



EVALUACIÓN ANTROPOMÉTRICA BIOMÉDICA Y DISEÑO MECÁNICO CONCEPTUAL DE UN SISTEMA ROBÓTICO PARA LA REHABILITACIÓN PASIVA DE MIEMBROS INFERIORES EN PACIENTES POST-ACCIDENTE CEREBROVASCULAR

BIOMEDICAL ANTHROPOMETRIC EVALUATION AND CONCEPTUAL MECHANICAL DESIGN OF ROBOTIC SYSTEM FOR LOWER LIMBS PASSIVE-REHABILITATION ON POST-STROKE PATIENTS

Cesar Martel Cervantes ¹, Carol Sandoval ¹, Ricardo Palomares ¹,
Jeanette Borja Arroyo ², Margarita Murillo Manrique ¹, Jose Cornejo ¹

RESUMEN

Antecedentes: El accidente cerebrovascular (ACV) es una de las principales causas de discapacidad permanente, ya que puede provocar lesiones cerebrales graves con secuelas físicas significativas, limitando la capacidad de realizar actividades diarias. **Objetivo:** Esta investigación tuvo como objetivo diseñar un sistema robótico de movimiento pasivo-continuo para la rehabilitación de miembros inferiores en pacientes adultos con ACV, mejorando así las probabilidades de recuperación de su movilidad de marcha. **Metodología:** Se llevó a cabo el modelado y simulación del sistema robótico mediante Diseño Asistido por Computadora (CAD), utilizando el software de ingeniería Autodesk Inventor Professional 2023. **Resultados:** Se obtuvieron las posiciones iniciales y finales del sistema robótico, así como la simulación de movimiento pasivo-continuo. **Conclusiones:** La toma de medidas precisas de un paciente maximiza la posibilidad de implementar un prototipo funcional que contribuya en el proceso de rehabilitación.

Palabras claves: Robótica; Rehabilitación; Miembros Inferiores; Diseño; Accidente Cerebro Vascular; Simulación. (Fuente: DeCS- BIREME)

ABSTRACT

Background: Cerebrovascular accident (CVA) is one of the main causes of permanent disability, as it can cause serious brain injuries with significant physical consequences, limiting the ability to perform daily activities. **Objective:** This research aimed to design a robotic system of passive-continuous movement for the rehabilitation of lower limbs in adult patients with stroke, thus improving the chances of recovery of their walking mobility. **Methods:** Modeling and simulation of the robotic system using Computer Aided Design (CAD), using the engineering software Autodesk Inventor Professional 2023. **Results:** The initial and final positions of the robotic system were obtained, as well as the simulation of passive-continuous movement. **Conclusions:** Taking precise measurements of a patient maximizes the possibility of implementing a functional prototype that contributes to the rehabilitation process.

Keywords: Robotics; Rehabilitation; Lower Limbs; Design; Cerebrovascular Accident; Simulation. (Source: MESH-NLM)

¹ Grupo de Investigación en Robótica y Mecatrónica Avanzada (GI-ROMA), Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

² Hospital Edgardo Rebagliati Martins, Lima, Perú.

Citar como: Martel Cervantes C, Sandoval C, Palomares R, Borja Arroyo J, Murillo Manrique M, Cornejo J. Evaluación Antropométrica Biomédica y Diseño Mecánico Conceptual de un Sistema Robótico para la Rehabilitación Pasiva de Miembros Inferiores en Pacientes Post-Accidente Cerebrovascular. Rev Fac Med Hum. 2024;24(2):72-81. [doi 10.25176/RFMH.v24i2.6550](https://doi.org/10.25176/RFMH.v24i2.6550)

Journal home page: <http://revistas.urp.edu.pe/index.php/RFMH>

Artículo publicado por la Revista de la Facultad de Medicina Humana de la Universidad Ricardo Palma. Es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons: Creative Commons Attribution 4.0 International, CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite el uso no comercial, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada. Para uso comercial, por favor póngase en contacto con revista.medicina@urp.pe



INTRODUCCIÓN

En el Perú, según la Encuesta Especializada sobre discapacidad realizada en el año 2017 por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), el 10.3% de la población es decir, aproximadamente 3 millones 209 mil 261 personas, tiene alguna discapacidad⁽¹⁾. De los cuales se registró un total de 10 570 casos de pacientes con accidente cerebro vascular⁽²⁾. Se estima que el 60% de personas hospitalizadas por ACV padecen de secuelas discapacitantes y solo el 20% de los afectados completan programas de rehabilitación física⁽³⁾. Según el INEI de 2019, el 88.6% de la población total con algún tipo de discapacidad no recibió tratamiento ni terapia de rehabilitación, mientras que solo el 11.4% logró acceder a algún tipo de atención en este sentido⁽⁴⁾. Esta disparidad puede atribuirse, en parte, a la carencia de utilización de equipos tecnológicos de rehabilitación en el Perú, debido a factores económicos y a la falta de conocimiento sobre la existencia de estos dispositivos como parte de las terapias de rehabilitación física.

El accidente cerebrovascular (ACV) puede prevenirse llevando una vida saludable y en caso de ocurrir, puede tratarse efectivamente si el paciente es llevado a emergencias de un hospital lo antes posible tras presentar los primeros signos, momento en el cual las probabilidades de recuperación son altas⁽⁵⁾. Por los motivos antes mencionados, se propone el diseño de un sistema robótico de movimiento pasivo-continuo para la rehabilitación de miembros inferiores en pacientes adultos afectados por ACV. Este sistema busca facilitar y maximizar la recuperación de las funciones motoras de las extremidades inferiores, tanto en el hogar como en centros hospitalarios, con monitoreo y seguimiento por parte del médico rehabilitador.

En la actualidad se han desarrollado diversos estudios para dar solución a los diversos problemas de movilidad de los miembros inferiores, entre ellos por ejemplo el desarrollo de sistemas para asistencia en marcha⁽⁶⁾, tratamiento de discapacidades motoras causadas por parálisis cerebral⁽⁷⁾ y desarrollo de aplicaciones de control para sistemas exoesqueléticos⁽⁸⁾. No obstante, los primeros modelos de exoesqueletos surgieron en la década de 1960 en los laboratorios de la Universidad de Cornell⁽⁹⁾. La estructura de Yang representa uno de los primeros intentos documentados con características exoesqueléticas, cuyo objetivo primordial era aumentar la potencia en el ritmo de la caminata, así

como en los saltos⁽¹⁰⁾. Sin embargo, el motor, el sistema de alimentación (batería) y la tecnología computacional de la época limitaban en gran medida la portabilidad del dispositivo⁽¹¹⁾.

En España, en la Universidad Politécnica de Catalunya, se presentó un diseño de ortesis activa rodilla-tobillo⁽¹²⁾. Este proyecto se enfoca en asistencia y la recuperación de pacientes con lesión medular, cuya condición suele dejarles sin movilidad en aproximadamente un 80% de su cuerpo. En Latinoamérica, se han desarrollado exoesqueletos destinados a la rehabilitación de brazos como de piernas. En el ámbito de la rehabilitación de brazos, por ejemplo, se han realizado avances con exoesqueletos que ofrecen hasta cuatro grados de libertad, adaptados a la antropometría de pacientes mexicanos mediante un diseño conceptual óptimo⁽¹³⁾. Estos exoesqueletos enfocados al movimiento de rotación del húmero, flexión y extensión del codo⁽¹⁴⁾, pronación y supinación de la mano⁽¹⁵⁾. En el caso de la rehabilitación de la pierna, se han desarrollado sistemas con dos grados de libertad para terapias en tobillo y rodilla, que incluyen el uso de sensores de fuerza, velocidad y posición⁽¹⁶⁾, así como diseños exclusivos para la flexión-extensión de la rodilla⁽¹⁷⁾. En este sentido, la aplicación de la tecnología en la rehabilitación física mejora la independencia del paciente a la hora de acudir a sus terapias, como demuestra la investigación⁽¹⁸⁾.

En conclusión, el desarrollo del proyecto representa un avance significativo en la implementación de equipos de rehabilitación que mejoran la condición física de pacientes con limitaciones de marcha debido a un accidente cerebrovascular, permitiéndoles ser más independientes en sus actividades diarias. En el futuro, el objetivo de la investigación es implementar el sistema robótico de miembros inferiores, brindando a los pacientes la oportunidad de recuperar un componente esencial de su función y autonomía bajo la supervisión del médico rehabilitador.

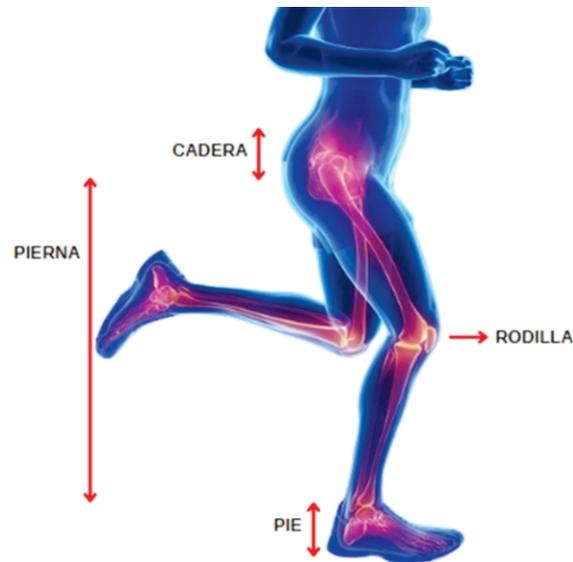
MÉTODOS

Análisis biomecánico de miembros inferiores

El presente proyecto se enfoca en el análisis biomecánico de las extremidades inferiores que comprende la rodilla y pie como se muestra en la Figura 1, con el propósito de diseñar un sistema robótico para la rehabilitación de pacientes con accidente

cerebrovascular (ACV). Se examinan los movimientos y funciones de las articulaciones en diferentes contextos para identificar las necesidades específicas de rehabilitación. Los factores biomecánicos críticos a considerar en el diseño de un exoesqueleto son los

grados de libertad y los movimientos⁽¹⁹⁾, los cuales son fundamentales para el desarrollo del modelado asistido por computadora CAD que facilite la recuperación de la función motora en pacientes que han experimentado un ACV.

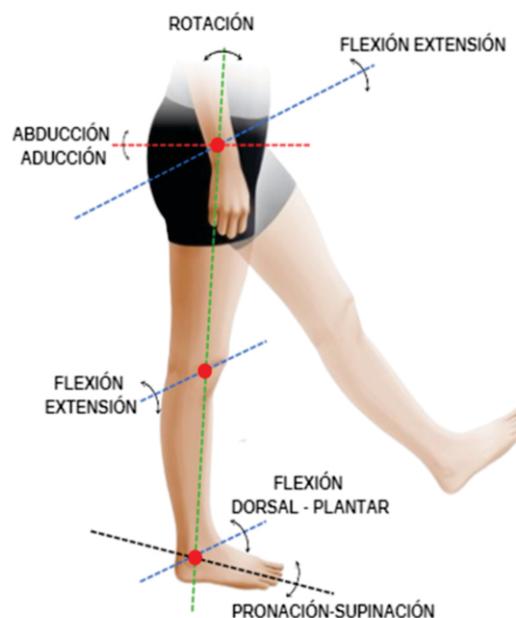


Fuente: Adaptado de https://www.goconqr.com/es/p/26439765?dont_count=true&frame=true&fs=true

Figura 1. Anatomía del miembro inferior.

Se ilustran las articulaciones del miembro inferior, incluyendo la cadera, la rodilla y el tobillo⁽²⁰⁾, representadas por círculos rojos. Las líneas conectan estas articulaciones, mostrando las trayectorias de movimiento durante el proceso de rehabilitación⁽²¹⁾. Se observa cómo el diseño del sistema permite la

realización de movimientos multidireccionales y ajustes personalizados, ofreciendo una amplia gama de ejercicios para mejorar la movilidad y la fuerza muscular en pacientes con disfunción en las extremidades inferiores como se muestra en la Figura 2.



Fuente: Adaptado de <https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/tipos-de-movimientos-del-cuerpo-humano>

Figura 2. Movimiento de articulaciones del miembro inferior.

Según la Tabla 1, los grados de movimiento biomecánico en las articulaciones de la rodilla y el tobillo ⁽²²⁾ permite diseñar sistemas robóticos de rehabilitación que pueden proporcionar terapias personalizadas y específicas para cada paciente. La capacidad de ajustar la resistencia y la velocidad del

movimiento en función de las necesidades individuales de cada paciente ⁽²³⁾ resulta fundamental para optimizar los resultados de rehabilitación y promover una recuperación efectiva de la función motora en los miembros inferiores.

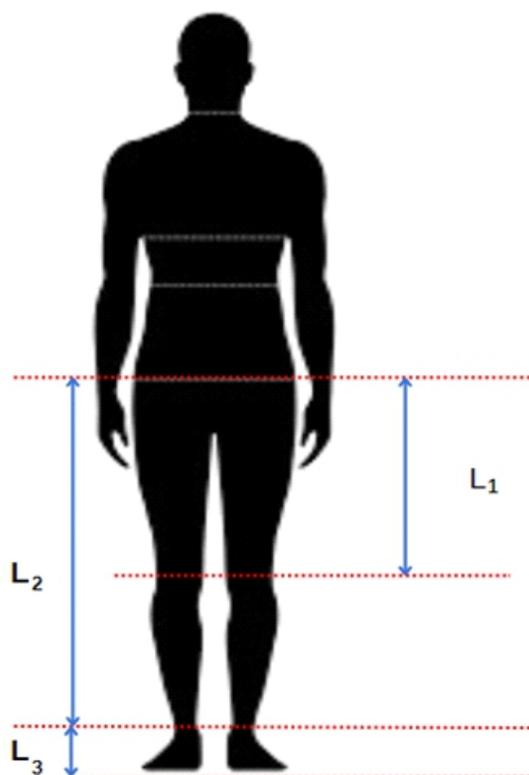
Tabla 1. Grados de movimiento de la articulación de rodilla y tobillo.

Articulación	Movimiento	Grados
Rodilla	Extensión - flexión	0° a 120°
Tobillo	Flexión plantar - dorsal	-40° a 20°
	Supinación - Pronación	-35° a 15°

Fuente: Tomado de "Biomecánica básica del sistema musculoesquelético" (Nordin, 2004).

Se realizó la medición del miembro inferior dividiéndolo en L1, L2 y L3 como se muestra en la Figura 3, esto se basa en la anatomía y las proporciones individuales del paciente ⁽²⁴⁾, la correcta implementación de estas mediciones antropométricas garantiza una adecuada alineación biomecánica y una

distribución equilibrada de las cargas durante el proceso de rehabilitación, lo que es esencial para maximizar la eficacia y la seguridad del tratamiento. Esto permite ajustar de manera óptima para realizar el prototipo del diseño CAD del sistema robótico de rehabilitación de miembros inferiores.



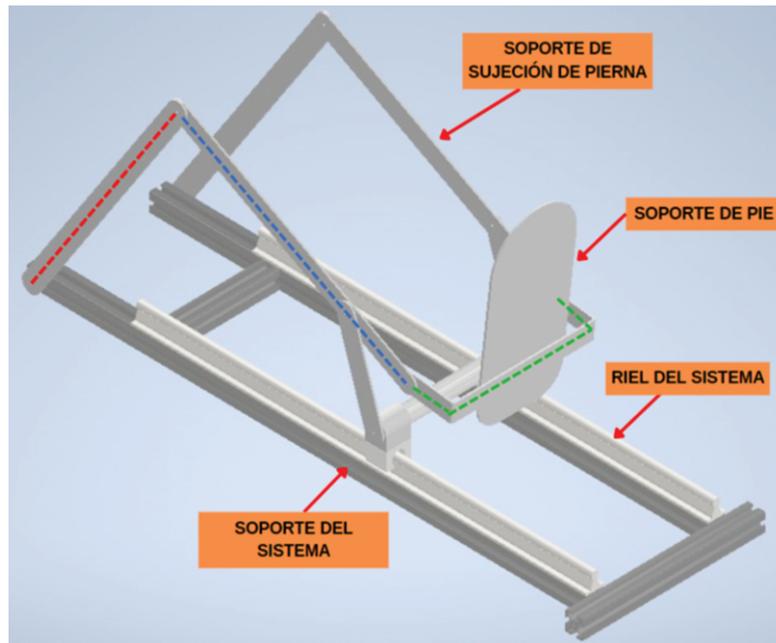
Fuente: Adaptado de <https://depositphotos.com/es/vectors/icono-cuerpo-humano.html>

Figura 3. Medidas antropométricas del miembro inferior.

Diseño Mecánico 3D del sistema robótico

El presente diseño mecánico del sistema robótico se basa en las medidas antropométricas del paciente, centrándose principalmente en la biomecánica de cada articulación. Su objetivo es llevar a cabo una rehabilitación adecuada de la rodilla y el tobillo como resultado de un accidente cerebrovascular ⁽²⁵⁾. Se empleó el software Autodesk Inventor Professional 2023 para diseñar las partes de la estructura, que se

divide en un soporte de sujeción de pierna y pie, similar al exoesqueleto ⁽¹⁸⁾ en la que los resultados obtenidos se encuentran dentro de los límites de resistencia permitida para la validación y selección de los materiales. Además, la base del dispositivo está compuesta por un soporte y un riel del sistema, como se muestra en la Figura 4. Se planea prototipar este dispositivo utilizando impresión 3D en la siguiente etapa del proyecto ⁽²⁶⁾.



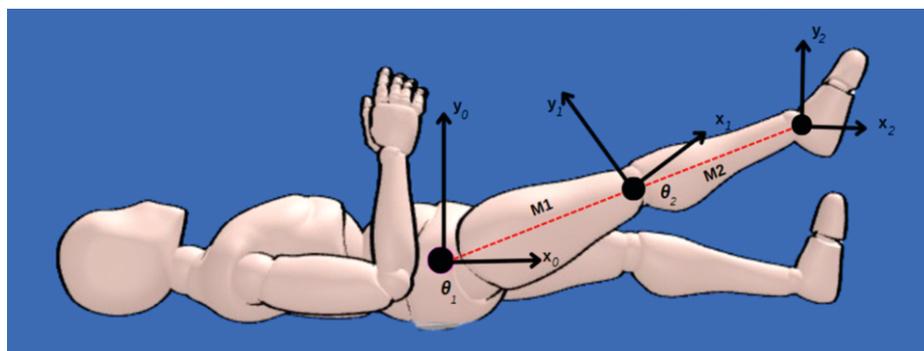
Fuente: Elaborado en Autodesk Inventor Professional 2023.

Figura 4. Diseño CAD del sistema de rodilla y tobillo.

Estructura cinemática del miembro inferior

El objetivo de la cinemática en un sistema robótico de miembro inferior es analizar la capacidad de movimiento mediante la posición y orientación con

valores de coordenadas articulares ⁽²⁷⁾. La figura 5 muestra la representación geométrica del miembro inferior del paciente.



Fuente: Elaborado en Just Sketch software.

Figura 5. Estructura cinemática de miembro inferior.

En la Tabla 2 se muestra los parámetros geométricos del miembro inferior según la convención de Denavit-Hartenberg (D-H) de acuerdo a los sistemas de referencias y dimensiones de la Figura 5 ⁽²⁸⁾.

Tabla 2. Parámetros articulares D-H para la pierna.

Link i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	M_1	0	0	θ_1
2	M_2	0	0	θ_2

Donde:

i = representa el número de la articulación

a_i = distancia a lo largo del eje x_i

α_i = ángulo entre los ejes z_i y z_{i+1}

d_i = distancia entre los ejes z_i

θ_i = ángulo entre los ejes x_i y x_{i+1}

El modelo cinemático directo permite calcular la posición y orientación de la pierna en función de sus ángulos articulares.

Por lo que, es necesario calcular la matriz de transformación homogénea A_i de cada articulación como se representa en la ecuación 1.

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) * \cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i) * \sin(\alpha_i) & M_i * \cos(\theta_i) & \sin(\theta_i) * \cos(\theta_i) * \cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i) * \sin(\alpha_i) & M_i * \sin(\theta_i) & 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Sustituyendo los parámetros articulares de la Tabla 2 en la ecuación 1 se obtiene las siguientes matrices:

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) * \cos(\alpha_1) & \sin(\theta_1) * \sin(\alpha_1) & M_1 * \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) * \cos(\theta_1) * \cos(\alpha_1) & -\cos(\theta_1) * \sin(\alpha_1) & M_1 * \sin(\theta_1) & 0 & \sin(\alpha_1) & \cos(\alpha_1) & d_1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & M_1 * \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) * \cos(\theta_1) & 0 & M_1 * \sin(\theta_1) & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) * \cos(\alpha_2) & \sin(\theta_2) * \sin(\alpha_2) & M_2 * \cos(\theta_2) & \sin(\theta_2) * \cos(\theta_2) * \cos(\alpha_2) & -\cos(\theta_2) * \sin(\alpha_2) & M_2 * \sin(\theta_2) & 0 & \sin(\alpha_2) & \cos(\alpha_2) & d_2 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & M_2 * \cos(\theta_2) & \sin(\theta_2) * \cos(\theta_2) & 0 & M_2 * \sin(\theta_2) & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Para obtener el modelo cinemático directo (posición y orientación del extremo) del miembro inferior es necesario multiplicar las matrices A_1 y A_2 . Por lo que, la

matriz de transformación homogénea que representa la posición y orientación está representada en la ecuación 2.

$$T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 & M_1 * \cos(\theta_1) + M_2 * \cos(\theta_2) & \sin(\theta_1 + \theta_2) * \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & M_1 * \sin(\theta_1) + M_2 * \cos(\theta_2) & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

RESULTADOS

En la presente investigación se analizó los datos antropométricos de un paciente de 40 años de edad como

se muestra en la Tabla 3, con limitación de miembros inferiores a causa de un accidente cerebro vascular con una altura de 170 cm y con un peso de 90 kg.

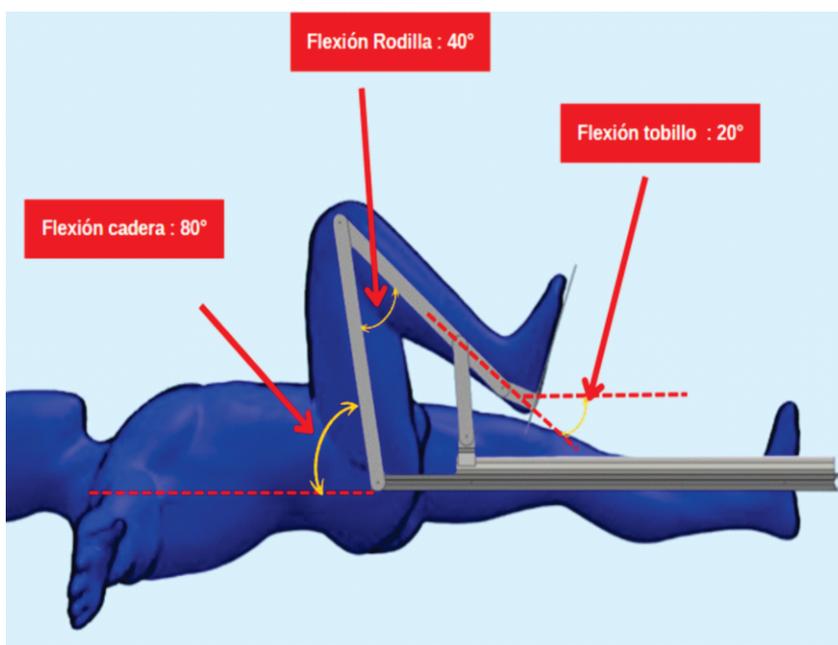
Tabla 3. Mediciones de miembro inferior del paciente.

Extremidad	Dimensión (cm)
Muslo	43.01
Pierna	41.99
Pie	6.63

ARTÍCULO ORIGINAL

Los resultados de la simulación realizado en Software Autodesk Inventor Professional 2023, como se muestra en la Figura 6, indican que el sistema robótico cumple con los requisitos funcionales para la rehabilitación y mejora de espasticidad de miembros inferiores en pacientes con accidente cerebrovascular.

Los movimientos de flexión máxima alcanzados (80° en cadera, 40° en rodilla y 20° en tobillo) están dentro de los rangos terapéuticos establecidos, lo que sugiere que el dispositivo puede ser eficaz en la mejora de los grados de movimiento en estos pacientes, mejora valorada mediante la Escala de Asword modificada⁽²⁹⁾.

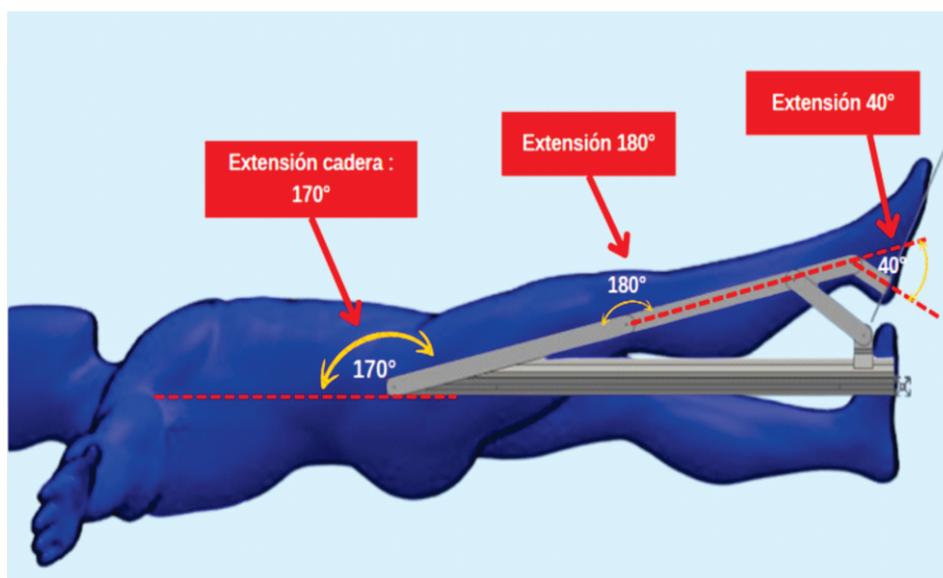


Fuente: Elaborado en Autodesk Inventor Professional 2023.

Figura 6. Simulación del sistema robótico en flexión.

Para la extensión de la rodilla, el sistema alcanzó con éxito los 180°, lo que representa una extensión completa. Este rango es fundamental para facilitar movimientos naturales y actividades diarias como caminar, levantarse y sentarse. La simulación mostró que el mecanismo de la rodilla es capaz de soportar la carga sin comprometer la estabilidad, lo cual es esencial para la rehabilitación efectiva.

La precisión en la simulación sugiere que el sistema puede replicar movimientos fisiológicos con alta fidelidad, lo cual es esencial para evitar lesiones y maximizar la eficacia de la terapia. Además, la estabilidad del sistema bajo las condiciones de máxima extensión garantiza que los pacientes puedan utilizarlo de manera segura durante sesiones prolongadas de rehabilitación.



Fuente: Elaborado en Autodesk Inventor Professional 2023.

Figura 7. Simulación del sistema robótico en extensión.

Los ángulos de extensión máxima alcanzados en la cadera (170°), rodilla (180°) y tobillo (40°), como se muestra en la Tabla 4, son adecuados para facilitar una recuperación funcional integral.

Estos resultados respaldan el uso de este sistema como una herramienta potencialmente valiosa en programas de rehabilitación física, contribuyendo a mejorar la calidad de vida de los pacientes.

Tabla 4. Mediciones de miembro inferior del paciente.

Extremidad	Figura 7	Figura 8
Cadera	80°	170°
Rodilla	40°	180°
Tobillo	20°	40°

La precisión en la simulación sugiere que el sistema puede replicar movimientos fisiológicos con alta fidelidad, lo cual es esencial para evitar lesiones y maximizar la eficacia de la terapia.

CONCLUSIONES

En conclusión, la presente investigación demuestra que el sistema robótico médico⁽³⁰⁾ de miembro inferior ha sido diseñado con principios biomecánicos y simulado con el uso del algoritmo Denavit-Hartenberg (D-H), demostrando que tiene el potencial de ser una herramienta valiosa en la rehabilitación de pacientes con accidente cerebrovascular, al ofrecer movimientos de rodilla y tobillo que son esenciales para la recuperación

funcional. Además, las matrices de transformación homogénea permiten realizar gráficas de desplazamiento y simulaciones del movimiento de la pierna, proporcionando una mejor comprensión y control del proceso rehabilitador.

Los ángulos de extensión y flexión alcanzados por el sistema son adecuados para facilitar una recuperación integral. La capacidad del sistema para mantener estos ángulos de manera estable y controlada garantiza que los pacientes puedan realizar los ejercicios de rehabilitación necesarios sin riesgo de lesiones, lo cual es esencial para una terapia segura y efectiva, mejorando así significativamente la calidad de vida de los pacientes con



accidente cerebrovascular. Los resultados obtenidos no solo confirman la conceptualización de la viabilidad técnica del sistema, sino que también abren la posibilidad de desarrollar prototipos reales y evaluarlos en entornos clínicos, e incluso este proyecto tiene el potencial de poder ser utilizado en futuros viajes espaciales donde se requiera la rehabilitación de miembros inferiores, ya que en ambientes de baja gravedad existe un deterioro muscular

(31).

Contribuciones de autoría: C.M.C. y C.S. participaron en la conceptualización, investigación, metodología, análisis e interpretación de datos, recursos y redacción del borrador original; J.B.A. participó en supervisión clínica y aplicativa de resultados; R.P., M.M.M. y J.C. participaron en supervisión y asesoría técnica, análisis e interpretación de datos; redacción del artículo; revisión crítica del artículo.

Financiamiento: El presente artículo es producto de la primera fase del proyecto de investigación "Diseño y simulación de un sistema robótico de movimiento

Como trabajo futuro, se propone implementar y probar el prototipo, realizando evaluaciones de espasticidad en la Escala de Ashworth modificada antes y después del uso del dispositivo, en un grupo de pacientes con ACV para validar su eficacia in-situ y optimizar el diseño llevándolo a un modelo ergonómico. En la siguiente etapa del proyecto, la cual involucrará el uso en personas, se contará con el permiso del Comité de Ética.

pasivo-continuo para la rehabilitación de miembros inferiores para pacientes adulto con hemiplejía a causa de accidentes cerebro vasculares (ACV)" aprobado con el Acuerdo de Consejo Universitario N°182-2024 y financiado por el Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Ricardo Palma.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Recibido: 15 de Mayo, 2024.

Aprobado: 08 de Junio, 2024.

Correspondencia: Carol Sandoval.

Dirección: Av. Alfredo Benavides 5440, Santiago de Surco 15039, Lima-Perú.

Teléfono: (+51) 999661222

Correo electrónico: keiko.sandoval@urp.edu.pe

REFERENCIAS

1. INEI, "Perú Características de la Población con Discapacidad" Instituto Nacional de Estadística e Informática. Lima, Perú. Accedido: agosto de 2023. [Online]. Disponible: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1209/Libro.pdf
2. Bernabé-Ortiz A, Carrillo-Larco RM. Tasa de incidencia del accidente cerebrovascular en el Perú. Revista peruana de medicina experimental y salud pública. 2021 Dec 20;38:399-405. doi: [10.17843/rpmpesp.2021.383.7804](https://doi.org/10.17843/rpmpesp.2021.383.7804)
3. Ortiz KA, Luyo FL. La importancia de la rehabilitación en el Accidente Cerebrovascular en el Perú. Inter ciencia médica. 2021;11(4):69-70. doi: [10.56838/icmed.v11i4.11](https://doi.org/10.56838/icmed.v11i4.11)
4. Ministerio de Salud (2019). Prevención y manejo de condiciones secundarias de salud en personas con discapacidad. https://www.minsa.gob.pe/presupuestales/doc2019/pp/anexo/ANEXO2_8.pdf
5. Instituto Nacional de Ciencias Neurológicas. (2021). El ataque cerebrovascular sí se puede prevenir y tratar. <https://www.incn.gob.pe/2021/10/29/el-ataque-cerebrovascular-si-se-puede-prevenir-y-tratar/>
6. Lee Y, Kim YJ, Lee J, Lee M, Choi B, Kim J, Park YJ, Choi J. Biomechanical Design of a Novel Flexible Exoskeleton for Lower Extremities," in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 22, no. 5, pp. 2058-2069, Oct. 2017, doi: [10.1109/TMECH.2017.2718999](https://doi.org/10.1109/TMECH.2017.2718999)
7. Lerner ZF, Damiano DL, Park HS, Gravunder AJ, Bulea TC. A robotic exoskeleton for treatment of crouch gait in children with cerebral palsy: Design and initial application. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2016 Jul 27;25(6):650-9. doi: [10.1109/TNSRE.2016.2595501](https://doi.org/10.1109/TNSRE.2016.2595501)
8. Kim S, Bae J. Force-mode control of rotary series elastic actuators in a lower extremity exoskeleton using model-inverse time delay control. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2017 Mar 27;22(3):1392-400. doi: [10.1109/TMECH.2017.2687979](https://doi.org/10.1109/TMECH.2017.2687979)
9. Velandía C, Celedón H, Tibaduiza DA, Torres-Pinzón C, Vitola J. Design and control of an exoskeleton in rehabilitation tasks for lower limb. In 2016 XXI Symposium on Signal Processing, Images and Artificial Vision (STSIVA) 2016 Aug 31 (pp. 1-6). IEEE. doi: [10.1109/STSIVA.2016.7743341](https://doi.org/10.1109/STSIVA.2016.7743341)
10. Dollar AM, Herr H. Lower extremity exoskeletons and active orthoses: Challenges and state-of-the-art. IEEE Transactions on robotics. 2008 Feb 25;24(1):144-58. doi: [10.1109/TRO.2008.915453](https://doi.org/10.1109/TRO.2008.915453)
11. Pamungkas DS, Caesarendra W, Soebakti H, Analia R, Susanto S. Overview: Types of lower limb exoskeletons. Electronics. 2019 Nov 4;8(11):1283. doi: [10.3390/electronics8111283](https://doi.org/10.3390/electronics8111283)
12. Yan T, Cempini M, Oddo CM, Vitiello N. Review of assistive strategies in powered lower-limb orthoses and exoskeletons. Robotics and Autonomous Systems. 2015 Feb 1;64:120-36. doi: [10.1016/j.robot.2014.09.032](https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.09.032)
13. Ayala-Lozano JF, Urriolagoitia-Sosa G, Romero-Angeles B, Miguel TS, René C, Aguilar-Pérez LA, Urriolagoitia-Calderón GM. Mechanical design of an exoskeleton for upper limb rehabilitation. Revista Colombiana de Biotecnología. 2015 Jan;17(1):79-90. doi: [10.15446/rev.colomb.biote.v17n1.44188](https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v17n1.44188)
14. Gutiérrez Carvajal RE, Vanegas F, Duque J, Avilés O, Niño P. Diseño y control de un exoesqueleto para rehabilitación motora en miembro superior. In IV Latin American Congress on Biomedical Engineering 2007, Bioengineering Solutions for Latin America Health: September 24th–28th, 2007 Margarita Island, Venezuela 2008 (pp. 758-761). Springer Berlin Heidelberg. doi: [10.1007/978-3-540-74471-9_176](https://doi.org/10.1007/978-3-540-74471-9_176)
15. Plaza A, Hernandez M, Puyuelo G, Garces E, Garcia E. Lower-limb medical and rehabilitation exoskeletons: A review of the current designs. IEEE Reviews in Biomedical Engineering. 2021 May 7;16:278-91. doi: [10.1109/RBME.2021.3078001](https://doi.org/10.1109/RBME.2021.3078001)
16. López R, Aguilar H, Salazar S, Lozano R, Torres JA. Modelado y Control de un Exoesqueleto para la Rehabilitación de Extremidad Inferior con dos grados de libertad. Revista iberoamericana de automática e informática industrial. 2014;11(3):304-14. doi: [10.1016/j.riai.2014.02.008](https://doi.org/10.1016/j.riai.2014.02.008)
17. Chen B, Zi B, Wang Z, Qin L, Liao WH. Knee exoskeletons for gait rehabilitation and human performance augmentation: A state-of-the-art. Mechanism and Machine Theory. 2019 Apr 1;134:499-511. doi: [10.1016/j.mechmachtheory.2019.01.016](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.01.016)
18. Sandoval C, Martel C, Palomares R, Arroyo JB, Manrique MF, Cornejo J. Conceptual Mechatronic Design of Ankle-foot Exoskeleton System for Assisted Rehabilitation of Pediatric Patients with Spastic Cerebral Palsy. In 2023 IEEE MIT Undergraduate Research Technology Conference (URTC) 2023 Oct 6 (pp. 1-5). IEEE. doi: [10.1109/URTC60662.2023.10534922](https://doi.org/10.1109/URTC60662.2023.10534922)



19. Lugo E, Ponce P, Molina A, Castro S. Co-simulación del Diseño Biomecánico para un exoesqueleto robótico del miembro inferior. *Revista mexicana de ingeniería biomédica*. 2014;35(2):143-56. URL: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-95322014000200004
20. Azocar AF, Mooney LM, Hargrove LJ, Rouse EJ. Design and characterization of an open-source robotic leg prosthesis. In 2018 7th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (Biorob) 2018 Aug 26 (pp. 111-118). IEEE. doi: [10.1109/BIOROB.2018.8488057](https://doi.org/10.1109/BIOROB.2018.8488057)
21. Ntai A, Zahou F, Paradisis G, Smirniotou A, Tsolakis C. Anthropometric parameters and leg power performance in fencing. Age, sex and discipline related differences. *Science & Sports*. 2017 Jun 1;32(3):135-43. doi: [10.1016/j.scispo.2016.06.011](https://doi.org/10.1016/j.scispo.2016.06.011)
22. Guzmán Valdivia CH, Carrera Escobedo JL, Blanco Ortega A, Oliver Salazar MA, Gómez Becerra FA. Diseño y control de un sistema interactivo para la rehabilitación de tobillo: TobíBot. *Ingeniería mecánica, tecnología y desarrollo*. 2014;5(1):255-64. URL: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-73812014000200003
23. Comfort P, Jones PA, Smith LC, Herrington L. Joint kinetics and kinematics during common lower limb rehabilitation exercises. *Journal of athletic training*. 2015 Oct 1;50(10):1011-8. doi: [10.4085/1062-6050-50.9.05](https://doi.org/10.4085/1062-6050-50.9.05)
24. Rodríguez-Herrera R, Losardo RJ, Binignat O. La anatomía humana como disciplina indispensable en la seguridad de los pacientes. *International Journal of Morphology*. 2019;37(1):241-50. doi: [10.4067/S0717-95022019000100241](https://doi.org/10.4067/S0717-95022019000100241)
25. Zhang X, Yue Z, Wang J. Robotics in lower-limb rehabilitation after stroke. *Behavioural neurology*. 2017 Jun 8;2017. doi: [10.1155/2017/3731802](https://doi.org/10.1155/2017/3731802)
26. Cornejo J, Cornejo-Aguilar JA, Vargas M, Helguero CG, Milanezi de Andrade R, Torres-Montoya S, Asensio-Salazar J, Rivero Calle A, Martínez Santos J, Damon A, Quiñones-Hinojosa A. Anatomical Engineering and 3D printing for surgery and medical devices: International review and future exponential innovations. *BioMed research international*. 2022;2022(1):6797745. doi: [10.1155/2022/6797745](https://doi.org/10.1155/2022/6797745)
27. Aguirre J, Pérez MB, Palomares R, Cornejo J. Ergonomic Bio-Design and Motion Simulation of a Mechatronic Orthosis System for Knee Rehabilitation. In 2022 IEEE XXIX International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON) 2022 Aug 11 (pp. 1-4). IEEE. doi: [10.1109/INTERCON55795.2022.9870040](https://doi.org/10.1109/INTERCON55795.2022.9870040)
28. Nasrabadi AA, Absalan F, Moosavian SA. Design, kinematics and dynamics modeling of a lower-limb walking assistant robot. In 2016 4th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM) 2016 Oct 26 (pp. 319-324). IEEE. doi: [10.1109/ICROM.2016.7886867](https://doi.org/10.1109/ICROM.2016.7886867)
29. Harb A, Kishner S. Modified Ashworth Scale. [Updated 2023 May 1]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK554572/>
30. Cornejo J, Barrera S, Ruiz CH, Gutierrez F, Casasnovas MO, Kot L, Solis MA, Larenas R, Castro-Niery F, Saavedra MA, Serrezuela RR. Industrial, collaborative and mobile robotics in Latin America: Review of mechatronic technologies for advanced automation. *Emerging Science Journal*. 2023 Jul 12;7(4):1430-58. doi: [10.28991/ESJ-2023-07-04-025](https://doi.org/10.28991/ESJ-2023-07-04-025)
31. Rivera MV, Cornejo J, Huallpayunca K, Diaz AB, Ortiz-Benique ZN, Reina AD, Lino GJ, Ticlacuri V. Medicina humana espacial: Performance fisiológico y contramedidas para mejorar la salud del astronauta. *Revista de la Facultad de Medicina Humana*. 2020 Apr;20(2):303-14. doi: [10.25176/rfmh.v20i2.2920](https://doi.org/10.25176/rfmh.v20i2.2920)