

## ARTÍCULO ACEPTADO

# Innovación en la robótica médica para la rehabilitación de miembro superior

Issy Madelein Hernández Durán, Juana Mariel Dávila Vilchis, Adriana Herlinda Vilchis González y Juan Carlos Ávila Vilchis

## Introducción

La robótica, en conjunto con la rehabilitación, abren una ventana de oportunidades para crear Robots Médicos que den solución a la demanda de las discapacidades motoras, y que permitan aumentar la neuroplasticidad en los pacientes.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), se estima que cerca de 2,4 millones de personas en el mundo, tienen alguna afectación neurológica que se vería beneficiada al recibir algún tipo de rehabilitación, tal es el caso de la espasticidad, que ocurre en numerosas afectaciones neurológicas, como la esclerosis múltiple (EM), los accidentes cerebrovasculares (AC), lesiones medulares (LM), tumores y otras enfermedades.

El cuerpo humano posee 4 miembros: 2 miembros superiores y 2 inferiores; donde estos últimos están altamente ligados a la locomoción, mientras que los superiores se encuentran relacionados con la prensión o agarre.

El miembro superior se puede ver afectado por patologías de todo tipo, siendo una de las principales afectaciones la espasticidad, que se define como el aumento desmedido de los reflejos en los estiramientos tónicos [1], por lo que el tendón es estirado con exageración debido a una hiperexcitación, generando con ello una postura inadecuada del músculo.

Este trastorno muscular, se manifiesta como un desorden en el control sensoriomotor que se caracteriza por el aumento en la excitabilidad de los reflejos de estiramiento, produciendo engrandecimiento del tono muscular, lo que el paciente percibe como una rigidez constante, a la que se le añaden trastornos de movilidad, espasmos y dolor.

La prevalencia de la espasticidad es variable en cada patología: en las LM se estima que el 40 % de los pacientes la presentan; en la EM, luego del primer año de

presentar algún síntoma, es del 67 % [1], sin embargo, se refiere que un 80 % de los pacientes con EM la presentan en algún momento; y finalmente, en los AC se estima que es del 38 % al 40 %, de acuerdo a estudios reportados se indica que de 498 pacientes con infarto cerebral, el 34.5 % podrían presentar espasticidad en el miembro superior.

En las afectaciones más comunes generadas por la espasticidad en el miembro superior, se presenta exacerbación en la aducción en hombro, flexión en codo, pronación en antebrazo, flexión en muñeca, mano en puño, pulgar pegado a la mano y dedos engarrotados [1].

## El papel de la robótica en la rehabilitación

En la rehabilitación se realizan tareas centradas en movimientos altamente repetitivos, por lo que la duración, capacidad e intensidad permiten obtener un impacto positivo en la mejoría de la parte motora.

Es por ello, que en el campo de la medicina, se ha incursionado la robótica médica, donde los sistemas se caracterizan por tener una relación física con la persona o paciente [2].

Estos sistemas pueden ir desde el microrobot cápsula que navega por el interior del cuerpo humano, los robots asistentes que permiten realizar tareas de la vida cotidiana, robots quirúrgicos como el Da Vinci, hasta robots asistenciales como el Nurse-Bot o de rehabilitación, como los Bionik [2].

La participación de los robots en el proceso de rehabilitación permiten realizar ejercicios de manera pasiva como activa, además de recibir información durante los movimientos del paciente; todo esto mientras el terapeuta guía la sesión y evalúa la información arrojada por el robot como fuerza, posición y velocidad [2].

---

**La rehabilitación es de gran importancia, dado que se prevé un incremento de padecimientos crónicos y discapacitantes.**

---

## Avances en la Robótica Médica

A través de los años, la robótica médica ha ido evolucionado; inicialmente se propusieron sistemas robóticos rígidos, caracterizados por la formación de una cadena cinemática de varios grados de libertad, constituidos por

eslabones y articulaciones, que, en conjunto, efectúan el movimiento deseado.

Estos desarrollos, se componen de elementos mecánicos robustos, que presentan mínima o nula deformación elástica, así como adaptabilidad [3].

Aunque estos robots han tenido un gran auge en los últimos años, al fabricarse con materiales rígidos presentan limitaciones en el peso, en los sistemas de actuación y para su manipulación requieren de grandes espacios de trabajo, en la Figura 1, se muestran algunos ejemplos de robots médicos rígidos.



Figura 1. Ejemplos de Robots Médicos Rígidos.

Como solución a lo anterior, ha surgido un nuevo enfoque, la robótica suave, con propuestas de diseño inspiradas en sistemas biológicos, como los pulpos o las medusas, que presentan la capacidad de adaptarse a diversos entornos y sus cambios [3].

Este tipo de robots se caracterizan por ser ligeros, ofrecen mayor seguridad, ajuste, movilidad, utilizan materiales flexibles, presentan una deformación constante, cuentan con grados de libertad más complejos que simulan la anatomía humana de forma natural; por lo que la implementación de robots suaves brinda mayor accesibilidad y aceptación por parte del paciente, debido a que los diseños simples coinciden con las características del cuerpo.

## Desarrollos a lo largo del tiempo para rehabilitar el miembro superior

Este artículo presenta una revisión del estado del arte acerca de robots médicos que han sido desarrollados durante los últimos 10 años, específicamente para tareas de rehabilitación de miembro superior enfocados en el tratamiento de la espasticidad, causada principalmente por AC, EM y LM o atrofia muscular.

De los artículos encontrados, se excluyeron aquellos que no estuvieran relacionados con el miembro superior,









ni con la rigidez; también se adoptó una clasificación de los robots rígidos y suaves para establecer criterios de diseño basados en su funcionalidad, movilidad y usabilidad propuestos por Dávila-Vilchis y colaboradores [4]. Los criterios a considerar, son los siguientes:

1. Tipo de robot (rígidos o suaves).
2. Función (rehabilitación y/o asistencia).
3. Articulación (hombro, codo, muñeca, mano o dedos).
4. Aplicación (patología o actividad).
5. Sistema de actuación (neumáticos y eléctricos).
6. Número de grados de libertad (GDL).
7. Movimiento (flexión-extensión, abducción-aducción, rotación o todos).
8. Material.
9. Peso.
10. Fuerza.
11. Presión que ejerce el sistema.
12. Configuración.
13. Variable de control; la cual permite evaluar el seguimiento del sistema, por ejemplo, mediante el rango de movilidad, electromiografía (EMG), fuerza o presión.

Los resultados de esta revisión presentan un análisis de 16 robots para rehabilitación de miembro superior, de los cuales 14 son suaves y 2 son rígidos, lo que demuestra que hay una tendencia en los diseños enfocados a robótica suave, debido a sus múltiples bondades al ser dispositivos más cómodos y amigables con el paciente durante el protocolo de rehabilitación.

En la Tabla 1, se resumen 8 sistemas más vanguardistas de los últimos 5 años para miembro superior, incluyendo sus 13 criterios de diseño, presentados anteriormente, de acuerdo con la información proporcionada en la literatura. De manera general, la rehabilitación de miembro superior incluye robots rígidos que apoyan en los movimientos de flexión, extensión, abducción, aducción y rotación para rehabilitación de todo el miembro superior con el fin de recuperar la movilidad para actividades de la vida cotidiana [5], o bien, como los que se encargan de la flexión y extensión de codo y muñeca [6].

Tabla 1. Clasificación de robots médicos para rehabilitación de miembro superior.

Tipo de robot	Rehabilitación	Articulación	Aplicación	Actuación	GDL	Movimiento	Material	Peso (gr)	Fuerza (N)	Presión (kPa)	Configuración	Variable de control	Robot Médico
Suave	Rehabilitación	Miembro superior	Aumento muscular	Eléctrica	6	Flexión- extensión, abducción- aducción y rotación	Neopreno	1300	88.3	N/A	Lazo cerrado	Acción del usuario	
Suave	Asistencia	Dedos	Mano humanoide	Neumática	13	Flexión- extensión	Silicona	1270	5.7-8.5	160	Lazo cerrado	Presión	
Suave	Rehabilitación	Muñeca	Secuelas de accidente cerebrovascular	Eléctrica	2	Flexión- extensión y abducción- aducción	Silicona	1003	50	60	--	EMG	
Suave	Rehabilitación	Muñeca	Lesión	Neumática	3	Flexión- extensión, abducción- aducción y rotación	--	--	--	--	--	EMG	
Suave	Rehabilitación	Muñeca	Secuelas de accidente cerebrovascular	Eléctrica	2	Flexión- extensión y abducción- aducción	Poliuretano termoplástico	--	--	200	--	EMG	
Suave	Rehabilitación	Muñeca	Secuelas de accidente cerebrovascular	Neumática	1	Flexión- extensión	Silicona	--	--	15	--	--	
Suave	Rehabilitación	Muñeca	Discapacidad motora	Neumática	3	Flexión- extensión y abducción- aducción	Acero elástico	--	--	0 - 500	Lazo abierto	EMG	
Suave	Rehabilitación	Muñeca	Discapacidad motora	Neumática	2	Flexión- extensión y abducción- aducción	Acetato de etileno y vinilo	241	7.5	206	Lazo cerrado	Presión	

Por otro lado, estas mismas articulaciones se están trabajando con robots suaves, cuyos sistemas de actuación son accionados por cables y motores eléctricos para el aumento muscular de todo el miembro superior [7]; o por actuadores neumáticos, que trabajan la articulación del codo en conjunto con la muñeca y mano, enfocándose también a la asistencia de pacientes con AC [8].

Para este análisis, 10 de los sistemas revisados son para rehabilitación, mientras que 5 son para asistencia y solo uno posee ambas funciones.

Por otro lado, la rehabilitación en el segmento distal es la más sobresaliente con 9 sistemas para muñeca y 4 para dedos, mientras que para el segmento proximal se encontraron 2. Además, es notable que los AC son prioridad en el desarrollo de estos sistemas.

En la Figura 2, se muestra una gráfica de los robots que se han desarrollado para las principales articulaciones de miembro superior.

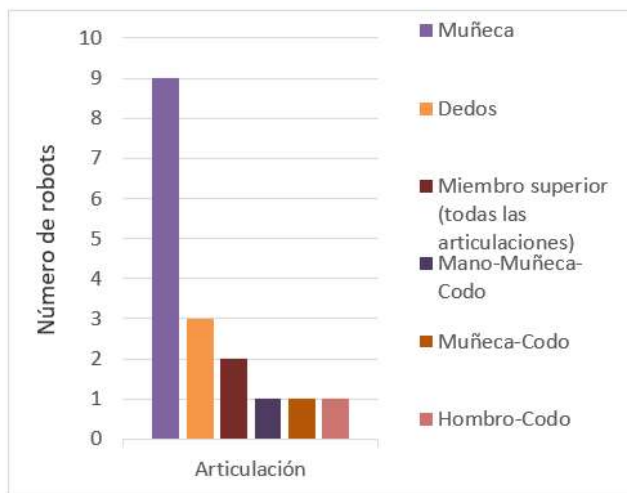


Figura 2. Desarrollo de robots para articulación.

Investigaciones recientes, sugieren que las cámaras semicirculares fabricadas con elastómeros presentan mayor eficiencia en cuanto a la presión ejercida y el ángulo de flexión, en comparación de aquellas cámaras triangulares o con forma de trapecoide [9].

Por otro lado, en el caso de actuadores neumáticos, basados en músculos artificiales como los McKibben, se requieren de presiones altas para alcanzar el rango de movimiento deseado [8].

Recientemente, la nueva propuesta son los robots neumáticos origami, cuyos diseños compactos permiten alcanzar movimientos de flexión, extensión, abducción y aducción de muñeca a través del dobles de caras hexagonales [10].

## Conclusiones

La robótica en conjunto con la rehabilitación abre una ventana de oportunidades para crear Robots Médicos que den solución a la demanda de las discapacidades motoras

en ambos miembros, y que permitan aumentar la neuroplasticidad en los usuarios.

La mayoría de los robots mencionados se orientan en AC, dejando así un abanico de posibilidades para incursionar en la espasticidad y su relación con otras patologías, como la esclerosis múltiple, a fin de apoyar en la rehabilitación motriz, y, por ende, a reaprender, restaurar o mejorar los movimientos funcionales de los pacientes, donde el dispositivo permita alcanzar su fin último, que es incidir en una movilidad mejorada y repercutir positivamente en la calidad de vida de los pacientes.

Principalmente se sugiere trabajar en el desarrollo de prototipos con el enfoque de robótica suave, ya que proponen diseños ergonómicos, portables, ligeros, compactos, de fácil uso dado que se han convertido en una herramienta de asistencia durante los protocolos de rehabilitación para médicos, terapeutas y pacientes.

Además, esta nueva vertiente de la robótica permite innovar en futuras propuestas, materiales y modelos de actuación con la finalidad de ofrecer sistemas que garanticen la seguridad, comodidad y movilidad del paciente.\*

## REFERENCIAS

- Gómez-Rendón, J.F., Moreno-Arango, J.D., Medina-Salcedo, J.M., Becerra-Velásquez, J., Gil-Henao, G.A. y Gil-Guerrero, M. A. (2020). Rehabilitación robótica en espasticidad de mano y muñeca. *Revista Colombiana de Medicina Física y Rehabilitación*, 30(2).
- Sabater-Navarro, J., Saltaren, R., Ibarra-Zannatha, J., Rodríguez Cheu, L., Vivas, A., Politti, J., Serracín, J. y Rubio, E. (2013). ROBOTICA MEDICA – Notas prácticas para el aprendizaje de la robótica en bioingeniería. *CYTED*.
- Rus, D. y Tolley, M. T. (2015). Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*, 521(7553).
- Dávila-Vilchis, J.-M., Ávila-Vilchis, J.C., Vilchis-González, A.H. y LAZ-Avilés. (2020). Design Criteria of Soft Exogloves for Hand Rehabilitation-Assistance Tasks. *Applied Bionics and Biomechanics*.
- Balasubramanian, S., Wei, R., Perez, M., Shepard, B., Koene-man, E., Koene-man, J. y He, J. (2008). RUPERT: An exoskeleton robot for assisting rehabilitation of arm functions. *2008 Virtual Rehabilitation*, 163-167.
- Nam, H. S., Koh, S., Kim, Y. J., Beom, J., Lee, W. H., Lee, S.-U. y Kim, S. (2017). Biomechanical Reactions of Exoskeleton Neurorehabilitation Robots in Spastic Elbows and Wrists. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 25(11), 2196-2203.
- Lessard, S., Pansodtee, P., Robbins, A., Baltaxe-Admony, L. B., Trombadore, J. M., Teodorescu, M., Agogino, A. y Kurniawan, S. (2017). CRUX: A compliant robotic upper-extremity exosuit for lightweight, portable, multi-joint muscular augmentation. En *2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, 1633-1638.
- Bartlett, N.W., Lyau, V., Raiford, W.A., Holland, D., Gafford, J.B., Ellis, T.D. y Walsh, C.J. (2015). A Soft Robotic Orthosis for Wrist Rehabilitation. *Journal of Medical Devices*, 9(3).
- Xu, Y. (2020). Design and Simulation of a Soft Robotic Device for Wrist Rehabilitation. En *2020 3rd International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE)*, 697-701.
- Liu, S., Fang, Z., Liu, J., Tang, K., Luo, J., Yi, J., Hu, X. y Wang, Z. (2021). A Compact Soft Robotic Wrist Brace With Origami Actuators. *Frontiers in Robotics and AI*, 8.



## SOBRE LOS AUTORES



**Issy Madelein Hernández Durán** es pasante de Bioingeniería Médica de la Universidad Autónoma del Estado de México. Se desempeña actualmente como auditor en el departamento de Ingeniería Biomédica en un hospital de segundo nivel y en el desarrollo de un sistema suave para rehabilitación de espasticidad de muñeca. Sus áreas de interés incluyen Robótica Médica, Rehabilitación y Robots Suaves.



**Juana Mariel Dávila Vilchis** es Doctora en Ciencia de la Ingeniería con enfoque en Robótica Suave por la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM). Actualmente, forma parte del Sistema Nacional de Investigadores. Es académica de asignatura e investigadora en las áreas de Robótica, Tecnología Médica y Energías Renovables en la Facultad de Ingeniería de la UAEM.



**Adriana Herlinda Vilchis González** obtuvo el grado de doctor en Imagen, Visión y Robótica en el Instituto Politécnico de Grenoble, Francia. Actualmente es profesor investigador en las Facultades de Ingeniería y de Medicina de la Universidad Autónoma del Estado de México. Sus intereses científicos incluyen Robótica Médica, Robots Suaves y Sistemas Mecatrónicos.



**Juan Carlos Ávila Vilchis** obtuvo el grado de doctor en el Instituto Nacional Politécnico de Grenoble, Francia. Actualmente es profesor investigador en las Facultades de Ingeniería y de Medicina de la Universidad Autónoma del Estado de México. Sus intereses científicos incluyen Modelado, Análisis y Control de sistemas no lineales y Robótica Médica

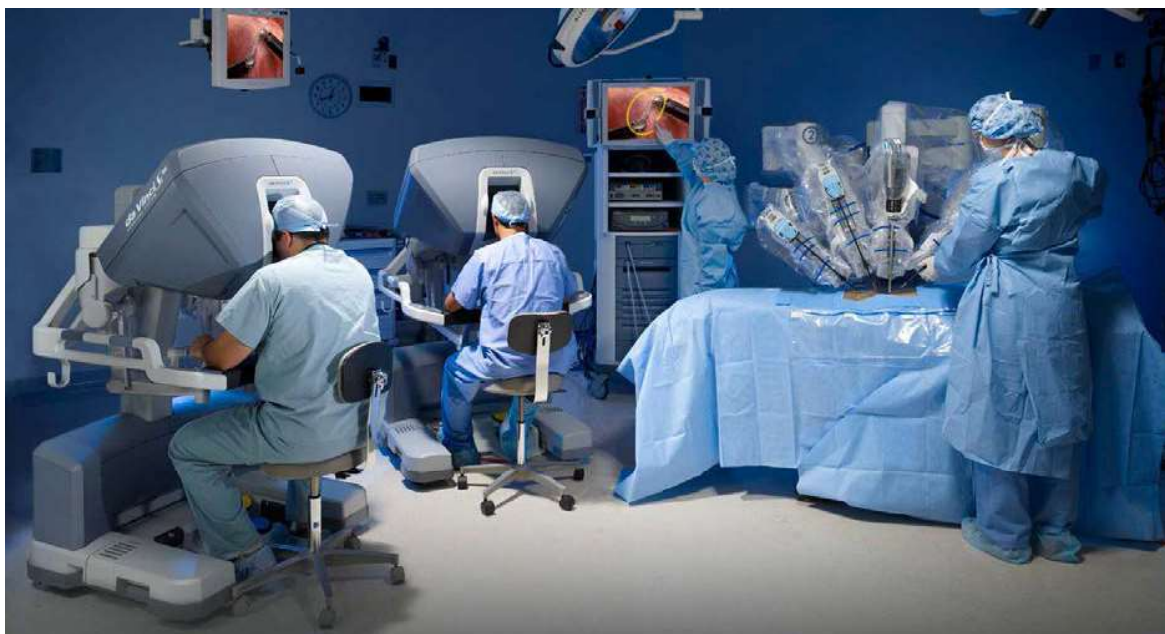


Imagen tomada de: <https://rgiconsultores.mx/blog/da-vinci-de-los-primeros-robots-a-la-cirugia-robotica>.