

Prototipo de un Wearable Robotics para miembro superior como asistencia de Hemiplejia Parcial

Prototype of a Werable Robotics System for Upper Limb Assistance in Partial Hemiplegia

Juan José Carreras-Espinal¹, Ian Herrera-Vázquez¹, Yatzitl Donají Argüelles-Salgado^{1*} y Freddy Antonio Ix Andrade¹

¹Ingeniería Biomédica, Universidad Modelo, antigua carretera a Cholul, CP 97305, Mérida, Yucatán

*Corresponding author:

14150140@modelo.edu.mx

Resumen. La extremidad superior, en particular la mano, desempeña un papel fundamental en la interacción con el entorno, permitiendo la manipulación de objetos y el soporte del cuerpo. Su complejidad y versatilidad la convierten en una estructura esencial para la vida diaria. Este estudio analiza la biomecánica del miembro superior, considerando su función en la precisión de movimientos y en la asistencia de pacientes con Hemiplejía Parcial debido a un Accidente Cerebro Vascular (ACV). Se presentan enfoques de diseño para dispositivos de asistencia, destacando su impacto en la recuperación funcional. La investigación explora nuevas tecnologías aplicadas a la asistencia motora, enfatizando la importancia del desarrollo de soluciones innovadoras para mejorar la calidad de vida de los pacientes.

Palabras Clave: Asistencia, Hemiplejía Parcial, Miembro superior, Prototipo, Exoesqueleto.

Abstract. The upper limb, particularly the hand, plays a fundamental role in interacting with the environment, enabling object manipulation and body support. Its complexity and versatility make it an essential structure for daily life. This study analyzes the biomechanics of the upper limb, considering its role in movement precision and in assisting patients with Partial Hemiplegia resulting from a Cerebrovascular Accident (CVA). Design approaches for assistive devices are presented, highlighting their impact on functional recovery. The research explores emerging

technologies applied to motor assistance, emphasizing the importance of developing innovative solutions to improve patients' quality of life. are presented, highlighting their impact on functional recovery. The research explores emerging technologies applied to motor assistance, emphasizing the importance of developing innovative solutions to improve patients' quality of life.

Keywords: Assistance, Partial Hemiplegia, Upper Limb, Prototype, Exoskeleton

I. INTRODUCCIÓN

La extremidad superior, en particular la mano, desempeña un papel esencial en nuestras vidas al ser el principal medio de interacción con el entorno, gracias a su complejidad y versatilidad para manipular objetos y brindar apoyo (Nordin, 2013). Esta capacidad se ve comprometida ante lesiones del sistema motor, como los accidentes cerebrovasculares (ACV), una de las principales causas de muerte y discapacidad en el mundo, con más de 16 millones de casos en 2010 y 33 millones de personas viviendo con secuelas (Carvalho, 2024).

En México, los ACV provocaron alrededor de 37 mil muertes en 2021, siendo la séptima causa de fallecimiento. Se estiman 118 casos por cada 100 mil habitantes, de los cuales siete de cada diez desarrollan algún tipo de

discapacidad (Secretaría de Salud, 2022). A nivel mundial, los ACV representan la principal causa de discapacidad en adultos (OPS, 2021), lo que implica una importante pérdida de autonomía funcional.

Alrededor de mil millones de personas en el mundo enfrentan dificultades para recuperar el uso del brazo debido a la interrupción en la comunicación entre el sistema nervioso y los músculos (Discapacidad, 2023), afectando gravemente su calidad de vida y su capacidad para realizar tareas cotidianas básicas.

En este contexto, los exoesqueletos han tenido un impacto significativo en el ámbito de la asistencia, al ofrecer soporte mecánico a zonas lesionadas del cuerpo para facilitar el movimiento en actividades diarias (López et al., 2014). Un ejemplo de ello es el dispositivo desarrollado por Luca Randazzo en 2024: una mano exoesquelética impresa en 3D, equipada con actuadores lineales y servomotores, que permite recuperar hasta el 70% del rango de movimiento necesario para realizar tareas comunes, todo ello con un diseño portable y de bajo costo.

Aunque el entrenamiento robótico ha demostrado ser eficaz en la rehabilitación (Varalta, 2014), su aplicación suele quedar restringida a centros especializados, lo que limita su acceso y uso cotidiano (Randazzo, 2017). Por esta razón, los exoesqueletos diseñados específicamente como dispositivos de asistencia funcional, y no exclusivamente de rehabilitación, se presentan como una alternativa más práctica, capaz de integrarse en la vida diaria de los usuarios.

Sin embargo, uno de los principales retos en su desarrollo es el tamaño y la incomodidad que pueden generar, dificultando su uso prolongado. En respuesta a esta problemática, el objetivo es desarrollar un prototipo de exoesqueleto asistivo enfocado en la recuperación y asistencia de la movilidad fina del brazo derecho para Miguel Adolfo Martínez Ramírez, un ingeniero industrial de 56 años con hemiplejía parcial tras un ACV, con el fin de facilitar su rehabilitación y promover su independencia en actividades diarias y laborales.

II. METODOLOGÍA

La elaboración de un exoesqueleto asistencial es un proceso complejo, por lo que se dividió en dos etapas para lograr una mejor organización y control del desarrollo.

A. Planeación completa del exoesqueleto

Como punto de partida, se utilizó el software Kinovea para analizar los ángulos y rangos de movimiento del miembro superior (ver Figura 1), evaluando tanto los movimientos individuales de los dedos como la rotación de la muñeca, con el fin de determinar la cantidad de actuadores necesarios para replicar los movimientos articulares desde el hombro hasta la mano.



Figura 1. Evaluación de rangos de movimiento del miembro superior. Fuente: Elaboración propia.

Para la articulación del codo, se diseñaron dos estructuras base que funcionaran como soporte y sujeción, uniendo al usuario con el exoesqueleto, y sirviendo como punto de anclaje para los sistemas de accionamiento, asegurando además una adecuada distribución de carga en el brazo y antebrazo.

Dado que los rangos de movimiento pueden variar por edad, género o condición física, se contempló una etapa de calibración al momento de colocarse el dispositivo, ajustándolo a las características del usuario.

B. Diseño Integrado en Autodesk Fusion

Se realizó un diseño preliminar del exoesqueleto en Autodesk Fusion, considerando las funcionalidades clave necesarias para lograr un movimiento fluido. El modelo se diseñó de manera que se pueda adaptarse a la longitud del brazo y antebrazo de distintos usuarios para permitir el movimiento.

Se utilizó filamento PLA para su impresión 3D, logrando una estructura ligera y resistente. La articulación del codo incorpora un conjunto de engranajes para permitir movimientos de flexión y extensión. El diseño inicial se sustituyó por una estructura tubular y ergonómica, con puntos de inserción ajustables en ancho y largo para cada usuario, como se observa en la Figura 2.

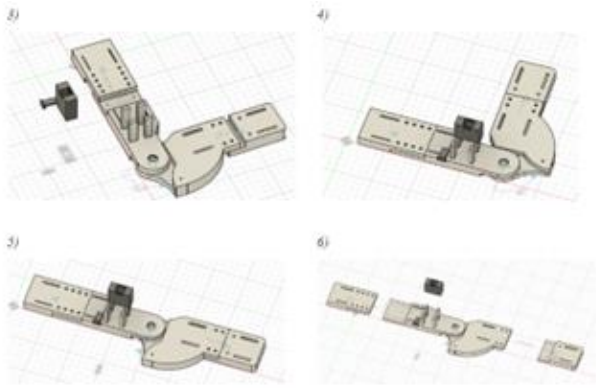


Figura 2. Diseño 3D del brazo y antebrazo. Fuente: Elaboración propia.

C. Diseño y construcción del circuito

El sistema de control y potencia fue diseñado en dos partes para ejecutar los movimientos de forma eficiente. La primera consiste en un puente H con MOSFETs, que permite controlar la dirección e intensidad de la corriente hacia los motores, garantizando una respuesta rápida. La segunda incluye optoacopladores, que aíslan eléctricamente el sistema de control del de potencia, protegiendo tanto los componentes como al usuario ante posibles fallos observable en la Figura 5.

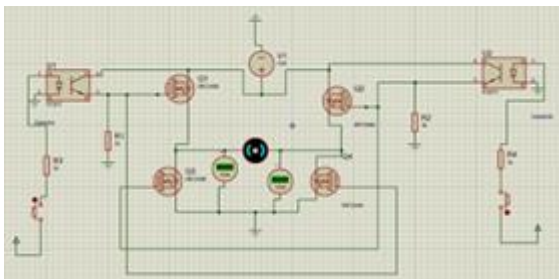


Figura. 3. Representación esquemática del sistema de control. Fuente: Elaboración propia.

III. RESULTADOS

En la Figura 4 se muestra la primera iteración del prototipo físico en un sujeto de prueba. Permite extensión mayor a 170°, y una flexión de 75°.

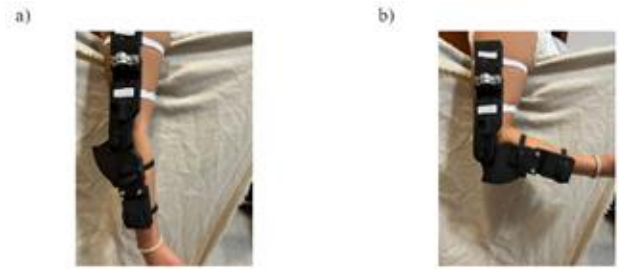


Figura 4. a) Movimiento de extensión del brazo) Movimiento de flexión del brazo. Fuente: Elaboración propia.

IV. DISCUSIÓN

Se presentan los resultados del exoesqueleto de brazo diseñado como dispositivo de asistencia funcional, en comparación con estudios previos que permiten contextualizar su eficacia y diseño (Carvalho, 2024; López et al., 2014; Nordin, 2013; Randazzo et al., 2018; Varalta et al., 2014; Vargas & Ramírez, 2019).

En el hombro, se descartó un sistema de tres engranajes por su complejidad técnica, pero se logró una mejora significativa en la amplitud de movimiento. El diseño ofrece mayor comodidad y flexibilidad frente a modelos más rígidos y estáticos descritos en la literatura.

Para el codo, se implementó un sistema de engranajes estabilizado con bandas elásticas y velcro, fabricado en impresión 3D, lo que permitió una estructura más ligera, portátil y funcional. A diferencia de exoesqueletos convencionales de gran tamaño, el presente modelo proporciona mayor libertad de movimiento y mejor adaptación al usuario.

V. CONCLUSIONES

El prototipo desarrollado logró asistir eficazmente el movimiento del brazo, facilitando la ejecución de actividades básicas y promoviendo una mayor independencia funcional en los usuarios. Uno de los principales logros fue el diseño de una estructura ligera, ergonómica y personalizable, fabricada en filamento PLA mediante impresión 3D, lo que permitió adaptar las piezas a distintas dimensiones corporales, mejorando significativamente la comodidad y usabilidad en comparación con modelos más rígidos.

En cuanto al sistema electrónico, se desarrolló un circuito compacto de control y potencia, compuesto por un puente H con MOSFETs y optoacopladores, que permitió un control eficiente de los motores y una mayor seguridad operativa. A nivel mecánico, el uso de poleas y engranajes

permitió movimientos más naturales y eficientes del brazo. Además, se resolvieron limitaciones iniciales como la falta de soporte para la inserción del brazo, incorporando un diseño más cómodo y ajustable.

A lo largo del proceso, se superaron varias limitaciones, como la falta de soporte en el diseño inicial para la correcta inserción del brazo, lo cual fue resuelto en la versión final. Los resultados obtenidos confirman que este tipo de tecnología portátil representa una alternativa viable y accesible para brindar soporte funcional a personas con discapacidad motriz, con potencial de mejorar su calidad de vida e independencia en actividades cotidianas.

Actualmente, el proyecto avanza hacia una nueva etapa, enfocada en la adquisición de señales electromiográficas (EMG) y el desarrollo de un sistema de control con retroalimentación, que permita detectar la intención de movimiento del usuario y generar una asistencia activa en la dirección deseada visto en la figura (5). Este sistema, apoyado en herramientas como MATLAB, permitirá realizar ajustes en tiempo real, adaptando el movimiento asistido a los límites del usuario, de forma segura, fluida y sin interferir con su intención de acción.

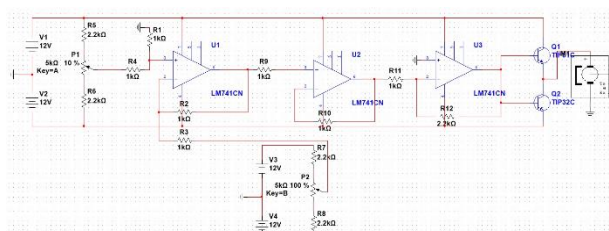


Figura 5. Diagrama del sistema de retroalimentación.
Fuente: Elaboración propia.

REFERENCIAS

Carvalho, M.V.P., Miranda de Sá, A.M.F.L., Pino, A.V., Fontana, A.P., Tierra-Criollo, C.J. (2024). Motion Evaluation of a Finger Exoskeleton for Rehabilitation. In: Marques, J.L.B., Rodrigues, C.R., Suzuki, D.O.H., Marino Neto, J., García Ojeda, R. (eds) IX Latin American Congress on Biomedical Engineering and XXVIII Brazilian Congress on Biomedical Engineering. CLAIB CBEB 2022 2022. IFMBE Proceedings, vol 100. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-49407-9_51

Discapacidad (2023). La inclusión de la discapacidad. Banco Mundial. Recuperado el 6 de febrero de 2024 de: <https://www.bancomundial.org/es/topic/disability>

López, R., Aguilar, H., Salazar, S., Lozano, R., & Torres, J. A. (2014). Modelado y Control de un Exoesqueleto para la Rehabilitación de Extremidad Inferior con dos grados de libertad. Revista iberoamericana de automática e informática industrial, 11(3), 304-314.

Nordin, M. (2013). Basic biomechanics of the musculoskeletal system (4th ed.). Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins.

OPS (2021). Causas principales de mortalidad y discapacidad. Paho.org. Recuperado el 6 de febrero de 2024 de: <https://www.paho.org/es/enlace/causas-principales-mortalidad-discapacidad>

Randazzo, L., Iturrate, I., Perdakis, S., & Millán, J. d. R. (2018). Mano: A wearable hand exoskeleton for activities of daily living and neurorehabilitation. IEEE Robotics and Automation Letters, 3(1), 500–507. <https://doi.org/10.1109/lra.2017.2771329>

Secretaría de Salud (2022). En 2021, ictus o enfermedad vascular cerebral ocasionó más de 37 mil decesos en México. Gobierno de México. Recuperado el 6 de febrero de 2024 de: <https://www.gob.mx/salud/prensa/531-en2021-ictus-o-enfermedad-vascular-cerebral-ocasiono-mas-de-37-mil-decesos-en-mexico>

Varalta, V., Picelli, A., Fonte, C., Montemezzi, G., La Marchina, E., & Smania, N. (2014). Effects of contralesional robot-assisted hand training in patients with unilateral spatial neglect following stroke: a case series study. Journal of Neuroengineering and Rehabilitation, 11(1), 160. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-11-160>

Vargas, K. V., & Ramírez, É. A. M. (2019). Biomecánica de las lesiones en hombro: revisión bibliográfica crítica desde la perspectiva médico legal laboral. Medicina Legal de Costa Rica, 36(2), 56-67. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1409-00152019000200056