

ARTÍCULO ACEPTADO

Robots y su aplicación en la rehabilitación de Hombro Congelado

Jimena Sánchez Guerrero, Edwin Sebna Albarrán García, Adriana H. Vilchis González y Juan C. Ávila Vilchis

Introducción

El hombro, está compuesto por cinco articulaciones. Entre ellas, la articulación glenohumeral, encargada de unir la cavidad glenoidea con la cabeza del húmero con apoyo de la cápsula glenohumeral y ligamentos asociados, permite realizar movimientos de flexión, extensión, abducción, aducción, rotación interna, rotación externa y circunducción [1].

Hombro Congelado

El hombro congelado (HC) es una patología común, poco investigada; se caracteriza por la contractura de la cápsula glenohumeral, generando dolor y restricción de movimiento. Suele presentarse alrededor de los 50 años, principalmente en mujeres; aumenta el riesgo en personas con antecedentes de cirugía de hombro, pecho o vértebras cervicales, con diabetes o enfermedades tiroideas. La prevalencia de esta patología es del 2% al 5% de la población en general [2].

La progresión de la patología se divide en tres etapas: 1) Fase de congelación, entre 2 a 9 meses, predomina el dolor y se pierde gradualmente la movilidad; 2) Fase congelada, entre 4 y 12 meses, el dolor y el movimiento se reducen progresivamente, 3) Fase de deshielo, entre 5 y 26 meses, el paciente presenta mejora en la movilidad articular [3].

Los tratamientos buscan reducir el dolor y preservar la movilidad; se dividen en quirúrgicos y no quirúrgicos. Estos últimos incluyen la fisioterapia, que acorde a la fase de la enfermedad emplea cinesiterapia, electroterapia analgésica, ultrasonido, etcétera. La cinesiterapia consiste en movilidad pasiva y activa para recuperar función en la articulación [1].

Dentro de la movilidad pasiva, los ejercicios pendulares con el brazo extendido a favor de la gravedad (ver figura 1) favorecen la movilización temprana de la articulación y disminuyen el dolor. Existen tres tipos: Codman, Chandler y Sperry [4].

Posteriormente, aplican ejercicios de movilidad activa para fortalecer la musculatura; puede incluir una fuerza de oposición que genere resistencia [5].

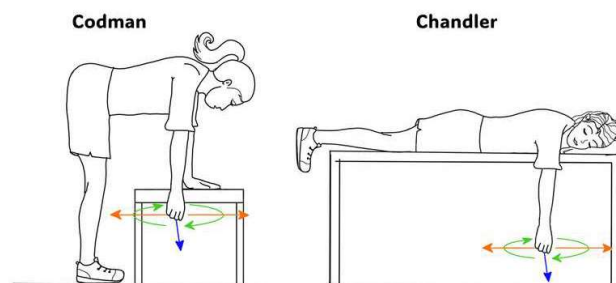


Figura 1. Ejercicios pendulares, movimientos de Codman y Chandler.

Robots en la rehabilitación

La red europea de monitoreo de prospectiva define a los robots de atención a la salud como “sistemas capaces de realizar acciones mecatrónicas coordinadas (fuerza o movimiento) para apoyar la [...] rehabilitación de los pacientes. . .”; describe 3 categorías principales [6]:

1. Robots quirúrgicos.
2. Robots de asistencia.
3. Robots de servicio del cuidado de la salud.

Los robots de asistencia coexisten como robots de asistencia social de terapia y robots de asistencia física de rehabilitación de usuario; ambos se aplican en entornos terapéuticos como parte de la robot-terapia. La diferencia es que los primeros se orientan a terapia cognitiva o psicológica mediante interacciones sociales con robots, y los segundos hacia una rehabilitación física, como la requerida en la rehabilitación basada en cinesiterapia del HC [6].

La literatura, particularmente lo presentado en [7], [8], [9], [10], clasifica a los robots de rehabilitación para extremidad superior (ES) según su estructura en dos vertientes principales (ver Figura 2):

A) Exoesqueleto (E)

Inspirados en la anatomía del cuerpo humano. Su característica principal es el contacto directo entre las

articulaciones y el exoesqueleto. Adaptado a la anatomía transmite el movimiento [7].

B) Efecto final (EF)

Considerados movilizadores externos que interactúan con un solo punto del usuario a través del elemento terminal del robot (ej. agarradera); proporcionan movimientos amplios y buscan ejercer la fuerza adecuada para guiar el movimiento requerido durante la rehabilitación [7] [8] [9].

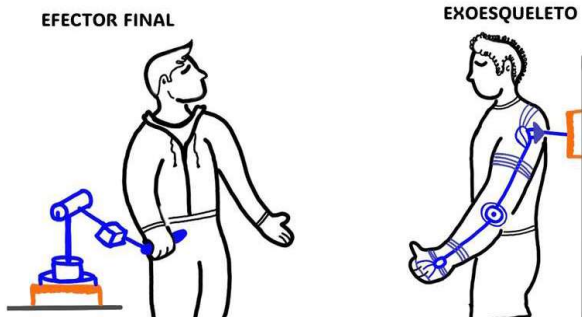


Figura 2. Clasificación de los robots de miembro superior.

La década de 1990 marcó el inicio del desarrollo e investigación de los robots de rehabilitación [9]. Algunos robots que consideran el movimiento del hombro, no enfocados a rehabilitar HC, recopilados por [10], y algunas características que contemplan (ver Tabla 1) se sintetizan a continuación:

Dampace

Exoesqueleto desarrollado en 2007. El paciente participa de forma activa en los movimientos de la ES, dando seguridad al paciente durante su uso. Para compensar el peso de la ES cuenta con un sistema separado de compensación de la gravedad.



Figura 3. Dampace [10].

Therapy system Wilmington Robotic Exoskeleton (T-WREX)

Desarrollado para ambos brazos, uso en casa y como entrada para interactuar con entornos virtuales. El software simula actividades funcionales que mejoran el movimiento de la ES tras lesiones neurológicas (ej. hemiparesia crónica).

Se opone al peso del brazo con bandas elásticas; disponible comercialmente bajo el nombre Armeo Spring, y la versión Armeo Spring Pro.



Figura 4. 4 T-WREX [10].

Maryland-Gerogetown-Army (MGA)-exoskeleton

Desarrollado en 2005. Opera en dos modos: 1) modo de realidad virtual, simula y apoya en tareas de la vida diaria y 2) modo de terapia física, rota el brazo en un eje arbitrario a través del hombro con resistencia, y soporte seleccionado por el terapeuta.

Por seguridad, la articulación del robot asociada al codo ajusta el rango de torque con un embrague. Un torque excesivo, desacopla el eje del codo.

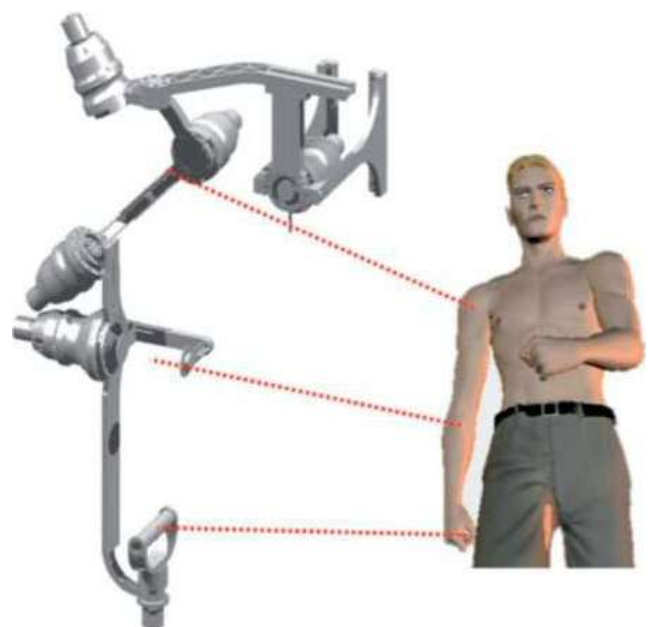


Figura 5. MGA exoskeleton [10].

L-EXOS

Exoesqueleto de retroalimentación de fuerza para el brazo derecho, desarrollado en 2007. El paciente puede interactuar de forma básica con un entorno virtual, además, la ubicación de motores en la base aligera el peso para el paciente.



Figura 6. L-EXOS [10].

ARMin

Desarrollado entre 2003 y 2006. El robot asiste al paciente y proporciona medidas cuantitativas del rango de movimiento (ROM), fuerza muscular y precisión espacial de la posición de la mano.

Principalmente brinda: 1) movilización pasiva y activa en una trayectoria predefinida, 2) terapia de juego con tecnología de realidad virtual y 3) entrenamiento para actividades de la vida diaria.

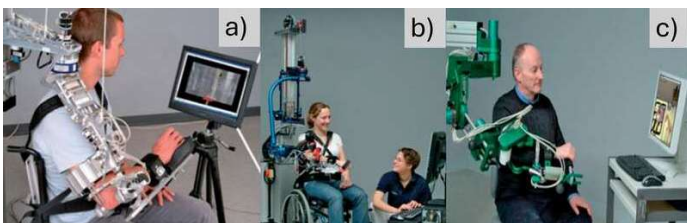


Figura 7.a) ARMin I, b) ARMin II, c) ARMin III [10].

Presenta tres evoluciones:

ARMin I: El brazo se conecta a un robot tipo efector final y el antebrazo a un exoesqueleto.

ARMin II: Permite la pronación-supinación del antebrazo y la flexión-extensión de muñeca.

ARMin III: Configurable para ambos brazos, compensa parte del peso del exoesqueleto con un resorte. Permite ajustar el centro de la articulación glenohumeral con punteros láser como referencia.

Comercializado con el nombre de Arneo Power.

Mit Manus

De los primeros robots desarrollados para rehabilitación. En operación desde 1994.

Permite tratar solo la zona afectada de la ES con sus 4 módulos: 1) módulo activo planar; 2) módulo activo vertical; 3) módulo activo de muñeca; 4) módulo de agarrar pasivo.

Con agarraderas hechas a medida para la sujeción del paciente al robot. Es portátil y está diseñado para ser seguro en contacto cercano con personas durante rehabilitación clínica.



Figura 8. Mit Manus [10].

Mirror image motion enabler (MIME)

Diseñado para neuro-rehabilitación de hombro y codo. Probado por primera vez en 2002 con un sistema Puma 260, y reemplazado por el Puma 560.

Con el paciente sentado en una silla de ruedas frente a una mesa de altura ajustable con correas que limitan el movimiento del torso, lo apoya con 4 modos de operación: 1) modo pasivo, 2) modo activo-asistido, 3) modo activo-resistido y 4) modo bilateral, donde el robot asiste la extremidad afectada reflejando el movimiento realizado con la extremidad sana.

El hombro congelado es una patología prolongada que afecta las actividades de la vida diaria.

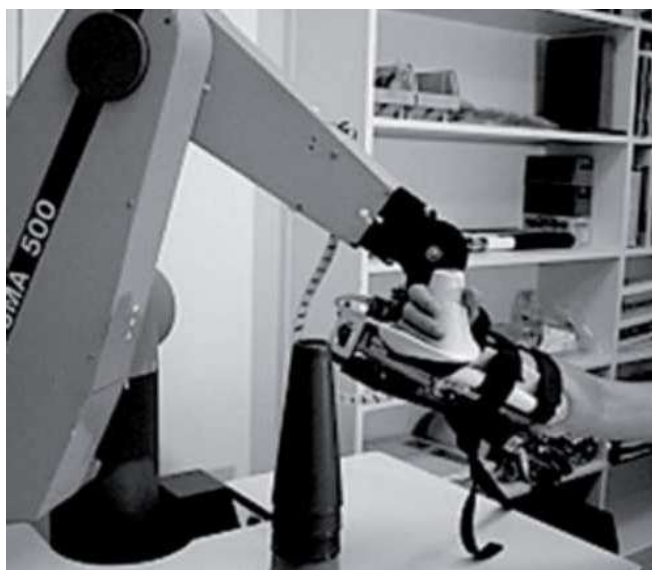


Figura 9. MIME [10].

GENTLE's

Presentado en 2003. El paciente sentado con el brazo suspendido y solo la muñeca conectada a una ortesis en comunicación a una interfaz gráfica. El terapeuta selecciona los ejercicios adecuados que generan trayectorias entre dos puntos.



Figura 10. GENTLE's [10].

Assisted Rehabilitation and Measurement guide (ARM) Herramienta de diagnóstico y terapéutica que evalúa y entrena el ROM y la generación de fuerza del brazo después de accidentes cerebrovasculares y otras lesiones

cerebrales Su diseño con un solo motor disminuye la carga en el brazo.

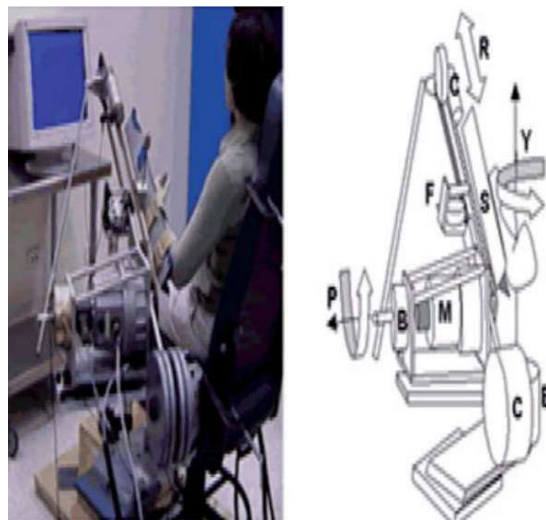


Figura 11. ARM [10].

REHAROB

Completado en 2003. Proporciona fisioterapia pasiva para el brazo hemiparético espástico, utiliza dos robots industriales: uno mueve la parte superior del brazo y el otro la inferior. El terapeuta acompaña libremente el primer movimiento del paciente, el robot memoriza y realiza las siguientes repeticiones.



Figura 12. REHAROB [10].

Tabla 1. Comparativa de las características de los robots [10].

Robot	TR ⁺	Tipo de terapia	Movimientos	Retroalimentación	GDL
Dampace	E	Activa	Movimientos de hombro y codo.	Interacción con videojuegos	4
Therapy system Wilmington Robotic Exoskeleton (T-WREX)**	E	Activa	Movimientos de ES.	Interacción con entorno virtual. Sensor de presión en la mano.	5
Maryland-Gerogetown-Army (MGA)-exoskeleton	E	Activa y activa-resistida.	Rotación del hombro. Movimiento del codo y la escápula.	Entorno virtual. Sensor de fuerza/torque en la agarradera.	5
L-EXOS	E	Pasiva y activa	Movimientos de ES.	Interacción con entorno virtual. Sensor de fuerza.	5
ARMin I	SE	Pasiva y activa.	Movimiento de hombro en tres dimensiones y flexión-extensión de codo.	Interacción con juegos.	4
ARMin II	E	Pasiva, activa-asistida y activa.	Pronación-supinación del antebrazo y la flexión-extensión de muñeca.	Interacción con juegos.	6
ARMin III **	E	Terapia pasiva, activa asistida y activa.	Flexión-extensión de hombro, codo y muñeca; Abducción-aducción y rotación del hombro, pronación-supinación del antebrazo y apertura y cierre de la mano (opcionalmente).	Interacción con juegos.	6
Mit Manus **	EF	Activa y pasiva.	Movimientos horizontales de muñeca y antebrazo, Movimientos verticales y de fuerza.	Interacción con videojuegos. Sensor de fuerza.	7 6 activos 1 pasivo
Mirror image motion enabler (MIME) *	EF	Pasiva, activa asistida, activa resistida y activa	Movimientos de hombro, codo. Movimiento bilateral del brazo no afectado y el afectado.	Sensor de fuerza/torque.	6
GENTLE's	EF	Pasiva, activa asistida y activa resistida	Movimientos de ES.	Técnicas de realidad virtual y háptica.	6 3 activos 3 pasivos.
Assisted Rehabilitation and Measurement guide (ARM)	EF	Pasiva y activa	Guía linealmente la ES y extensión-flexión, abducción-aducción pasiva del hombro.	Monitor que informa al usuario sobre el movimiento y la generación de fuerza en el hombro.	3 1 activo 2 pasivos
REHAROB *	EF	Pasiva.	Movimientos de la ES definidos por el terapeuta.	NA	12

⁺ Tipo de Robot, *Utiliza robots industriales; **Se comercializa; E: Exoesqueletos; SE: Semi exoesqueleto; EF: Efactor final; ES: Extremidad superior; GDL: Grados de libertad; NA: No aplica / Falta información.

Tabla 2. Requerimientos identificados para un robot rehabilitador de hombro congelado.

Población	Adultos mayores y personas laboralmente productivas con dolor de hombro y disminución de ROM del hombro. Considerar un rango de medidas antropométricas (Estatura, longitudes de brazo y mano) y la masa del brazo.
Postura	Flexión anterior de cadera (45° a 90°) en bipedestación o decúbito prono en una camilla. Brazo en extensión a favor de la gravedad, manteniendo la distensión del húmero. Posición neutra de la mano con agarre permitido.
Movimientos	Flexión, extensión, abducción, aducción y circunducción del brazo. Progresivos y repetitivos y velocidad (baja o media).
Espacio de uso	Dentro de un área de rehabilitación física (ej. Consultorio de fisioterapia). Portabilidad Seguridad en interacción robot – paciente/fisioterapeuta.

Añadir peso adicional en la articulación podría resultar en aumento de dolor.

Conclusiones

Considerando la literatura revisada, múltiples robots de rehabilitación muestran ser herramientas valiosas en el tratamiento y movilización de la ES, principalmente en pacientes con accidentes cerebro vasculares o lesiones cerebrales.

Sin embargo, para acoplarse al HC, una patología exclusivamente musculoesquelética; cuyo tratamiento se basa en movilizaciones progresivas de hombro y la reducción del dolor con ayuda de la postura del paciente, es adecuado considerar algunos requerimientos para apuntar a una correcta rehabilitación. La tabla 2 incluye los principales.

De estos requerimientos principales derivan otros necesarios o deseables, como la elección del tipo de estructura y GDL que permita al robot asistir los movimientos deseados, adecuarse en dimensiones a la población objetivo y al espacio de uso, además, en este caso, a la postura del paciente.

Los exoesqueletos, como el MGA, podrían mantener la postura del brazo necesaria en los movimientos de Codman y Chandler, sin embargo, también añadir peso adicional en la articulación y el brazo, lo que podría resultar en incomodidad y aumento del dolor.

Mientras que un EF guía la ES sin relativamente agregar peso, por el contrario, amplía la libertad de movimiento de las articulaciones del paciente. Asimismo, se considera más simple planificar trayectorias y aplicar métodos de control.

Al considerar la aplicación del robot durante la fase de congelación, buscando atenuar la gravedad de la fase congelada y la elongación de la patología con los movimientos progresivos considerados adecuados por el terapeuta; se deben contemplar los modos de operación a fines para lograr el objetivo, por ejemplo, un modo orien-

tado a la terapia pasiva permitiría iniciar el tratamiento de forma temprana con las movilizaciones suaves y controladas de los ejercicios de Codman y Chandler. Con el progreso a ejercicios de fuerza, se pueden contemplar los modos de operación activo-resistido o activo, donde el paciente ejerce fuerza o genera el movimiento.

Como se menciona, algunos de los robots emplean robots industriales, adaptados para el trato directo con humanos. Al proponer la estructura y su espacio de trabajo, se debe tomar en cuenta, el entorno de trabajo (Área de terapia) y el usuario para minimizar riesgos en la interacción.

Sería adecuado que, como el ARMIN III, se ajuste al mayor rango posible de dimensiones antropométricas de la población objetivo para no causar dolor o daño a la articulación, inhibiendo el movimiento y afectando la terapia.

Se podría añadir retroalimentación con realidad virtual para motivar al paciente a finalizar la terapia, debido a que, la rehabilitación de HC presenta deserción al tender a ser repetitiva y prolongada.

En resumen, los robots de rehabilitación son una prometedora adición a las herramientas disponibles para el tratamiento del HC, permitiendo la movilización controlada, guiada y repetitiva que ayude a mejorar el ROM, evitar el gesto de compensación de los pacientes y, reducir la rigidez y el dolor.

Sin embargo, para llegar a su implementación clínica, se debe contar con un enfoque que integre en el desarrollo del robot, los aspectos vislumbrados anteriormente con resultados de otros estudios que sustenten características terapéuticas, antropométricas y de diseño para lograr la aplicación segura, eficiente y eficaz de un dispositivo robótico en la rehabilitación del HC.*

REFERENCIAS

1. Vanessa, E. O. (2021). Hombro Congelado. Tesis de grado. Universidad Inca Garcilaso de la Vega.
2. Ramirez, J. (2019). Adhesive Capsulitis: Diagnosis and Management. *American Family Physician*, 99(5), 297–300.
3. Morales, J. (2021). Tratamiento fisioterápico en pacientes con hombro congelado. Revisión bibliográfica. Tesis de grado, Grado en Fisioterapia. Universidad Miguel Hernández.
4. Dávila De Santis, A. D. (2016). Tratamiento Fisioterápico en Capsulitis Adhesiva de Hombro. Análisis de caso. Tesis de grado. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. Manta, Ecuador.
5. Chamorro, Y. M. P. (2019). Ejercicios de Codman en el tratamiento de lesiones del hombro. Centro de Salud Santa Rosa. Riobamba 2018 – 2019. Tesis de grado. Licenciatura en Ciencias de la Salud en Terapia Física y Deportiva. Universidad Nacional de Chimborazo. Riobamba, Ecuador.
6. Fosch-Villaronga, E. y Drukarch, H. (2021). On healthcare robots. Concepts, definitions, and considerations for healthcare robot governance. *Leading Fellows Marie Curie COFUND fellowship*.
7. Garcia-Gonzalez, A., Fuentes-Aguilar, R. Q., Salgado, I., y Chairez, I. (2022). A review on the application of autonomous and intelligent robotic devices in medical rehabilitation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(9).
8. Dupont, P. E. et al. (2021). A decade retrospective of medical robotics research from 2010 to 2020. *Sci. Robot*, 6, 8017.
9. Meng, Q., Xie, Q., y Yu, H. (2019). Upper-Limb Rehabilitation Robot: State of the Art and Existing Problems. 1-4.
10. Babaiasl et al. (2016). A review of technological and clinical aspects of robot-aided rehabilitation of upper-extremity after stroke. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 11(4):263-80, 1–18.

SOBRE LOS AUTORES



Jimena Sánchez Guerrero es egresada de la licenciatura en Bioingeniería Médica de la Universidad Autónoma del Estado de México. Se desempeña actualmente en el desarrollo de una plataforma robótica efector final para rehabilitación de hombro congelado. Sus áreas científicas de interés incluyen el Diseño Mecánico y Robótica Médica.



Edwin Sebna Albarrán García es egresado de la licenciatura en Bioingeniería Médica de la Universidad Autónoma del Estado de México. Se desempeña actualmente en el desarrollo de una plataforma robótica efector final para rehabilitación de hombro congelado. Sus áreas científicas de interés incluyen dispositivos para rehabilitación física, medicina en el deporte y robótica médica.



Adriana H. Vilchis González obtuvo el grado de doctor en Imagen, Visión y Robótica 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 Robótica Médica, Realidad Virtual, Robots Suaves y Sistemas Mecatrónicos.



Juan C. 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.