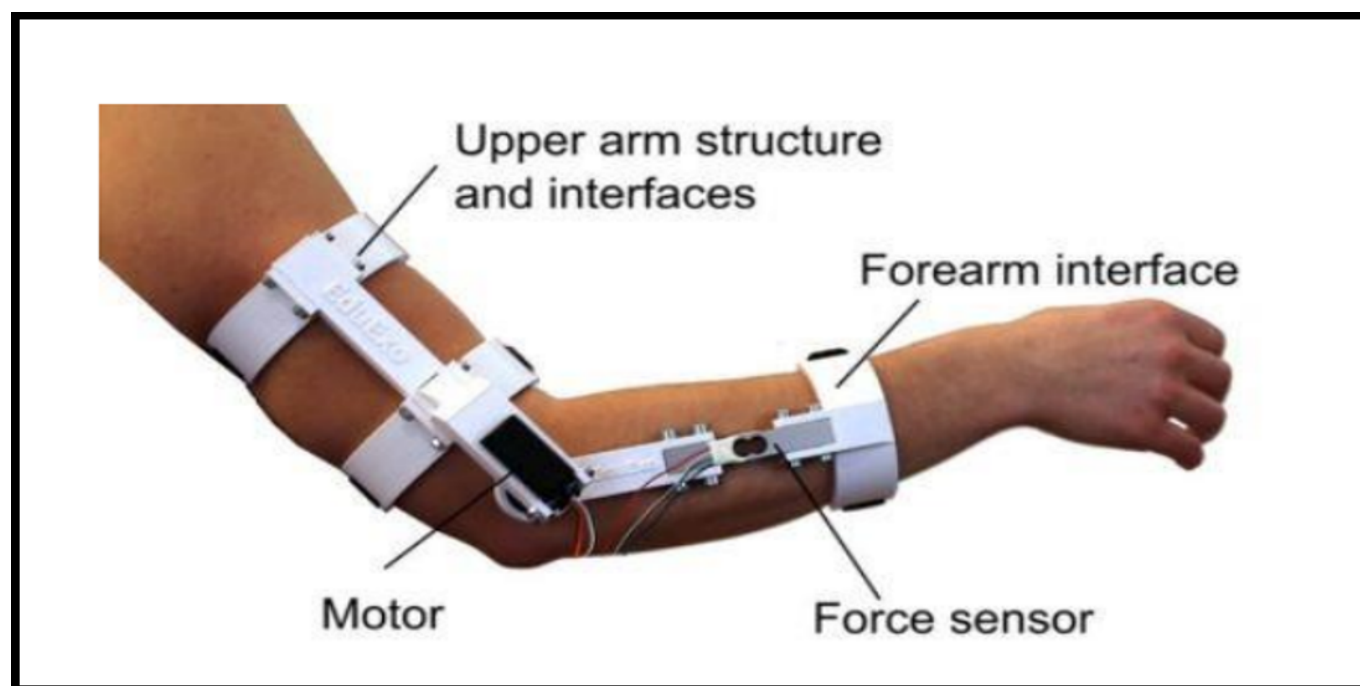
Los ACV son una de las principales causas de lesiones en personas en todo el mundo. En Colombia, esta fue la cuarta causa de muertes para el año 2019, según el DANE (5-9).

Muchos de los pacientes que sufren accidentes cerebro vasculares, sobreviven y quedan con parálisis total o parcial, en una o varias de sus extremidades, lo que no les permite, tener una vida normal. Actividades de la vida diaria básicas como asearse, alimentarse, vestirse quedan fuera de su alcance, lo que trae como consecuencias, muchas cosas negativas tanto para los pacientes como para su entorno familiar y social.

Las consecuencias de los ACV, pueden reducirse en gran medida, si se practica un proceso de rehabilitación a los pacientes eficaz y lo más importante oportuno, sin olvidar, que estos procesos requieren un alto costo para los sistemas de salud y los pacientes. En muchos sectores, el acceso oportuno a las terapias, es restrictivo, debido al alto costo en el servicio de los profesionales de la salud, y por eso, se han desarrollado dispositivos robóticos, que pueden servir como soporte en estos casos.

Se han desarrollado, equipos biomédicos, que pueden ser programados para realizar movimientos

Figura 3. Imagen correspondiente a un dispositivo robótico de miembro superior (Exoesqueleto)



Fuente: Tomado con fines académicos de: Robótica aplicada a terapias de rehabilitación. Estudio comparativo de dos técnicas de censado para exoesqueletos asistidos, usados en la recuperación de pacientes que han sufrido accidentes cerebrovasculares. Por: Robinson Bornacelli Durán.

y, si se usan de forma adecuada, se pueden conseguir resultados en la recuperación de los pacientes comparables, con los que realizan los profesionales de la salud.

Existen diversos modelos de equipos para rehabilitación, diseñados para cada una de las extremidades del cuerpo humano; uno de ellos, son los exoesqueletos asistidos, que son estructuras que se colocan en la extremidad y que cuentan con uno o más motores, dependiendo de su diseño; cuyo objetivo es mover la extremidad afectada de un paciente, para propósitos terapéuticos.(4-10-11).

Tipos de robots disponibles

Estos pueden ser diferentes y unos más funcionales que otros, sin embargo se clasifican en tres grupos, los que son móviles, los humanoides y los industriales, siendo estos últimos los más útiles en medicina ya que abarcan brazos mecánicos y robots manipuladores. (12).(Tabla 1).

Este modelo es el más parecido al desempeño

humano de una extremidad ya que contienen:

Articulaciones: son uniones que permiten el movimiento del sistema. Pueden ser rotacionales o lineales y definen en uno u otro modo los grados de libertad del dispositivo que refleja cómo será el movimiento final del brazo robótico . **Actuadores:** son los elementos que suministran la energía que mueve las articulaciones del brazo robótico los cuales pueden ser servomotores, sistemas electroneumáticos o electrohidráulicos. **Sensores:** son los elementos que proporcionan información del estado del robot o del entorno en el que se encuentran como por ejemplo velocidad, posición angular, aceleración, temperaturas, entre otras. **Sistema mecánico:** partes rígidas que conectan las articulaciones. **Controlador:** equipo electrónico programable que controla los movimientos del brazo robótico (13). De lo anterior hablaremos de los exoesqueletos que se colocan sobre la extremidad de la persona y logra simular una conexión de red nerviosa y neuronal que delimita la autonomía del paciente.

También se cuenta con los **Servomotores**, que

Tabla 1. Clasificación de los robots

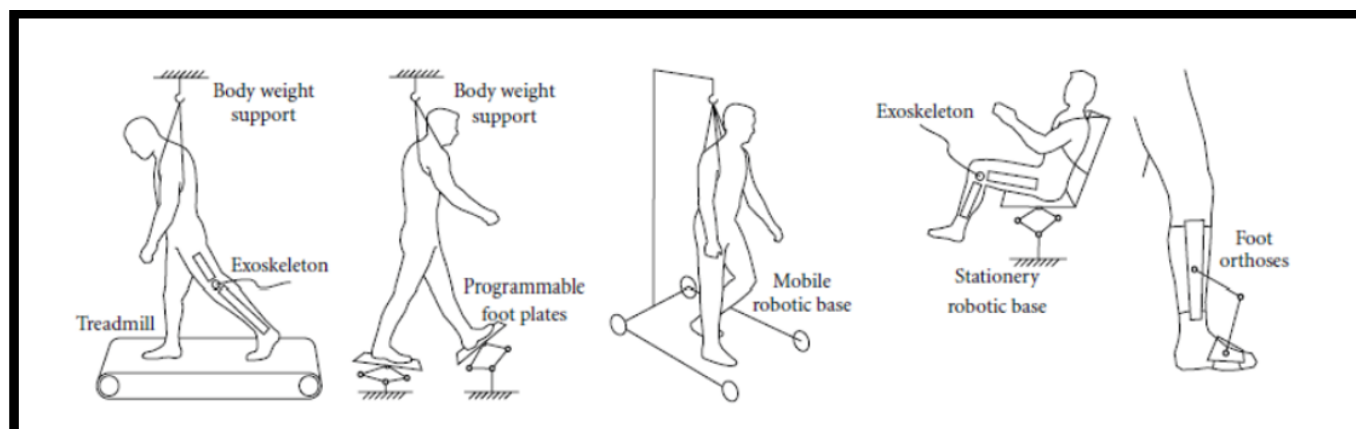
Móviles	Humanoides	Industriales
Terrestres, ruedas, patas, submarinos y Aero-espaciales.	Complejos	Robots manipuladores *idóneos en salud*

Fuente: Elaboración propia tomada con fines académicos de: DANE son las siglas de Departamento Administrativo Nacional de Estadística <http://www.dane.gov.co>.(5)

Figura 4. Robot industrial de la compañía ABB



Fuente: Tomado con fines académicos de «ABB-Robots industriales,» ABB Asea Brwn Boveri Ltd. 2021. [En línea]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/es/robots-industriales/irb-1410>. [Último acceso: 28 10 2021].(13).

Figura 5. Tipos de equipos robóticos para recuperación de miembros inferiores

Fuente: Tomado con fines académicos de: DANE son las siglas de Departamento Administrativo Nacional de Estadística <http://www.dane.gov.co>. (5).

son dispositivos robóticos electromecánicos que están dentro de la categoría de actuadores eléctricos los cuales transforman energía eléctrica en energía mecánica que sirve para mover las articulaciones de los robots. Principalmente están compuestos por tres elementos los cuales son motor eléctrico, sensor de posición angular y un amplificador electrónico. A un nivel más detallado, el servomotor mide la posición angular y su velocidad usando un sensor que, dependiendo del modelo, puede ser un encoder o un resolver. Ambos sirven para medir la posición angular y la velocidad, pero se diferencian en la resolución que se puede alcanzar debido a la forma de onda de señal de cada uno.

Aunque la mayoría de veces el amplificador ya viene con toda la electrónica y el programa para manejar las señales de cada tipo de sensor es importante conocer sus diferencias. (13-14).

Los Codificadores (Encoders); estos dispositivos

convierten el movimiento ya sea lineal o rotativo en una señal en forma de pulsos eléctricos la cual puede ser leída por un procesador para calcular la velocidad y dirección del elemento que esté conectado. Dentro de los encoders existen diferentes modelos los cuales se usan en distintas aplicaciones. Los dos grupos de encoder son los lineales y los rotativos. Estos a su vez se clasifican en absolutos e incrementales. Y de acuerdo con el tipo de señal usada para medir el desplazamiento lineal o angular pueden ser clasificados como ópticos, magnéticos, inductivos o capacitivos.

Encoder Absoluto: Estos generan un código o valor único para cada posición en la que se encuentren. Para los rotativos los hay de una sola vuelta o absolutos de múltiples vueltas, pero siempre conserva un único valor o código para cada posición.

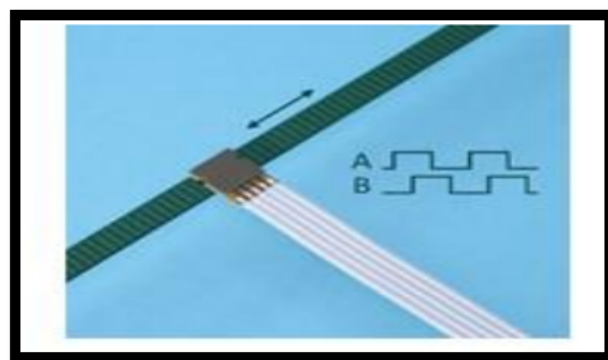
Encoder incremental: genera un pulso a medida que se desplaza o gira en caso sea rotativo el elemento. No tiene un código o valor único en una

Figura 6. Tipos de Encoders

A. Rotativos



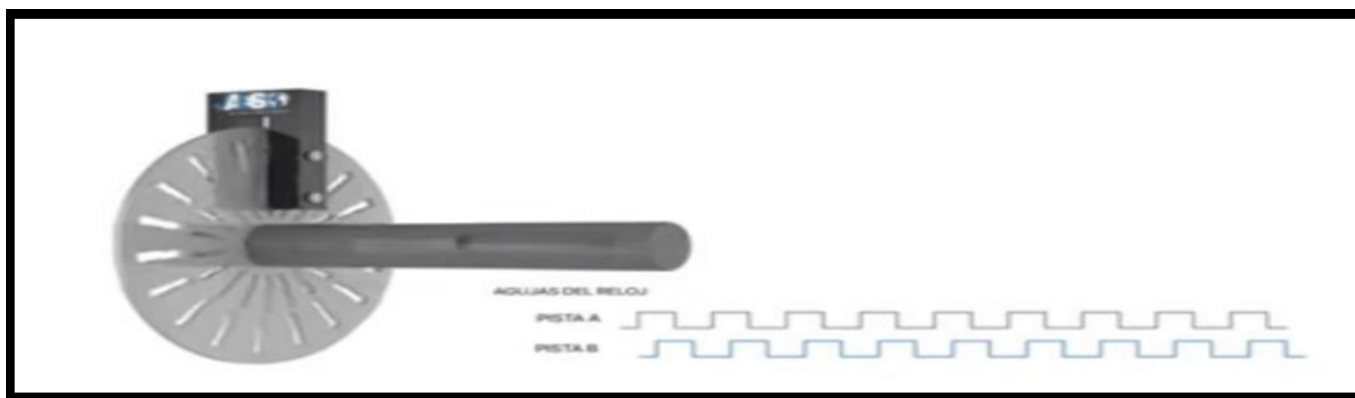
B. Lineales



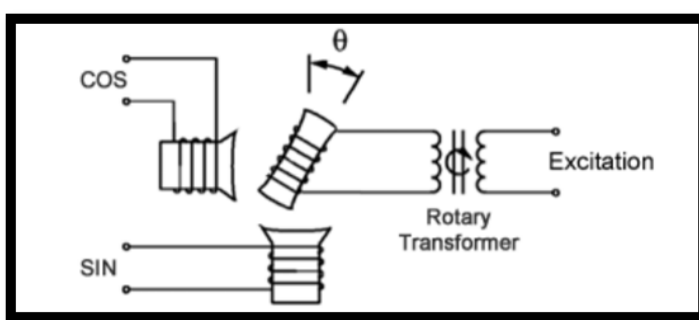
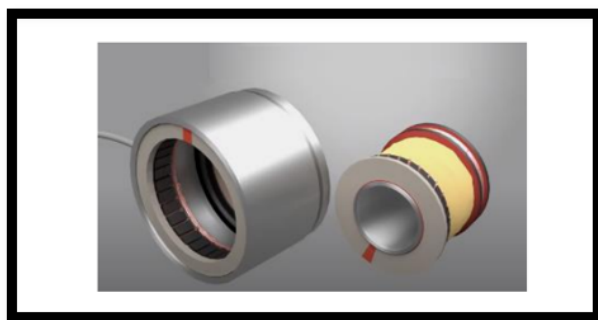
Fuente: Tomada con fines académicos de: DANE son las siglas de Departamento Administrativo Nacional de Estadística <http://www.dane.gov.co>. (5) y P. L. Encoder, «Linear inductive encoder,» POSIC, 2021. [En línea]. Available: <https://www.posic.com/EN/linear-encoder-id11021.html>. [Último acceso: 29 10 2021]. (14).

Figura 7. Encoder Absoluto rotativo:

Fuente: Tomado con fines académicos de: Learn Channel, Cómo funciona un Resolver - Animación técnica, NM: Youtube, 2021.

Figura 8. Disco interno de un encoder tipo incremental rotativo

Fuente: Tomado con fines académicos y modificado de: DANE son las siglas de Departamento Administrativo Nacional de Estadística <http://www.dane.gov.co>.(5) y Available: <https://new.abb.com/products/robotics/es/robots-industriales/irb-1410>. [Último acceso: 28 10 2021].(13)

Figura 9. Diagrama esquemático de un resolver

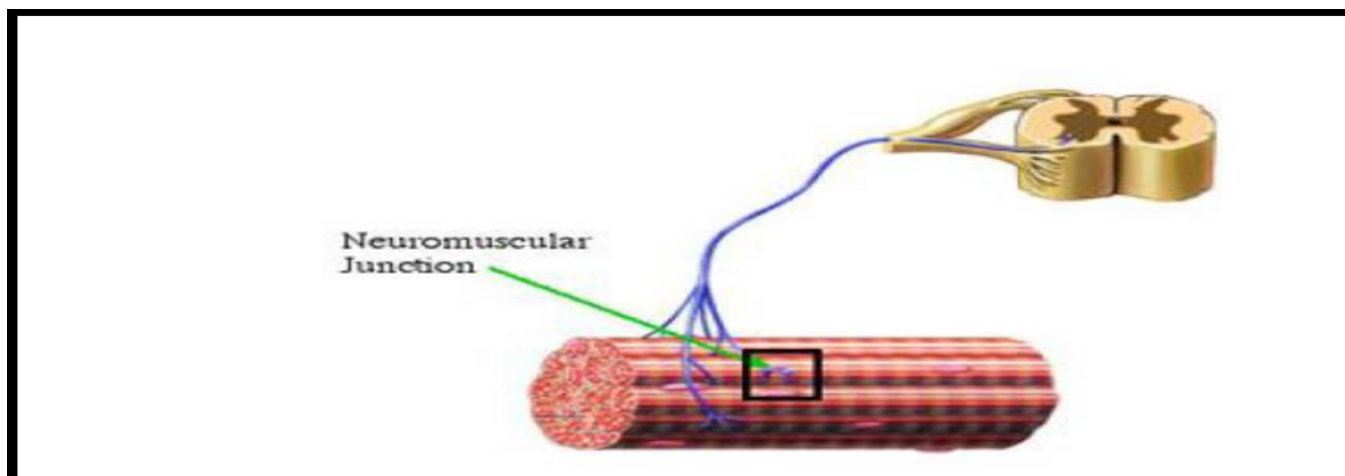
Fuente: Tomada con fines académicos de: NIDEC, «Robote Q,» NIDEC, 2021. [En línea]. Available: <https://www.roboteq.com/applications/all-blogs/14-how-resolvers-work>. [Último acceso: 30 10 2021].

determinada posición.

Existen un tipo de encoder incremental en cuadratura el cual consta de dos 26 señales con las que se puede calcular la velocidad, la dirección y en algunos casos la posición, pero esta última ya

depende del equipo que esté procesando las señales generadas. A diferencia del encoder absoluto, este tipo de encoder no tiene una codificación única en cada posición en la que se encuentra. Es decir, para cualquier valor angular los pulsos generados serán iguales al pasar por las diferentes ranuras y

Figura 10. Unidad neuromotora



Fuente: Tomada con fines académicos de: J. Hill, «Exercise Physiology Student,» Spring, 2010.

dependerá del sistema de control determinar la posición y el recorrido.

Resolvers: Estos son dispositivos que se usan para el mismo fin que los Encoders, pero a diferencia de estos son analógicos. Es decir, no generan pulsos o señales digitales de posición. La señal de salida de un resolver es una señal analógica modulada por una portadora que se inyecta al bobinado de excitación. En resumen, tanto el resolver como el encoder cumplen una función de retroalimentación en los servomotores, sin embargo, el resolver presenta algunas ventajas como son su diseño robusto que permite ser utilizado en ambientes más exigentes en cuanto a temperatura y vibraciones, son mucho más resistentes ya que solo están compuestos de 2 secciones y dependiendo del conversor A/D usado se podría tener una resolución mucho mayor.(13-15)

Robótica y conjugación con señales electromiográficas

Los músculos de los seres humanos, están

compuestos de Unidades Motoras (MU), las cuales a su vez se componen de neuronas α -motor y las fibras musculares que inerva, (Figura 10).

La neurona motora, estimula la fibra del músculo, a través, de la unión neuro muscular (NJM) formada en cada brazo de su axón ; al momento de realizar un movimiento voluntario del músculo, es en la región NJM, en donde se genera un cambio en el potencial eléctrico de la membrana; la fuerza muscular, la cual es variable, depende del número de estas unidades motoras (MU) activas, cuyo número, depende de un proceso de reclutamiento, y de la frecuencia a la cual, se envían los pulsos a las neuronas (16).

Una de las aplicaciones, en donde se involucra el tratamiento de señales sEMG, es el diseño de exoesqueletos asistidos, para la rehabilitación de pacientes, en donde, se debe medir la intención de movimiento, detectando las señales de los músculos, para que luego un motor, permita ayudar al paciente (17).

Según Shwedyk (18), un pulso sEMG, típico de un movimiento voluntario, puede tener una

Tabla 2. Tipos robóticos útiles en la rehabilitación del paciente con ACV y síndrome espástico mano muñeca

Servomotores	Codificadores (Encoders)	Encoder Absoluto:	Encoder incremental:	Resolvers
Movilizan las articulaciones robóticas, midiendo posición angular y velocidad. A nivel sensor	Convierte el movimiento lineal o rotativo en pulsos eléctricos, pasando de energía eléctrica a mecánica	Generan código de valor único según posición .	Genera códigos múltiples según la posición	Generan una señal analógica modulada a través de excitación directa

Fuente: de elaboración propia tomada con fines académicos de: Available: <https://new.abb.com/products/robotics/es/robots-industriales/irb-1410>. [Último acceso: 28 10 2021].(13)

duración de entre 1 y 3 segundos, lo que indica que el control de los exoesqueletos, debe ser capaz de procesar señales en estos rangos; sin embargo, una persona, puede mantener por un tiempo mayor esta condición, tal es el caso, de algunos experimentos como el desarrollado por *Jennifer Hill*, que consistió que de una señal EMG tomada desde la superficie del músculo, sEMG, se tiene una representación en el dominio del tiempo y adicionalmente una en el dominio de la frecuencia. Para la representación en el dominio del tiempo, se puede resaltar la duración de un pulso sEMG que está en el orden de los 10 milisegundos (ms); para el caso de la amplitud, está determinado por el sistema electrónico de adquisición, pero generalmente está en el orden de los milivoltios (mV). En cuanto a la representación en el dominio de la frecuencia, se tiene que la señal tiene componentes de frecuencia que van de entre 10 y 500 HZ.(18).

En términos de terapéutica y rehabilitación tenemos:

Método ROOD: Este método fue desarrollado por *Margater Rood*. De ahí su nombre. Básicamente lo implementó buscando mejorar el tono muscular, es decir la rigidez del músculo. Lo que se busca es realizar una serie de estímulos para excitar a la persona para así lograr la recuperación sensorial. De

las técnicas del método *Rood* se tienen el cepillado rápido, el golpeteo, la vibración, frío y estiramiento muscular.

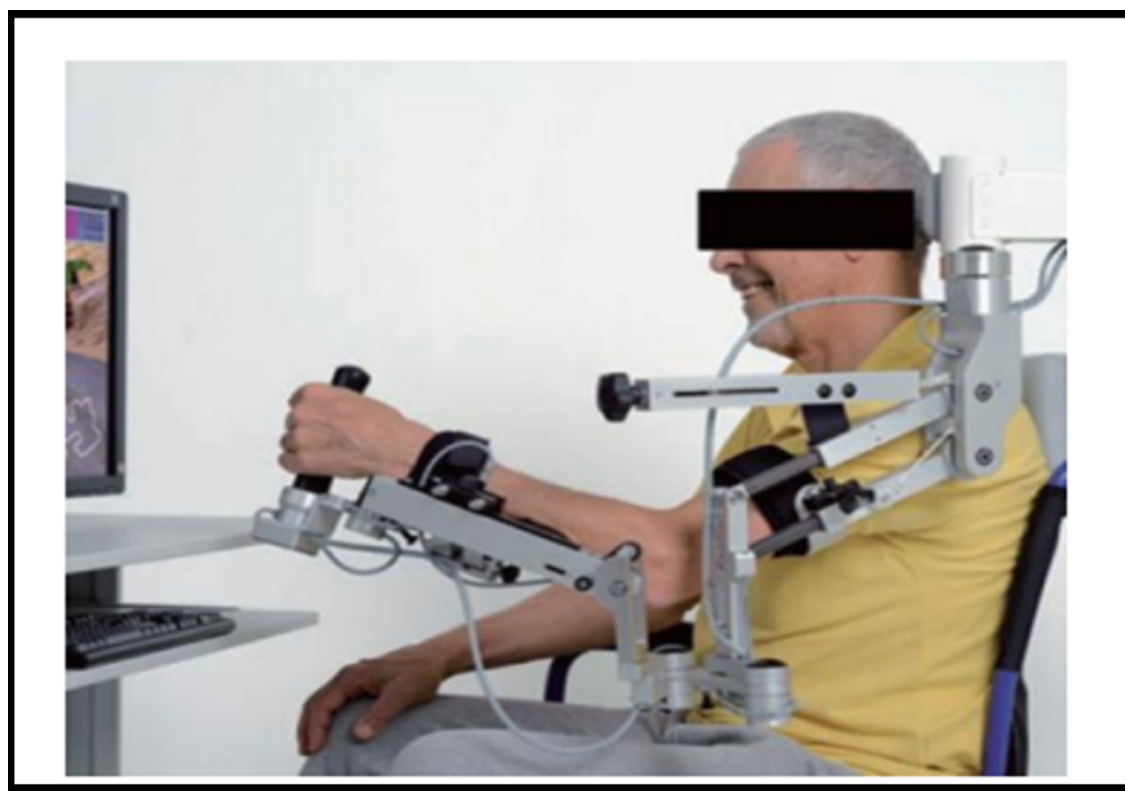
Cepillado rápido: Consiste en cepillar rápidamente la parte afectada y hacer repeticiones. **El Golpeteo:** Se realiza haciendo toques en la piel y ejercer presión moderada. **Vibración:** Consiste en colocar un vibrador por lapsos de menos de 30 segundos. **Frío:** Rozar la zona afectada con algún elemento frío por lapso de 2 a 3 segundos. **Estiramiento muscular:** Se realiza moviendo la extremidad lentamente para evitar que quede contraída.

Los componentes del método son la normalización del tono, control sensoriomotor basado en el desarrollo, movimiento deliberado y la repetición necesaria para el aprendizaje. (19).

El Método Facilitación Neuromuscular propioceptiva, (FNP): Este método fue desarrollado por el Dr. *Herman Kabat* y por *Maggie Knot*. El objetivo de este método es fortalecer los músculos a través de movimientos repetitivos con unos patrones específicos. La repetición de un movimiento en el cuerpo favorece que la persona pueda aprender a moverse y tenga fuerza y resistencia en los músculos (20). Los patrones de movimientos son:

Unilaterales: Ya sea un miembro del cuerpo de la parte superior o inferior. Bilaterales: Se

Figura 11. Exoesqueleto para rehabilitación (Arneo, Hocoma, Suiza)



Fuente: Tomado con fines académicos de: 23. E. Shwedyk, R. Balasubramanian y R. Scott, A Nonstationary Model for the Electromyogram, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vols. %1 de %2BME-24, N° 5, pp. 417-424, 1977. [24] J. Hill, Exercise Physiology Student, Spri.(23).

realiza movimiento de ambos miembros ya sean superiores o inferiores; alguna combinación de miembros superiores e inferiores. Simétricos: Las extremidades se mueven en el mismo patrón y en el mismo sentido sean superiores o las inferiores. Si los movimientos son recíprocos se mueven con el mismo patrón, pero en sentido opuesto. Asimétricos: Los movimientos se realizan en patrones opuestos, pero en la misma diagonal. Si son recíprocos se mueven en sentidos opuestos.(20).

El método Bobath ; Este método consiste en evitar que una persona realice movimientos anormales mediante repeticiones de una serie de ejercicios. Se centra en enseñar al paciente a mover correctamente las extremidades y algunas posiciones que se necesitan para la vida diaria (20).

Método Brunnstrom (21) Este método fue desarrollado por *Signe Brunnstrom* en los años 50. Consiste en crear sinergias 4 con el paciente distribuidos en seis fases en donde en cada una de ellas se debe evaluar y verificar el cumplimiento de un objetivo para avanzar. El fin es que en cada una de las fases el paciente vaya evolucionando y recuperar los movimientos del cuerpo afectados por el ACV (21). La primera fase consiste en realizar una evaluación de la persona. Generalmente se realiza al poco tiempo de haber sufrido el accidente cerebrovascular. El profesional de la salud verifica la ausencia del movimiento (hipotonía) de la parte afectada.

La segunda fase es donde comienza la recuperación del paciente. Consiste en una terapia pasiva en donde el profesional de la salud le enseña al paciente cómo son los movimientos. En esta fase a la persona afectada no se le pide que realice o intente realizar ningún tipo de movimiento. Solo es el terapeuta quien realiza el trabajo (22).

La tercera fase llega cuando el paciente ya ha logrado tener un control parcial de los movimientos y es donde se le pide que intente realizar alguna de las sinergias practicadas en la fase anterior. Sin embargo, al no poder completar por sí solo los movimientos, la persona debe obtener ayuda del terapeuta para completar el movimiento y así seguir con su evolución.

La cuarta fase, teniendo al paciente con el control de sus movimientos se le pide que realice otro tipo de movimientos que no han sido ensayado antes. Un ejemplo de este tipo de ejercicios es el de tocarse el hombro contrario, la nariz o la oreja. Se mide la capacidad de poder ubicar la extremidad con precisión en algún punto (22).

La quinta fase se evalúan las respuestas al paciente en motricidad fina. Se evalúa, dependiendo del miembro afectado, cosas tan finas como colorear

o escribir o acciones tan básicas como hacer un movimiento simulando la toma de alimentos, tomar un vaso y beber. Para miembro inferiores puede pedírsele al paciente patear una pelota o alguna lata de refresco. A medida que se avanzan en fases las sinergias son cada vez menores y se presta mayor importancia a los que la persona puede resolver por sí misma (22).

Método Modelo Orientado a la Tarea, (MOT): En 1906 el neurofisiólogo Charles Sherrington inició el estudio de este método basado en los reflejos y el resultado. De forma más sencilla un estímulo producirá una respuesta la cual se transformará en un estímulo en la siguiente respuesta. Se basa en explicar qué se debe realizar y obtener una recompensa por terminar dicha tarea.

Este método no es definido de forma universal. No hay un consenso en cómo es la metodología, pero el fin es simple. Colocar a una persona actividades y enseñarle que debe completar e ir obteniendo recompensas. La Figura 11 nos muestra un sistema robótico empleado en rehabilitación en donde la persona debe realizar unas tareas que van apareciendo en la pantalla del computador.(23).

Diferentes ensayos han medido la evolución de los pacientes con una terapéutica robótica y una convencional , uno de ellos fue el *Fugl-Meyer test*. Como indicadores secundarios de usaron el índice de Barthel modificado y el índice de motricidad. Las conclusiones fueron que a pesar de tener un gran número de participantes inicialmente, no todos pudieron finalizar el experimento.

Se observa una ventaja en el uso de robots en las terapias asistidas pero las diferencias obtenidas no fueron estadísticamente significativas. Por citar un ejemplo, el índice de *Fugl-Meyer* del grupo sometido a terapia asistida por robots estuvo por encima alrededor de 0.07 puntos sobre los pacientes del grupo sometido a terapia convencional pero no fue estadísticamente significativa esta diferencia luego del análisis estadístico realizado.

Por tal razón los autores recomiendan seguir investigando, realizando experimentos cada vez más elaborados que permitan determinar si existe o no una mejoría en los pacientes al usar dispositivos robóticos en las terapias asistidas.(24). Se conocen comparativos, entre dos modos de operación de un robot llamado BONES el cual puede mover el hombro, el codo y la muñeca en varias formas. El primer modo de operación es usando BONES en entrenamiento moviendo sólo un eje del dispositivo.

El segundo modo de funcionamiento consiste en usar el BONES usando todos los ejes de movimiento. Lo que llama la atención del experimento es que no

Figura 12. Terapia con Robot con terapia de estimulación neuromuscular: *Arm Motor Ability test (AMAT)* como secundario el *Fugl-Meyer test*

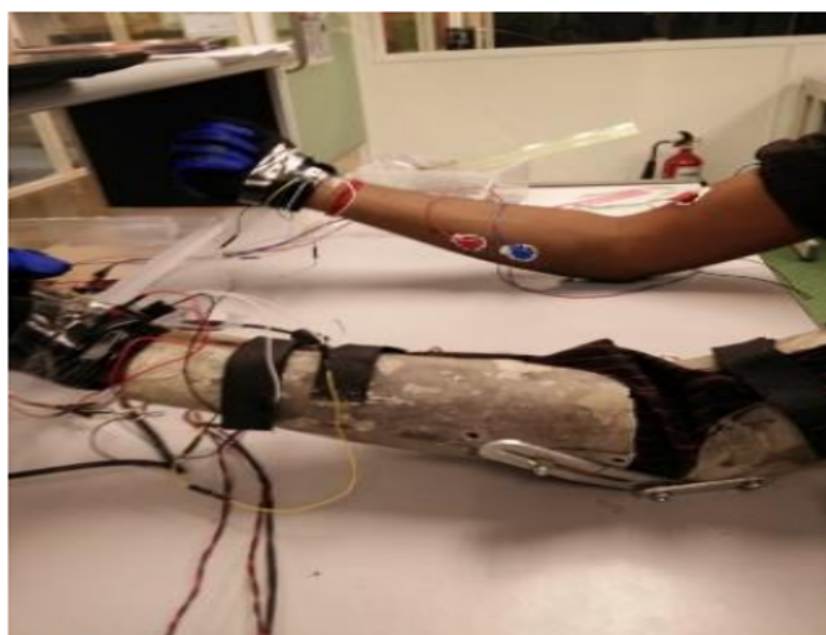


Fuente: Tomado con fines académicos y modificado de: J. Daly, N. Hogan, E. Perepezco, H. Krebs, J. Rogers, K. Goyal, M. Dohring, E. Fredickson, J. Nethery y R. Ruff, Response to upper-limb robotics and functional neuromuscular stimulation following stroke, *Journal of Rehabilitation Research & Development*, vol. 42, nº 6, pp. 723-736, 2005.(25)

se aplica exclusivamente a un mismo grupo como se ha realizado en los artículos anteriormente mencionados. En este caso luego de un período de inicio, se realiza un cruce entre grupos y se

intercambian los modos de operación por otro periodo de tiempo. se puede observar la intención de realizar un cruce en los ensayos. Se seleccionaron 20 personas para hacer los experimentos que toman

Figura 13. Exoesqueleto de codo y muñeca



Fuente: Tomada con fines académicos de: Y. Ganesan, S. Gobee y V. Durairajah, Development of an Upper Limb Exoskeleton for Rehabilitation with Feedback from EMG and IMU Sensor, *Elsevier*, vol. 1, N° 76, pp. 53- 59, 2015.(26)

en total alrededor de seis meses en sesiones de 60 minutos tres veces por semana.

Para medir la evolución de los pacientes se usaron el *Box and Block Test (BBT)*, el *Fugl-Meyer Test (FMT)*, *Joint Pain Scale*, el *Wolf Motor Función test (WMFT)*, el *motor Activity Log (MAL)*. Los experimentos a los que fueron sometidos los pacientes fueron variados usando un software mediante el cual las personas tuvieron que cumplir unos objetivos, en donde debían realizar movimientos repetitivos con exigencia variable. La conclusión a la cual se llegó es que un robot más sofisticado, que pueda tener más ejes de movimientos o grados de libertad, tiene un mejor desempeño y por lo tanto una ventaja en la recuperación de los pacientes. Los resultados de los test con los cuales se observa la evolución de las personas en prueba muestran mayores niveles en el modo de operación con mayor número de ejes.(25)

Un punto de vista diferente se observa en (25) donde realizan la comparación de una terapia

con robot con una terapia de estimulación neuromuscular. Esta última consiste en emplear electricidad para estimular la parte afectada del paciente. Para las pruebas se escogieron 12 personas las cuales fueron asignadas aleatoriamente a uno de los dos tipos de terapia de rehabilitación. Para medir la evolución se usó como primer indicador el *Arm Motor Ability test (AMAT)* como secundario el *Fugl-Meyer test*. El tratamiento fue realizado durante un período de 12 semanas por 5 horas al día, cinco días a la semana. Para el caso de la estimulación neuro muscular el tiempo fue del mismo tiempo. Ambos métodos tuvieron una duración de 1.5 horas por sesión. Como conclusión en no encontró una diferencia concluyente entre los dos métodos de rehabilitación, aunque en ambos los pacientes si mostraron una recuperación importante.(25).

Este robots de la segunda generación está basada en un robot tipo *end-efector*, PUMA-260, mediante el cual se mueve el brazo del paciente desde el extremo, es decir está sujeto a la muñeca del brazo

Figuras 14 y 15. Pacientes con espasticidad de miembro superior y ortesis usada



Fuente: Tomada y modificada con fines académicos de Rev Col Med Fis Rehab 2020;30(2):103-115 - <http://revistacmfr.org> <http://dx.doi.org/10.28957/rcmfr.v30n2>.

Figura 16. Espasticidad de antebrazo y ortesis empleada(PRO-DWix)



Fuente: Tomada y modificada con fines académicos de: Soriano Mas C, Guillazo Blanch G, Redolar Ripoll DA, Torras García M, Vale Martínez A. Fundamentos de neurociencia. 1a. ed. Barcelona (España): Editorial UOC; 2007 [citado 2020 diciembre 12]. Disponible en: [https://www.editorialuoc.cat/fundamentos-de-neurociencia.\(28\)](https://www.editorialuoc.cat/fundamentos-de-neurociencia.(28)).

de la persona. En la Figura 13 se puede apreciar este robot PUMA durante una de las pruebas de diseño. Y el cual actualmente ha demostrado ser más eficaz en la rehabilitación y devolución de autonomía en el paciente.(25).

El objetivo del diseño es que el exoesqueleto sea usado como equipo para terapias usando la metodología de movimientos espejos. Lo que la persona haga en su brazo sano, se reflejará en el movimiento en la extremidad afectada, es decir el otro brazo. Este diseño está enfocado en miembros superiores para movimiento de flexión y extensión del codo. En la Figura 13 se aprecia un ensayo durante la etapa de diseño del exoesqueleto asistido usando una prótesis antes de ser probado en un humano.

Luego de presentar la revisión bibliográfica se ha podido evidenciar que los equipos robóticos están a la altura de los profesionales de la salud, pero no existe aún evidencia contundente que demuestren que los robots superen a éstos en cuanto a recuperación final. Es decir, un equipo robótico puede suplir al profesional de la salud y lograr los mismos resultados. Los robots utilizados en las terapias para miembros superiores deben garantizar no causarle daños o desmejoras en las condiciones de salud de los pacientes y existen indicadores para medir la evolución de estos y para esto es indispensable que el equipo trabaje sin errores.

Se han implementado los sensores sEMG y unidades de medición inercial para detectar intención de movimiento de los pacientes para los sistemas robóticos y tomar datos éstos, pero no se encontró algún estudio que compare si existe alguna ventaja en su uso para garantizar una operación libre de error en aras de lograr una mejora en los pacientes y no causarle ninguna desmejora en su condición. Este trabajo de investigación contribuirá en este campo a buscar una respuesta a esta inquietud verificar si existe alguna ventaja en el uso de alguno de los sensores anteriormente mencionados con el fin que se tenga un criterio a la hora de seleccionarlos.(26)-(5).

Glosario de casos clínicos exitosos

Primer paciente: La edad de ingreso al estudio fue de 77 años, de sexo femenino y empresaria pensionada con actividad social muy activa. Antecedentes personales de hipertensión arterial, diabetes mellitus, hipotiroidismo y enfermedad pulmonar obstructiva crónica. Presentó un primer evento cerebrovascular isquémico en 2011 y un segundo ictus en 2015; como secuelas neurológicas se constata hemiparesia derecha, disfonía y espasticidad. Recibe terapia física domiciliaria dos veces por semana de forma particular. Es totalmente dependiente y cuenta con auxiliar de enfermería 24 horas. Se entrenaron las auxiliares de enfermería para el manejo de la órtesis robótica en el hogar del paciente (Figuras 14 y 15).

Segundo paciente: Su edad de ingreso al estudio fue de 69 años, de sexo femenino y ocupación en cuidado del hogar. Antecedentes personales de hipertensión arterial y síndrome convulsivo. Presentó un evento cerebrovascular hemorrágico en 1992, posterior a episodio convulsivo durante el posquirúrgico de una resección de meningioma parietal derecho; como secuelas neurológicas se encuentra hemiparesia izquierda y espasticidad. Recibe fisioterapia eventualmente de forma particular. Es totalmente independiente y vive sola, no cuenta con cuidador. Se entrenó al empleado de mantenimiento del edificio para el manejo de la órtesis robótica en el hogar (Figura 16).

Tercer paciente: Su edad de ingreso al estudio fue de 78 años, de sexo femenino y ocupación en cuidado del hogar; antecedentes personales de fibrilación auricular. Presentó un evento cerebrovascular isquémico en 2012; como secuelas neurológicas presenta hemiparesia izquierda y espasticidad. Recibe terapia física domiciliaria dos veces por semana de forma particular. Es parcialmente independiente; sin embargo, el miedo a caer la hace más dependiente, cuenta con familiares cuidadores permanentes. Se entrenó a la hija de la paciente para el uso de la órtesis robótica en el hogar (Figuras 17).

Tabla 3. Caracterización clínica de los pacientes al ingreso del estudio

Paciente	Etiología	Secuela	Espasticidad de mano y muñeca	Tiempo de evolución
1	ACV isquémico	Hemiparesia derecha	severa	6 años
2	ACV Hemorrágico	Hemiparesia Izq.	Moderada	26 años
3	ACV Isquémica	Hemiparesia Izq.	Severa	23 años
5	LMC Traumática	Cuadriparesia espástica	Severa	24 años

Fuente: Tomada y modificada con fines académicos de: 28. Soriano Mas C, Guillazo Blanch G, Redolar Ripoll DA, Torras García M, Vale Martínez A. Fundamentos de neurociencia. 1a. ed. Barcelona (España): Editorial UOC; 2007 [citado 2020 diciembre 12]. Disponible en: <https://www.editorialuoc.cat/fundamentos-de-neurociencia>.(28).

Tabla 4. Valoración del dolor / Escala Visual Análoga (EVA).

Paciente	EVA inicial	EVA a 6 meses	Eva a 12 meses	Eva a 18 meses
1	10	4	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0

Fuente: Tomada y modificada con fines académicos de: Soriano Mas C, Guillazo Blanch G, Redolar Ripoll DA, Torras García M, Vale Martínez A. Fundamentos de neurociencia. 1a. ed. Barcelona (España): Editorial UOC; 2007 [citado 2020 diciembre 12]. Disponible en: <https://www.editorialuoc.cat/fundamentos-de-neurociencia> (28).

Cuarto paciente: La edad de ingreso al estudio fue de 42 años, de sexo masculino y ocupación ingeniero agrónomo y docente virtual del SENA; sin comorbilidades. Presentó lesión medular cervical traumática a nivel C4-C5, derivado de hurto y violencia con arma de fuego en 1994; como secuelas neurológicas se encuentra cuadriparesia espástica a nivel C6 Recibe terapia física irregular por su aseguradora de salud. Es independiente para trabajar desde su computador como docente y escritor; sin embargo, es dependiente para otras actividades básicas y cuenta con familiares cuidadores permanentes. Se entrenó a estos familiares para el manejo de la órtesis robótica en el hogar (Figuras 18)(27)

Evolución de la espasticidad de mano y muñeca. Todos los pacientes disminuyeron el grado de severidad de la espasticidad en mano y muñeca hasta Ashworth 2. Adicionalmente, luego de 12 meses de movilización pasiva con la órtesis robótica de muñeca exclusivamente, se observó que la espasticidad en la muñeca y los dedos llegaba hasta Ashworth 0 durante la terapia robótica (pacientes 2, 3 y 4); excepto en los pacientes con contracturas tendinosas de los dedos, donde el límite del movimiento lo afectaban dichas contracturas solamente los pacientes 1 y 3 permitieron el ensamblaje de la órtesis robótica de mano con la órtesis robótica de muñeca; si bien refirieron una sensación de menor pesadez y menor frialdad en los dedos, no obtuvieron beneficios

adicionales en las escalas de medición con respecto a los pacientes que utilizaron exclusivamente la órtesis de muñeca.(28)

En cuanto al dolor Evolución del dolor. La primer paciente presentaba dolor intenso en mano y muñeca asociado a la severidad de la espasticidad; con el uso de la órtesis robótica disminuyó el dolor hasta EVA 0/10. En general en los pacientes.

Evolución de los arcos de movilidad articular: Todos los pacientes mejoraron.

En cuanto a Calidad de vida. Luego del tercer mes de participar en el estudio, tanto los pacientes como los cuidadores refirieron mejoría en su calidad de vida, principalmente porque era menor el esfuerzo para realizar las actividades básicas (bañarse, vestirse, sentarse, acostarse, comer, etc.). Además, las mujeres refirieron lograr mejorar el aspecto estético de la mano (uñas más largas que no se enterraban en la palma de la mano, pintado de las uñas, mano más abierta).(28).

Todos los pacientes utilizaron el equipo de forma irregular puesto que, en promedio, solo llevaron a cabo el 90% de las sesiones indicadas para el primer semestre, el 70% de las sesiones indicadas para el segundo semestre, y el 60% de las sesiones para el tercer semestre.

Los pacientes no usaron el equipo cuando

Tabla 5. Evolución de arcos de movimientos con la rehabilitación robótica

Paciente	Lado		inicial	6 meses		12 meses			18 meses	
		FLM	EXM	FLM	EXM	FLM	EXM	FLM	FLM	EXM
1	der	40°	10°	40°	<5°	45°	0°	50°	50°	5°
2	izq	55°	0°	65°	10°	75°	25°	90°	35°	5°
3	der	75°	<5°	75°	0°	90°	25°	70°	60°	45°
4	izq	90°	<45°	90°	0°	90°	0°	90°	15°	10°

Fuente: Tomada y modificada con fines académicos de: Soriano Mas C, Guillazo Blanch G, Redolar Ripoll DA, Torras García M, Vale Martínez A. Fundamentos de neurociencia. 1a. ed. Barcelona (España): Editorial UOC; 2007 [citado 2020 diciembre 12]. Disponible en: <https://www.editorialuoc.cat/fundamentos-de-neurociencia>.(28).

se encontraban de viaje o cuando presentaban enfermedades asociadas, la terapia física o robótica fue aceptable; sin embargo, la rehabilitación en el ambiente institucional implicó problemas por el desplazamiento de los pacientes.

Eventos adversos: No se presentaron eventos adversos durante las sesiones de terapias físicas, ni durante las sesiones de terapias de rehabilitación robótica (28-29)

Las ventajas de la movilización pasiva en pacientes con espasticidad de mano y muñeca, mediante rehabilitación robótica domiciliaria, se relacionan con la posibilidad de complementar la rehabilitación convencional; garantizar la implementación de movimientos repetitivos sincrónicos (torque, amplitud y duración); aumentar la frecuencia de las sesiones de fisioterapia; disminuir los traslados de pacientes a centros de rehabilitación; y favorecer la adherencia a los programas de rehabilitación en lugares distantes. un familiar o cuidador entrenado para el uso apropiado del exoesqueleto mecatrónico, la disposición del paciente de acuerdo a su estado de salud físico y mental para adherirse a las sesiones de terapia indicadas, y las fallas técnicas de la tecnología robótica en desarrollo.

Los riesgos para los pacientes, como lesiones en la piel por el contacto con piezas mecánicas, aumento del dolor por fuerza excesiva del exoesqueleto, quemaduras eléctricas y trauma por explosión de servomotores, fueron superados mediante la implementación de estándares de diseño en seguridad mecánica, eléctrica y electromagnética, evitando así que se presentaran eventos adversos durante el desarrollo del estudio (28-29-30)

Reflexión crítica del autor

Las ortesis con robótica son un aliado en la neurorrehabilitación efectiva del paciente y son la mejor forma de no sobrecargar la disponibilidad de recurso humano y económico del sistema, de la misma forma impacta positivamente en la disminución del dolor del eepssapasticidad y de la calidad de vida. Sin embargo aún estamos años luz de la implementación rutinaria de estos dispositivos ya que el desconocimiento al respecto de estos es bastantes así como la concepción equivocada de que son más costosos, por ende queda demostrado que si funcionan e invitan a los profesionales de la fisioterapia y la neurología a implementar y normalizar la necesidad de estas y la propuesta de uso temprano de ortesis robotizadas en los pacientes con lesión de motoneurona superior.

Responsabilidades morales, éticas y bioéticas Protección de personas y animales

Los autores declaramos que, para este estudio, no se realizó experimentación en seres humanos ni en animales. Este trabajo de investigación no implica riesgos ni dilemas éticos, por cuanto su desarrollo se hizo con temporalidad retrospectiva. El proyecto fue revisado y aprobado por el comité de investigación del centro hospitalario. En todo momento se cuidó el anonimato y confidencialidad de los datos, así como la integridad de los pacientes.

Confidencialidad de datos

Los autores declaramos que se han seguido los protocolos de los centros de trabajo en salud, sobre la publicación de los datos presentados de los pacientes.

Derecho a la privacidad y consentimiento informado

Los autores declaramos que en este escrito académico no aparecen datos privados, personales o de juicio de recato propio de los pacientes.

Financiación

No existió financiación para el desarrollo, sustentación académica y difusión pedagógica.

Potencial Conflicto de Interés(es)

Los autores manifiestan que no existe ningún(os) conflicto(s) de interés(es), en lo expuesto en este escrito estrictamente académico.

Bibliografía

1. Robótica para la rehabilitación, Úrsula Costa Fisioterapeuta. Directora clínica en Hocoma. Silvia Díez Fisioterapeuta. Gerente de aplicaciones clínicas en Hocoma LATAM. 2024.
2. Rehabilitation 20240: A Call for Action. WHO meeting report. Accesible en https://www.who.int/disabilities/care/RehabMeetingReport_plain_text_version.pdf
3. Winstein CJ, Stein J, Arena R, Bates B, Cherney LR, Cramer SC, Deruyter F, Eng JJ, Fisher B, Harvey RL, Lang CE, MacKay-Lyons M, Ottenbacher KJ, Pugh S, Reeves MJ, 7 Cochrane Database Syst Rev. 2017 May; 2017(5): CD006185. Published online 2017 May 10.
- 8 Mehrholz J, et al. Electromechanical and robot assisted arm training for improving activities of daily living, arm function and arm muscle strength after stroke. Cochrane Databases Syst Rev, 2018. 9
4. Robótica aplicada a terapias de rehabilitación. Estudio comparativo de dos técnicas de sensado para exoesqueletos asistidos usados en la recuperación de pacientes que han sufrido accidentes cerebrovasculares. Por: Robinson Bornacelli Durán

- TESIS DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
Tutor: Dr. Winston Percy Brooks B. Barranquilla,
Atlántico, Colombia Noviembre 2021 Universidad
del Norte Departamento de Ingenierías Eléctrica y
Electrónica
5. DANE son las siglas de Departamento Administrativo Nacional de Estadística <http://www.dane.gov.co>.
 6. Rocca, A., et al. 2016. Sympathetic activity and early mobilization in patients in intensive and intermediate care with severe brain injury: a preliminary prospective randomized study. *BMC Neurology* 16(1):169. 11
 - Frazzitta, G., Zivi, I., Valsecchi, R., Bonini, S., Maffia, S., Molatore, K., et al. 2016. Effectiveness of a Very Early Stepping Verticalization Protocol in Severe Acquired Brain Injured Patients: A Randomized Pilot Study in ICU. *PLoS ONE* 11.
 7. Spiess M, et al. (2018) Getting the Best Out of Advanced Rehabilitation Technology for the Lower Limbs: Minding Motor Learning Principles. *PM&R. Volumen* 10, 9 S2
 8. Van den Brand R., et al. 2021. Neuroprosthetic technologies augment the impact of neurorehabilitation after spinal cord injury. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine. Volumen* 58, 4.
 9. Targeted neurotechnology restores walking in humans with spinal cord injury FB Wagner, JB Mignardot, CG Le Goff-Mignardot... - *Nature*, 2022
 10. M.-H. Milot, S. Spencer, V. Chan, J. Allington, J. Klein, C. Chou, J. Bobrow, S. Cramés y D. Reinkensmeyer, «A crossover pilot study evaluating the functional outcomes of two different types of robotic movement training in chronic stroke survivors using the arm exoskeleton BONES,» *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 10, nº 112, pp. 1-12, 2013.
 11. I. Díaz, J. J. Gil y E. Sanchez, Lower-Limb Robotic Rehabilitation: Literature Review and Challenges, Hindawi Publishing Corporation *Journal of Robotics*, p. 11, 2020.
 12. F. Reyes, *Robótica - control de robots manipuladores*, Puebla: Alfaomega Grupo Editor, 2020.
 13. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/es/robots-industriales/irb-1410>. [Último acceso: 28 10 2021].
 14. P. L. Encoder, «Linear inductive encoder,» POSIC, 2021. [En línea]. Available: <https://www.posic.com/EN/linear-encoder-id11021.html>. [Último acceso: 29 10 2021].
 15. [15] Learn Channel, *Cómo funciona un Resolver - Animación técnica*, NM: Youtube, 2021.
 16. NIDEC, «RoboteQ,» NIDEC, 2021. [En línea]. Available: <https://www.roboteq.com/applications/all-blogs/14-how-resolvers-work>. [Último acceso: 30 10 2021].
 17. A. Tameem y D. Stashuk, «Clinical Quantitative Electromyography,» de *Electrodiagnosis in New Frontiers of Clinical Research*, Waterloo, Canada, Intech Open, 2013, pp. 89-112.
 18. 18 24] J. Hill, *Exercise Physiology Student*, Spring, 2010
 19. 19. V. De la Vergara, «El método de Rood,» *CAMDE*, 12 2019. [En línea]. Available: <https://camde.es/metodo-rood-alternativa-gustara-conocer/>. [Último acceso: 06 11 2021].
 20. I. D. Guía Rosa, M. A. Cavalcanti García Y M. Nogueira De Souza, «Investigation of probability density functions in modeling sample distribution of surface electromyographic (sEMG) signals,» *Archives of Control Sciences*, vol. 23, nº 4, pp. 381- 393, 2013.
 21. [21] R. H. Chowdhury, M. B. I. Reaz, M. Alauddin Bin Mohd Ali, A. A. Bakar, K. Chellappan y T. G. Chang, «Surface Electromyography Signal Processing and Classification Techniques,» *Sensors*, vol. 13, pp. 12431-12466, 2013.
 22. M. F. Pérez Esparza, A. M. Maldonado Ramírez y M. M. Navarro Duron, «Método Brunnstrom,» *Fisioterapia* 2016, Aguascalientes, 2016.
 23. E. Shwedyk, R. Balasubramanian y R. Scott, A Nonstationary Model for the Electromyogram, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vols. %1 de %2BME-24, Nº 5, pp. 417-424, 1977. [24] J. Hill, *Exercise Physiology Student*, Spri
 24. I. April, M. Germanotta, A. Gruciani, S. Loreti y C. Pecchioli, Upper Limb Robotic Rehabilitation After Stroke: A Multicenter, Randomized Clinical Trial, *Journal of Neurologic Physical Therap*, pp. 3-14, 2020.
 25. J. Daly, N. Hogan, E. Perepezco, H. Krebs, J. Rogers, K. Goyal, M. Dohring, E. Fredickson, J. Nethery y R. Ruff, Response to upper-limb robotics and functional neuromuscular stimulation following stroke, *Journal of Rehabilitation Research & Development*, vol. 42, nº 6, pp. 723-736, 2005.
 26. Y. Ganesan, S. Gobe y V. Durairajah, Development of an Upper Limb Exoskeleton for Rehabilitation with Feedback from EMG and IMU Sensor, *Elsevier*, vol. 1, nº 76, pp. 53- 59, 2015.
 27. *Rev Col Med Fis Rehab* 2020;30(2):103-115 - <http://revistacmfr.org> <http://dx.doi.org/10.28957/rcmfr.v30n2> ARTÍCULO ORIGINAL Rehabilitación robótica en espasticidad de mano y muñeca Robotic rehabilitation in hand and wrist spasticity José Fernando Gómez-Rendón1 , Juan David Moreno-Arango 2 , Javier Mauricio Medina-Salcedo3 , Jimena Becerra-Velásquez 4 , Gilberto Andrés Gil-Henao5 , María Alejandra Gil-Guerrero 6.
 28. Soriano Mas C, Guillazo Blanch G, Redolar Ripoll DA, Torras García M, Vale Martínez A. *Fundamentos de neurociencia*. 1a. ed. Barcelona (España): Editorial UOC; 2007 [citado 2020 diciembre 12]. Disponible en: <https://www.editorialuoc.cat/fundamentos-de-neurociencia>.
 29. Segal M. Muscle Overactivity in the Upper Motor Neuron Syndrome. *Phys. Med Rehabil. Clin N Am*. [Internet]. 2018 [citado 2020 diciembre 15];29(3):427-436. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.pmr.2018.04.005>.
 30. Navarro X, Udina E. Neurofisiología de la espasticidad. En: Juan-García FJ (coord.). *Evaluación clínica y tratamiento de la espasticidad*. Buenos Aires: Editorial Médica Panamericana; 2009 [citado 2020 diciembre 18]. p. 1-15. Disponible en: <https://www.medicapanamericana.com/co/libro/evaluacion-clinica-y-tratamiento-de-la-espasticidad>.
 31. Duchateau J, Enoka RM. Human motor unit recordings: Origins and insight into the integrated motor system. *Brain Res* [Internet]. 2011 [citado 2020 noviembre 27];1409:42-61. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2011.06.011>. Errata en: *Brain Res*. 2011 Nov 3;1421:121.
 32. Trompetto C, Marinelli L, Mori L, Pelosin E, Currà A, Moluffa L, et al. Pathophysiology of spasticity: implications for neurorehabilitation. *BioMed Res Int*. 2014;2014:354906. Disponible en: <http://doi.org/10.1155/2014/354906>. Epub 2014 Oct 30.
 33. Sepúlveda P, Bacco JL, Cubillos A, Doussoulín A. Espasticidad como signo positivo de daño

- de motoneurona superior y su importancia en rehabilitación. CES Med [Internet]. 2018 [citado 2020 diciembre 35];32(3):259-260. Disponible en: <https://revistas.ces.edu.co/index.php/medicina/article/view/4528>
34. Sáinz-Pelayo MP, Albu S, Murillo N, Benito-Penalva J. Espasticidad en la patología neurológica. Actualización sobre mecanismos fisiopatológicos, avances en el diagnóstico y tratamiento. Rev Neurol [Internet]. 2020 [citado 2020 diciembre 37];70(12):453-460. Disponible en: <http://doi.org/10.33588/rn.7012.2019474>
 35. Ferrer Pastor M, Iñigo Huarte V, Juste Díaz J, Goiri Noguera D, Sagues Colom A, Cerezo Durá M. Revisión sistemática del tratamiento de la espasticidad en el adulto con daño cerebral adquirido. Rehabilitación. [Internet]. 2020 [citado 2020 Diciembre 37];54(1):51-62. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.rh.2019.06.006>.
 36. Khan F, Amatya B, Bensmail D, Yelnike A. Non-pharmacological interventions for spasticity in adults: An overview of systematic reviews. Ann Phys Rehabil Med [Internet]. 2019 [citado 2020 diciembre 14];62(4):265-273. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2017.10.001>.
 37. Chang E, Ghosh N, Yanni D, Lee S, Alexandru D, Mozaffar T. A Review of Spasticity Treatments: Pharmacological and Interventional Approaches. Crit. Rev Phys Rehabil Med [Internet]. 2013 [citado 2020 diciembre;25(1-2):11-22. Disponible en: <https://doi.org/10.1615/critrevphysrehabilmed.2013007945>.
 38. Huan Y, Nam C, Li W, Rong W, Xie Y, Liu Y, et al. A comparison of the rehabilitation effectiveness of neuromuscular electrical stimulation robotic hand training and pure robotic hand training after stroke: A randomized controlled trial, Biomed Signal Process Control. [Internet]. 2020 [citado 2020 diciembre 17];56:101723. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2019.101723>.
 39. De-la-Torre R, Oña ED, Balaguer C, Jardón A. Robot-Aided Systems for Improving the Assessment of Upper Limb Spasticity: A Systematic Review. Sensor [Internet]. 2020 [citado 2020 diciembre 17];20(1):5251. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/s20185251>.
 40. Godfrey SB, Holley RJ, Lum PS. Clinical effects of using HEXORR (Hand Exoskeleton Rehabilitation Robot) for movement therapy in stroke rehabilitation. Am J Phys Med Rehabil [Internet]. 2013 [citado 2020 Diciembre