



Juana Mariel Dávila-Vilchis

E-mail: mdavilav@uaemex.mx

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2278-1296>

Adriana Herlinda Vilchis-González,

E-mail: avilchisg@uaemex.mx

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5422-5593>

Juan Carlos Ávila-Vilchis

E-mail: jcavilav@uaemex.mx

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1331-010X>

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Dávila-Vilchis, J. M., Vilchis-González, A. H., & Ávila-Vilchis, J. C. (2025). Una visión de la robótica médica y sus contribuciones. *Revista Sociedad & Tecnología*, 8(S1), 39-58. DOI: <https://doi.org/10.51247/st.v8iS1.559>.

==== o ====

Una visión de la robótica médica y sus contribuciones

RESUMEN

La robótica ha evolucionado rápidamente en diferentes áreas como la industrial, la aeroespacial, la militar, la educación, el entretenimiento y la salud, entre otras, con el propósito de asistir al ser humano. Cuando la robótica es utilizada en el área de la salud se le denomina "Robótica Médica" y busca apoyar en procedimientos quirúrgicos, telemedicina, rehabilitación o cuidado de pacientes con el objetivo de mejorar la calidad de vida de las personas. Este artículo enlista algunas contribuciones de la robótica médica desarrolladas durante los últimos 15 años. Se describe una clasificación de los robots médicos dependiendo de su objetivo, considerando los quirúrgicos, aquellos para tareas de rehabilitación, asistencia o manipulación, pasando por los microrobots y llegando hasta los robots suaves. Dentro de las aplicaciones se consideran las cirugías mínimamente invasivas (CMI), se incluyen otras que involucran áreas como realidad virtual (VR), sistemas hápticos (HS), e inteligencia artificial (IA). Este artículo brinda un panorama de las aplicaciones actuales de la robótica.

Palabras clave: Robótica médica, tecnología, diseño, aplicaciones en salud.

==== o ====

An overview to medical robotics and its contributions

ABSTRACT

Robotics has evolved rapidly in its different fields, from industry, space technology, military, education, recreational activities or in health to assist human beings. Specifically, this article aims to highlight the main contributions of Medical Robotics that have been developed over the last 15 years to improve and care for people's quality of life. Also, a classification of medical robots depending on their objective is included, from surgical robots, or for rehabilitation, assistance, or manipulation tasks, from microrobots to soft robots. Applications include minimally invasive surgery (MIS) and involve other areas such as Virtual Reality (VR), Haptic

Una visión de la robótica médica y sus contribuciones

Systems (HS), or Artificial Intelligence (AI). Then, this article provides a broad overview of the current applications of Robotics.

Keywords: Medical robotics, technology, design, and health.

==== o =====

Uma visão geral da robótica médica e suas contribuições

RESUMO

A robótica evoluiu rapidamente em vários campos, incluindo indústria, aeroespacial, militar, educação, entretenimento e saúde, entre outros, com o objetivo de auxiliar humanos. Quando a robótica é usada na área da saúde, ela é chamada de "Robótica Médica" e busca dar suporte a procedimentos cirúrgicos, telemedicina, reabilitação ou atendimento ao paciente com o objetivo de melhorar a qualidade de vida das pessoas. Este artigo lista algumas contribuições da robótica médica desenvolvidas nos últimos 15 anos. É descrita uma classificação dos robôs médicos em função da sua finalidade, considerando os robôs cirúrgicos, aqueles para tarefas de reabilitação, assistência ou manipulação, passando pelos microrrobôs e chegando aos robôs macios. Entre as aplicações, estão consideradas cirurgias minimamente invasivas (CMI) e outras que envolvem áreas como realidade virtual (RV), sistemas hápticos (SH) e inteligência artificial (IA). Este artigo fornece uma visão geral das aplicações atuais da robótica.

Palavras-chave: Robótica médica, tecnologia, design, aplicações em saúde

==== o =====

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la mayoría de las personas han escuchado el termino robot o están familiarizados con el mismo, ya sea por su uso en el cine, la televisión, en los libros de ciencia ficción o en actividades escolares o extraescolares para el desarrollo de robots. La norma ISO 8373:2021 define un robot como "*Mecanismo actuado programado con un grado de autonomía para realizar locomoción, manipulación o posicionamiento*" (Online Browsing Platform, 2021).

La robótica surge como la disciplina encargada del estudio, diseño, fabricación, operación y control de los robots, como dispositivos basados en la anatomía o morfología de los seres vivos, para lograr una tarea específica, por lo que sus diseños, aplicaciones, tamaños, formas, materiales y/o funciones son extensas (Dario P et al., 1996). En general, para que un robot funcione se necesita de tres elementos: 1) un sistema físico (elementos mecánicos), 2) una fuente de energía para alimentarlo, la cual puede ser eléctrica, neumática o hidráulica (actuadores) y 3) un sistema electrónico para controlarlo y proveerle autonomía (Bensalem et al., 2009).

El uso de robots en las tareas de la vida cotidiana ha ido en aumento en la última década, al ser más asequibles ya que el ser humano busca agilizar, sistematizar, automatizar procesos o procedimientos, especialmente aquellos que son peligrosos y no pueden acceder los seres humanos (Turiel et al., 2002). Las aplicaciones de la robótica son variadas, entre las principales destacan los de servicio como brazos robóticos industriales, robots móviles para

Una visión de la robótica médica y sus contribuciones

tareas exploración espaciales, de navegación terrestre, marítima, construcción o con fines bélicos. Otras áreas incluyen robots auxiliares en las áreas de la medicina, agricultura, enseñanza, labores domésticas, humanoides o actividades de entretenimiento (Barrientos, 2014).

Específicamente, la robótica médica ha buscado ser un auxiliar en la salud y cuidado del ser humano por medio del desarrollo de tecnología que ayude a médicos en tareas precisas, como procedimientos quirúrgicos; a las enfermeras en los tratamientos de pacientes, o a terapeutas durante sus protocolos de rehabilitación y asistencia. Los robots médicos se clasifican como macro/micro robots dependiendo de su tamaño, diseño y aplicación (Dario, P., 1994).

Dentro de los *macrorobots*, se encuentran los robots quirúrgicos, que son de relevancia por su alta precisión, y que permiten tiempos de recuperación más rápidos que las cirugías convencionales. Algunos robots quirúrgicos permiten realizar operaciones a distancia, por ejemplo el sistema quirúrgico Da Vinci®, que por medio de un puesto de control (consola) que consta de una pantalla con visión 3D de alta definición, mandos de control (joysticks) y pedales permiten la manipulación a distancia del dispositivo robótico, lo que se conoce como Telerobótica (Hockstein et al., 2007). Los *microrobots*, por ejemplo los microgrippers (micropinzas quirúrgicas) se destacan por ser útiles en cirugías mínimamente invasivas, o para la liberación de medicamentos utilizando actuadores suaves, del tamaño de una pastilla o una capsula (Cianchetti et al., 2018).

En general, la tecnología médica ha ido evolucionando a la par con las patologías emergentes para ayudar a satisfacer las necesidades de pacientes, doctores, enfermeros, o terapeutas durante sus protocolos y/o cuidados. Las aplicaciones de los robots están enfocadas en cirugías neurológicas principalmente en el cerebro, o en procedimientos quirúrgicos como la laparoscopia, percutáneos o vasculares como la inserción de catéteres orientables, así como auxiliares en tratamientos de radio cirugía principalmente tumores o robots dotados para responder a una emergencia o situaciones de riesgo que ayudan a los doctores en el monitoreo de pacientes (Beasley, 2012).

Los exoesqueletos, son dispositivos robóticos, conformados por armazones adheridos externamente al cuerpo para trabajar como auxiliares en los protocolos de rehabilitación, asistencia, tareas de manipulación para pacientes con accidentes cerebrovasculares o lesiones de médula espinal, principalmente (Chávez Cardona M et al., 2010). Los exoesqueletos se clasifican en rígidos, suaves o híbridos dependiendo del material del que estén hechos sus componentes.

Otros dispositivos médicos que se han desarrollado para aplicaciones ortopédicas son las prótesis y órtesis. Las prótesis se encargan de sustituir un miembro(s) amputado(s) y dar soporte. Por otro lado, las ortesis sólo sirven como soporte para miembros superiores o inferiores pero la persona si tiene su miembro (Cifuentes, M & Luis A, 2002). Las prótesis robóticas generalmente utilizan señales nerviosas, por ejemplo, electromiografía (EMG por sus

Una visión de la robótica médica y sus contribuciones

siglas en inglés) para generar el movimiento deseado (Song et al., 2023), sin embargo también un área en desarrollo es el uso de Interfaces Cerebro-Computadora (ICC) (Domínguez-Ruiz et al., 2023).

Actualmente, existen otro tipo de tecnologías emergentes como herramientas de la robótica médica para mejorar u optimizar su funcionamiento. Por ejemplo, la realidad virtual permite recrear escenarios bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D) que simulan entornos reales en los que el paciente es capaz de sujetar, mover, o trasladar objetos de un lugar a otro, por medio del uso de exogantes (Li et al., 2023) o sistemas hápticos (Ríos-Hernández et al., 2021) que permiten al paciente o usuario experimentar el sentido del tacto por medio de fuerzas actuadas y/o movimientos utilizando software especializado, por lo que se han convertido en una opción de gran utilidad durante los protocolos de terapia física u ocupacional.

Un aspecto importante en el desarrollo y uso de robots en el área médica que debe ser tomado en cuenta es la ética en robótica médica. Isaac Asimov definió las siguientes tres leyes de los robots (Asimov, 1942):

- 1.** Primera ley: ningún robot hará daño al ser humano
- 2.** Segunda ley: todo robot deberá cumplir con las órdenes dadas por un ser humano, siempre y cuando no entren en conflicto con la primera.
- 3.** Tercera ley: un robot tiene la capacidad de proteger su propia existencia siempre y cuando no viole las dos leyes anteriores.

Si bien estas leyes se definieron en un contexto de la ciencia ficción, han servido como referencia para proponer lineamientos éticos en el uso y desarrollo de sistemas robóticos en el área de la salud; sin embargo, estas leyes presentan limitaciones al aplicarse a situaciones reales. Investigaciones como las presentadas por (Elendu et al., 2023), (Palmer & Schwan, 2024), (Vulpe & Stancu, 2024) en esta área están siendo desarrolladas con la finalidad de proponer lineamientos aplicables a la situación actual.

Este artículo tiene como objetivo presentar algunas contribuciones de la robótica médica y su evolución para satisfacer los requerimientos de los pacientes o personal médico, como usuarios de esta tecnología en sus diferentes aplicaciones para mejorar sus procedimientos clínicos y así contribuir en el cuidado y calidad de los seres humanos.

DESARROLLO

Desarrollo de robots para aplicaciones médicas

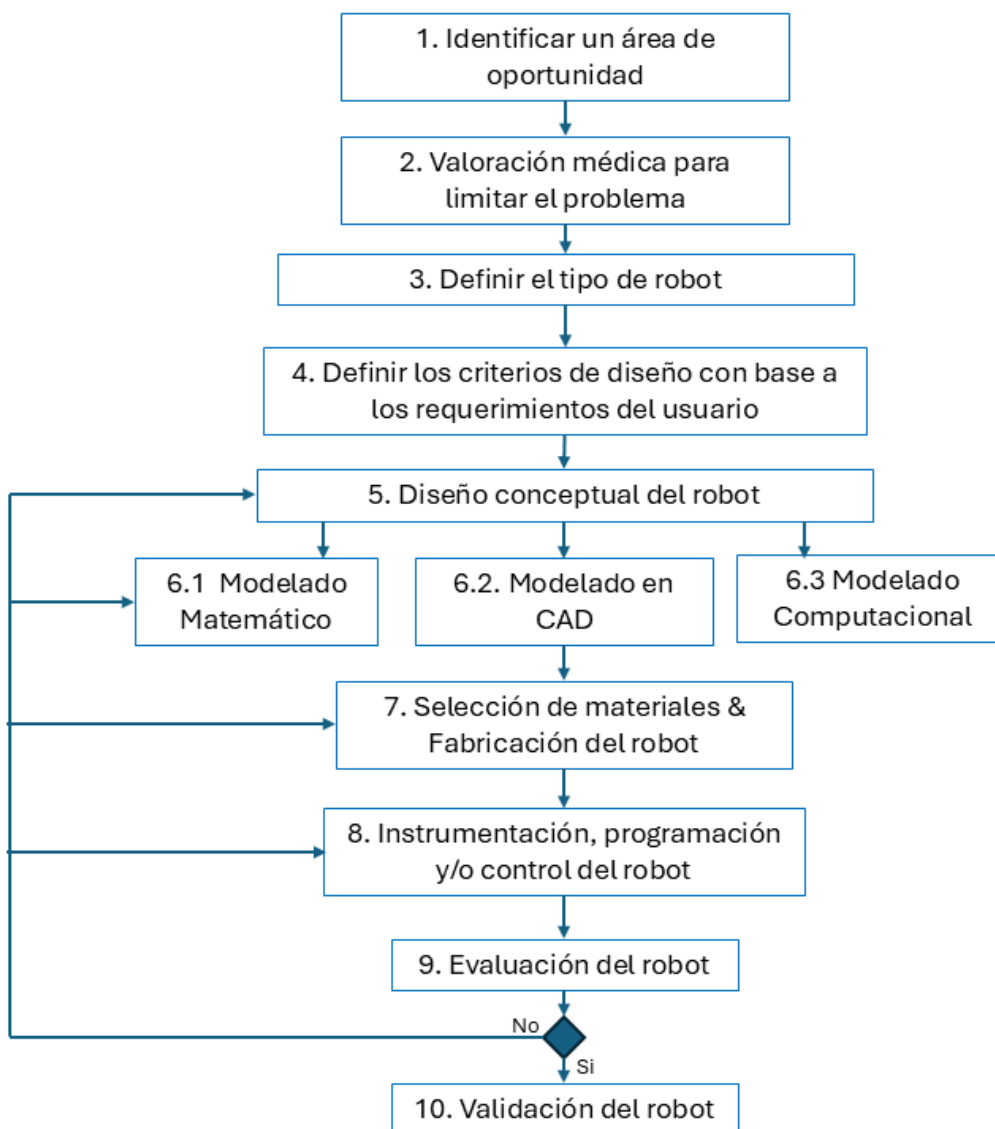
El uso de los robots médicos ha crecido rápidamente debido a su precisión, exactitud, alta destreza en la CMI, capacidad para realizar movimientos repetitivos (aplicaciones en rehabilitación) lo que ha conllevado a una mejora de calidad en las intervenciones médicas y por ende en la calidad del servicio a los pacientes. De acuerdo con la literatura consultada, este

Una visión de la robótica médica y sus contribuciones

artículo propone una metodología de diez pasos para el desarrollo de robots médicos, los cuales se enlistan en la Figura 1.

Cabe destacar, que esta metodología propuesta es aplicable dependiendo del tipo de robot a utilizar y la tarea a realizar. A continuación, se describen cada de uno de los pasos resaltando qué consisten o si involucran pasos intermedios durante el proceso.

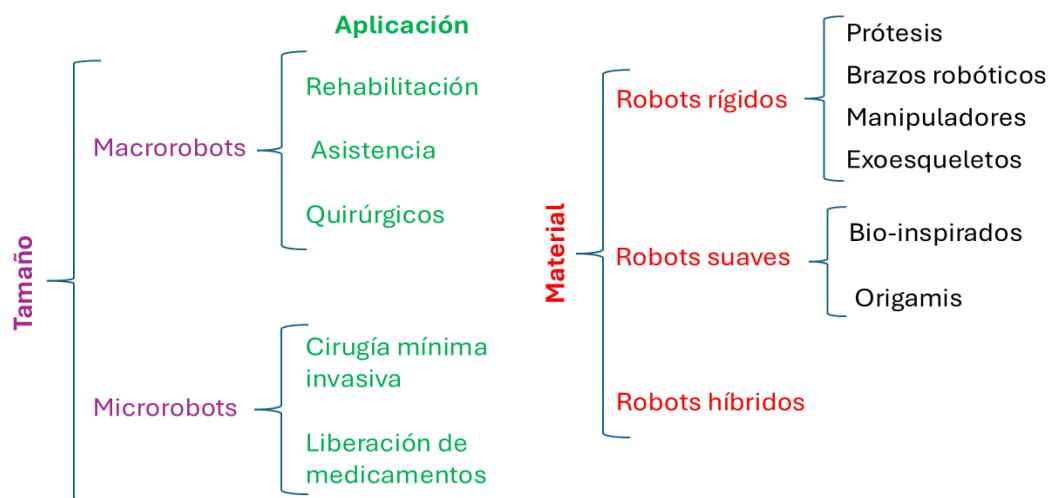
1. *Identificar un área de oportunidad.* Los robots médicos han surgido como herramienta para ayudar en el tratamiento de alguna patología o condición que sufre un ser humano, o bien para satisfacer necesidades específicas de médicos, terapeutas o enfermeros durante sus procedimientos y/o cuidados de sus pacientes. Por eso, este primer paso consiste en identificar la tarea objetivo del robot, es decir, establecer para qué va a servir. Por lo tanto, el usuario final puede ser el paciente quien reciba la asistencia del robot o personal clínico (médicos, enfermeras o terapeutas) quien este en contacto con el robot.



Una visión de la robótica médica y sus contribuciones

Figura 1. Metodología de diseño para la puesta en marcha de un robot.

- 2. *Realizar una valoración médica para limitar el problema.*** En este paso consiste en realizar un trabajo colaborativo por parte de doctores especialistas, terapeutas, enfermeros para evaluar la condición clínica del paciente y poder delimitar la tarea y zona de trabajo del robot. Básicamente, este paso define los requerimientos del robot por parte de los médicos para un paciente, un grupo de pacientes o una patología dada. Por eso, es indispensable una comunicación cercana de los diseñadores (ingenieros) con los pacientes y especialistas clínicos, como sus clientes para establecer qué debe hacer el robot como producto final (Dávila-Vilchis et al., 2019).
- 3. *Definir el tipo de robot:*** Una vez que la tarea del robot se establece, es necesario definir el tipo de robot que se necesita implementar para lograr dicho objetivo. Este paso consiste en seleccionar el robot según su tamaño (*macrorobot* o *microrobot*). Después, depende de su área de aplicación: rehabilitación, asistencia, cirugía, CMI, liberación de medicamentos, etc., elegir el tipo de robot: rígidos, suaves o híbridos, que a su vez se clasifican por el tipo de dispositivo como: manipuladores, brazos robóticos, prótesis, exoesqueletos y origamis como se ilustra en la Figura 2.



Robots Médicos

Figura 2. Clasificación de los robots médicos.

La clasificación para macrorobots por aplicación se divide en rehabilitación, asistencia y quirúrgicos, mientras que para los microrobots en CMI, administración de medicamentos o tratamientos de enfermedades como el cáncer (Lee et al., 2023). Estos tipos de robots dependiendo del tipo de materiales con el que están fabricados se pueden clasificar en rígidos, suaves e híbridos. Los robots rígidos (o también llamados robots convencionales) están hechos a base de metales, se caracterizan por ser pesados y realizan movimientos de rotación y traslación (Díaz et al., 2011). Están integrados por articulaciones que sirven para unir dos

Una visión de la robótica médica y sus contribuciones

eslabones, los cuales son los segmentos del robot, por ejemplo, la articulación del codo que sirve para unir el eslabón superior del brazo con el inferior del antebrazo.

Por otro lado, los robots suaves surgieron como un nuevo enfoque de la robótica médica que buscan ser una extensión natural del cuerpo para solucionar las desventajas de los robots rígidos como peso, costos, seguridad o portabilidad. Los robots suaves se caracterizan por estar adheridos al cuerpo, ser flexibles, ligeros y pueden personalizarse al poderse adaptar a diferentes rangos antropométricos, su utilización en el área médica es relativamente reciente (Rus & Tolley, 2015). Los robots suaves poseen la cualidad de ser portables, lo que facilita su traslado y se puedan ocupar fuera de una clínica de rehabilitación, por ejemplo, en el hogar. Además, los robots suaves pueden ser modulares para poder formar arreglos de cadenas conectadas dependiendo del tamaño requerido, están hechos a base de polímeros y se caracterizan por tener múltiples grados de libertad al ejecutar movimientos de rotación, de traslación, contracción-expansión, flexo-extensión, torsión o movimientos combinados (Rivera Robles et al., 2024).

Los robots híbridos, utilizan una combinación de materiales (blandos, rígidos, biocompatibles, etc.) lo que les permite realizar tareas en diferentes entornos y tener una mayor versatilidad (H. D. Yang & Asbeck, 2018).

Otro enfoque establece que los dispositivos híbridos se caracterizan por combinar sistemas o tecnologías para aumentar las capacidades del robot (Resquín et al., 2016). Por ejemplo, la rehabilitación con (RV) permite crear entornos amigables con los usuarios. Además, existen los sistemas basados en tensegridad que utilizan cables (Camacho-Ramirez et al., 2022), los sistemas hápticos (Ríos-Hernández et al., 2021) o el uso de telerobótica que permite ejecutar tareas de rehabilitación a distancia (Housley et al., 2018).

4. Definir los criterios de diseño del robot con base a los requerimientos del usuario. Este paso consiste en definir los atributos físicos del robot, por lo tanto, este artículo propone 20 criterios que se muestran en la Tabla 1, los cuales son necesarios para que el robot logre su tarea específica y funcione correctamente.

Entre más detallada sea la descripción de los criterios del robot, más fácil se podrá alcanzar el objetivo del robot. Cabe destacar que estos criterios están definidos con base a los requerimientos de los usuarios (pacientes, médicos o terapeutas). Por eso se sugiere definir cada uno de estos criterios para evaluar o encontrar problemas del robot durante todas sus etapas de desarrollo y mejorar su desempeño.

5. Proponer un diseño conceptual del robot: Una vez que se conocen los atributos del robot se puede continuar una lluvia de ideas y/o propuestas para generar el diseño conceptual del robot con todos sus elementos. En este paso se hace una evaluación de las propuestas generadas a partir de la lluvia de ideas, utilizando técnicas como TRIZ, casa de la calidad, entre otras; con el objetivo de seleccionar la propuesta que satisfaga el mayor número de

Una visión de la robótica médica y sus contribuciones

requerimientos y tenga el mayor puntaje (casa de la calidad, por ejemplo), siendo esta propuesta la elegida como diseño conceptual del robot. En esta etapa se deben considerar las normativas para sistemas robóticos en medicina como las normas ISO, por ejemplo, ISO 13485 (ISO, 2016), FDA 21 CFR Part 820 (FDA, 2024) CE Marking MDR 2017/745 (European, 2024), la NOM-241-SSA1-2021 (Diario Oficial de la Federación, 2021) entre otras.

Tabla 1. Criterios de diseño para un robot

Criterio	Tipo / Descripción
1. Tamaño	Microrobots o macrorobots
2. Aplicación	Rehabilitación, asistencia, quirúrgico o manipulación.
3. Material	Rígidos, suaves o híbridos
4. Dispositivo	Prótesis, brazos robóticos, exoesqueletos, origamis, manipuladores, entre otros.
5. Nivel de autonomía - Modo de asistencia ¹	De acuerdo con el nivel de autonomía pueden ser semiautónomos, autónomos, teleoperados y co-manipulados. El modo de asistencia (Robots de rehabilitación) puede ser pasivo, activo, activo asistido y activo resistivo.
6. Zona objetivo del cuerpo humano	Miembros superiores, inferiores, órganos, o parte del cuerpo sobre el cual el robot actuará o interactuará, etc.
7. Articulación objetivo ²	Hombro, codo, antebrazo, muñeca, mano, cadera, rodilla, tobillo, pie.
8. Rango de movilidad* (ROM por sus siglas en inglés)	Rango de movimiento anatómico o funcional.
9. Tipo de articulaciones	Rotación (flexo-extensión o torsión), prismática (expansión-contracción), esférica, planar, cilíndrica.
10. Grados de Libertad (DoF por sus siglas en inglés)	Depende del número y del tipo de articulaciones.
11. Peso	Se define con base a la masa Depende de la aplicación.
12. Número de articulaciones	Aplica para robots rígidos.
13. Número de eslabones	Aplica para robots rígidos.
14. Configuración	Serie o paralelo Abierta o cerrada EF para exoesqueletos.
15. Actuación	Eléctrica, neumática, hidráulica, u otras.
16. Control	Estrategias de control lineal o no lineal.
17. Tarea (asociada al tipo de aplicación)	Manipulación, sujeción, sutura, entre otros.
18. Fabricación	Manufactura convencional, aditiva (impresión 3D), técnicas de vaciado, por ejemplo.
19. Modularidad / Portabilidad	Definir si el robot se puede ensamblar mediante módulos. La portabilidad define si el robot puede ser portado por el usuario o si puede desplazarse en un área para su uso.
20. Validación	Hace referencia a las herramientas, técnicas o métodos que se emplean para validar el funcionamiento del robot, normalmente se utilizan bancos de pruebas con personas sanas, miembros ficticios, pacientes y/o usuarios finales.

¹Para el caso de robots de rehabilitación se definen las siguientes modalidades: rehabilitación pasiva el robot realiza los movimientos y el paciente no participa; rehabilitación activa el paciente realiza todos los movimientos y el robot solo proporciona asistencia, por ejemplo no exceder el ROM definido para el ejercicios; rehabilitación asistida el robot asiste al paciente en los ejercicios; rehabilitación resistiva el robot

proporciona una resistencia durante los ejercicios que realiza el paciente con la finalidad de fortalecer los músculos del mismo.

² Aplica para el caso en que la aplicación sea de rehabilitación.

Usualmente, este paso va acompañado de un diseño asistido por computadora (CAD), por sus siglas en inglés. Esta herramienta computacional permite visualizar en 2D o 3D al robot y/o ensamble con sus componentes para obtener un modelo virtual que simula su funcionamiento previo a su fabricación y permita evaluar su factibilidad.

- 6. Modelado del robot:** Como parte del diseño del dispositivo médico se puede incluir otros tipos de modelado para evaluar el comportamiento del robot. Entre ellos se encuentra el modelado matemático del robot, el cual consiste en proponer ecuaciones que representen su comportamiento. Actualmente, existe software especializado para modelar y simular escenarios que permiten programar algoritmos para controlar el robot por medio de sensores que retroalimentan una función de transferencia en MATLAB®, particularmente con la librería de Simulink®, de igual manera con la librería de Simscape Multibody se puede modelar el sistema robótico para simular su comportamiento.

El modelado cinemático se utiliza para evaluar la movilidad del robot incluyendo la posición, orientación, velocidad y aceleración, mediante el algoritmo matemático de Denavit-Hartenberg (DH). Mientras que modelado dinámico se enfoca en el cálculo de sus fuerzas (C. Yang et al., 2016).

- 7. Seleccionar los materiales y procesos para la fabricación del robot:** Este paso consiste en seleccionar los materiales con los cuales estará hecho el robot, ya como parte de su manufactura. Si bien los robots rígidos se caracterizan por el uso de metales, nuevas investigaciones están apostando a la creación de materiales compuestos para mejorar las propiedades mecánicas al combinarlos como una solución al ser pesados (Fiorillo et al., 2020). Por ejemplo, obtener materiales con módulo de elasticidad similar al del hueso humano para poder utilizarlo en el remplazo o en ortesis y/o prótesis al combinar una resina con un polímero (Zimmermann & Ritchie, 2015). Otras áreas son la ingeniería de tejidos que está enfocada en la creación de biomateriales para órganos artificiales que buscan ser compatibles al estar en contacto con el ser humano, mediante técnicas de prototipado rápido (Sabino et al., 2017).

En el caso de los robots suaves, los actuadores representan su principal componente, ya que son los que se encargan de moverlo, en otras palabras, el conjunto de actuadores representa al robot suave, por lo que los materiales juegan un papel preponderante para su correcto funcionamiento, sin importar el tipo de energía que utilicen (Miriyeve et al., 2017). Sin embargo, los polímeros son los materiales más utilizados para su fabricación, en especial para los neumáticos debido a sus propiedades de flexibilidad y configurabilidad (Walker et al., 2020).

Una visión de la robótica médica y sus contribuciones

Si bien los procesos de fabricación son múltiples para la fabricación de robots, los procesos de maquinado están asociados con los robots rígidos. Mientras que los robots suaves se caracterizan por emplear técnicas de fabricación artesanal por lo que su producción es unitaria. Particularmente para los actuadores neumáticos, destacan las de sellado de bolsas o contenedores de aire en forma de acordeón que están unidos en cadena para mover al robot, o las técnicas de vaciado con silicón donde se utiliza dos moldes un positivo y negativo, para generar el modelo del actuador deseado. Normalmente, los moldes primero son diseñados en CAD, para ser impresos en 3D y después poder vaciar el silicón como se observa en la Figura 3, algunos incluyen procesos intermedios como el uso de hornos para disminuir el tiempo de vulcanizado del material o uso de bombas para sacar el aire y evitar burbujas en el actuador.



Figura 3. a) Modelado de piezas a imprimir y b) moldes impresos para los actuadores y c) vaciado de silicón en los moldes.

En general, la manufactura aditiva ha resultado de gran utilidad para acelerar el prototipado rápido de robots. La impresión 3D ha servido para la creación de moldes o piezas finales mediante el proceso de modelado por deposición fundida (FDM por sus siglas en inglés), en el que se necesita definir los parámetros deseados como velocidad de impresión, temperatura de la cama o plato de la impresora para la sujeción, así como la temperatura para extruir el material, tipo de filamento, principalmente. Gracias a la versatilidad de materiales termoplásticos que pueden usarse, desde rígidos como el ácido poliláctico (PLA) o acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) por su alta resistencia al impacto, o materiales más flexibles como el poliuretano termoplástico (TPU) con distintas durezas, se ha incrementado el prototipado rápido, sin embargo, estos varían en calidad y por el tipo de impresora a usar (Wallin et al., 2018). La implementación de impresión en resina, también identificado como estereolitografía (SLA por sus siglas en inglés), se caracteriza por acabados finos y superficies lisas, las cuales también pueden variar sus propiedades elásticas, son otra opción para la generación de prototipos.

Todas estas técnicas también pueden ser empleadas para la fabricación de los robots suaves del tipo origami al ser neumáticos, pero a diferencia de ser inflados éstos trabajan a presiones de vacío por medio de bombas o eyectores de vacío, donde siguen un patrón 2D de un Origami para convertirse en una estructura 3D capaz de realizar movimientos de flexo-extensión, torsión o combinados (Dávila-Vilchis et al., 2024).

Una visión de la robótica médica y sus contribuciones

8. Realizar la instrumentación, programación y control del robot: La instrumentación es un paso crucial para que el robot pueda funcionar. La instrumentación consiste en integrar sensores, actuadores (servomotores, motores eléctricos, neumáticos o hidráulicos, entre otros), componentes electrónicos y microcontroladores con el objetivo del que el robot interactúe con su entorno. Los microcontroladores son los encargados de procesar la información percibida por el robot mediante los sensores y junto con el control enviar información a los actuadores para realizar la tarea. La selección de sensores, actuadores y microcontroladores en un aspecto importante a considerar, para que el robot satisfaga los requerimientos establecidos.

En esta etapa es importante definir el tipo de estrategia de control que se implementará en el robot, la cual puede ser lineal o no lineal. Elegir la estrategia de control adecuada garantizará que el robot realice la tarea con una precisión y eficiencia adecuada garantizando la seguridad del paciente, del equipo médico y del robot mismo.

9. Llevar a cabo la evaluación mediante pruebas de funcionamiento del robot en pacientes sanos o simuladores: Una vez que se tiene el robot en físico y que ha sido instrumentado y programado, el siguiente paso es probar el robot para poder evaluar su desempeño. Primero se emplean bancos de pruebas con condiciones reales para simular el entorno del robot sobre el cual estará funcionando. En esta etapa se emplean simuladores, pacientes sanos, miembros ficticios para una primera evaluación del robot que permita detectar errores en su funcionamiento por lo que muchas veces requieren hacer cambios de ingeniería para solucionar los problemas presentados, a fin de no afectar o empeorar la condición del usuario final.

10. Validar el robot por ingenieros y después por personal médico o pacientes como usuarios finales. Una vez que el robot ya es funcional en pruebas de laboratorio (in vitro) es posible probarlo en el usuario final bajo la supervisión del equipo de ingenieros, médicos y/o terapeutas para evaluar al dispositivo y al paciente. Sin embargo, es recomendable que cada etapa durante el proceso sea validada para disminuir los errores a la salida, por lo que se recomienda mantener estrecha comunicación con personal médico en cada etapa.

Para poder realizar pruebas en sujetos sanos o pacientes es importante contar con la aprobación de un comité de ética, para esto se debe generar un protocolo de experimentación describiendo criterios de inclusión y exclusión, efectos secundarios, y se debe de detallar claramente la metodología a seguir del experimento. Se debe elaborar la carta de consentimiento informado en la cual se debe explicar claramente en que consiste el experimento y cuál es la participación esperada del sujeto o paciente en el mismo. Es importante resaltar que el sujeto o paciente puede abandonar la prueba en cualquier momento.

Cabe destacar que existe el nivel de madurez tecnológica (TRL), por sus siglas en inglés, el cual se basa en nueve niveles para indicar el grado tecnológico de un producto, desde su

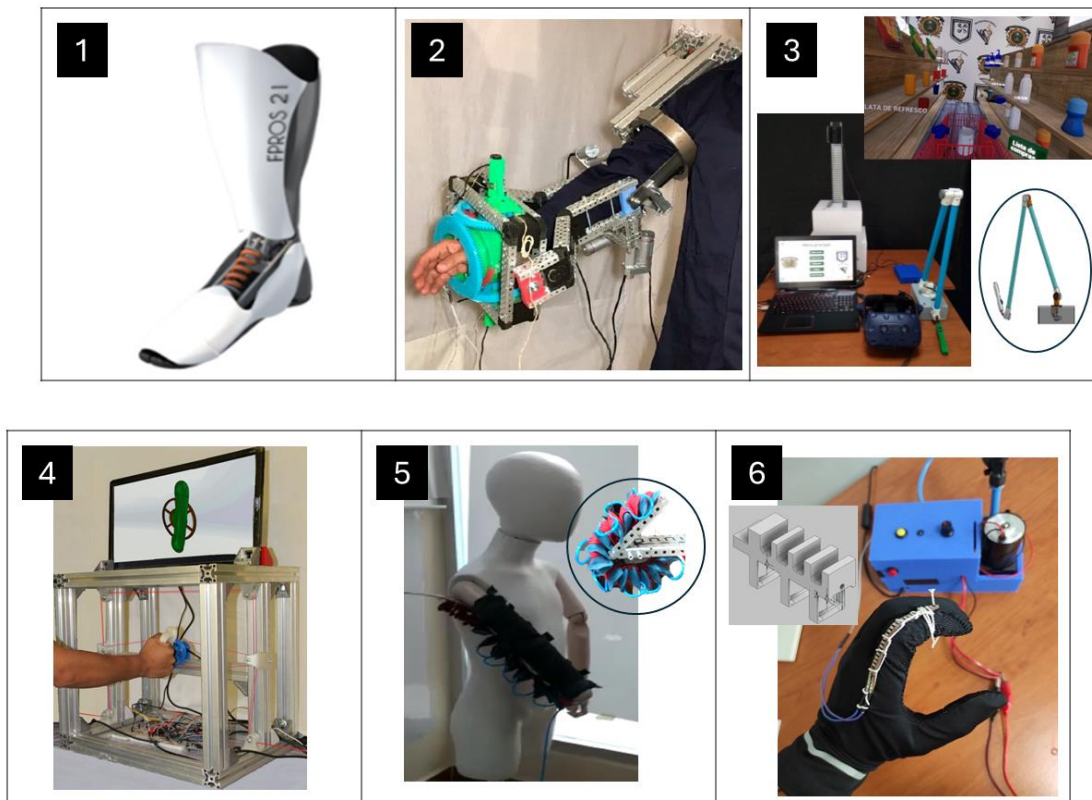
Una visión de la robótica médica y sus contribuciones

concepción hasta su comercialización, por lo que es aplicable al desarrollo de robots para poder convertirse en productos para aplicaciones médicas asegurando que cumplen todos los estándares.

RESULTADOS

Esta sección presenta ejemplos de diferentes macrorobots médicos, los sistemas del 1 al 8 desarrollados en la Facultad de Ingeniería del Estado de México, para aplicaciones a diferentes áreas (ver Figura 4). Se destacan algunas características presentadas en la Tabla 2, las cuales fueron descritas previamente en la sección 2 como tipo de robot: prótesis (P), robot rígido (RR), robot suave (RS) o sistema basado en tensegridad (SBT), aplicación como tareas de rehabilitación, asistencia, soporte, extremidad objetivo, actuación y estrategia de control.

También, en los resultados se incluye al robot Da Vinci (9) para procesos quirúrgicos en conjunto con su consola para procedimientos de laparoscopia o biopsias. Y un microrobot Origami piezoeléctrico para la liberación de medicamentos.



Una visión de la robótica médica y sus contribuciones

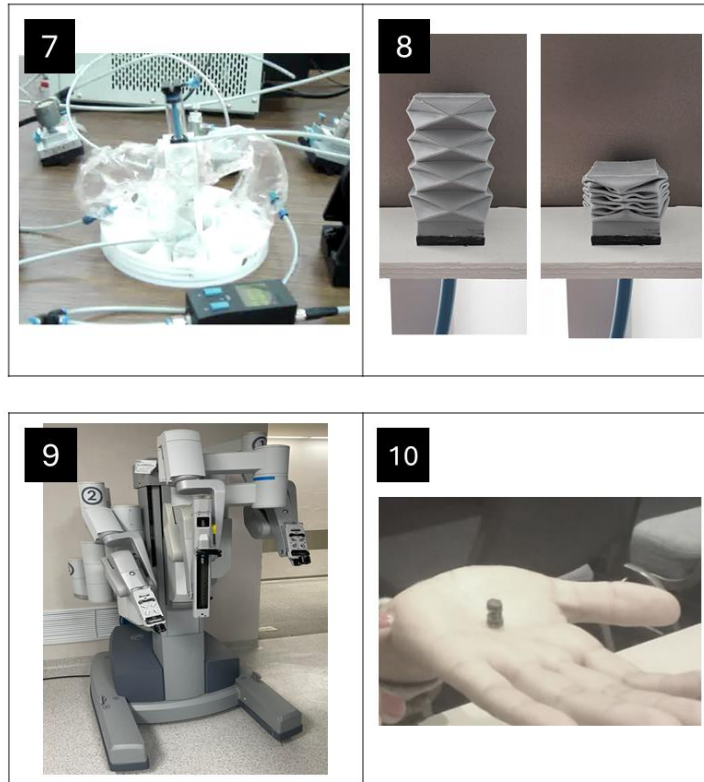


Figura 4. Robots médicos: **1)** Prótesis pasiva, **2)** Exoesqueleto rígido ERMIS de miembro superior, **3)** Manipulador con RV, **4)** Sistema basado en tensegridad, **5)** Robot suave MOSAR, **6)** Exo-Guante, **7)** Robot suave de punción, **8)** Robot suave Origami Yoshimura, **9)** Robot quirúrgico Da Vinci, y **10)** Microrobot suave Origami para liberación de medicamentos.

Tabla 2. Ejemplos de Robots Médicos.

No. Fig/ Tipo	Autor	Sistema	Aplicación	Extremidad objetivo	Actuación	Estrategia de Control
1 P	(Zagoya-López et al., 2021)	Prótesis Pasiva "FPROS 21"	pacientes con amputación transtibial	Miembro inferior	Sistema de accionamiento por resorte	No aplica
2 RR	(Cruz Martínez & Z.-Avilés, 2020)	Exoesqueleto "ERMIS"	R	Miembro superior Flexo-extensión Aducción-abducción	Eléctrica con motores	PID desacoplado
3 RR	(Ríos-Hernández et al., 2021)	Manipulador	R con ambientes virtuales	Miembro superior	Eléctrica con encoder	No aplica

Una visión de la robótica médica y sus contribuciones

4 ST	(Cama cho-Ra mirez et al., 2022)	Dispositivo	R	Miembro superior Muñeca-ante brazo Prono-supino	Electro-mecá nico	PD PID Control por modos deslizantes
5 RS	(Dávila -Vilchis et al., 2022)	MOSAR	R	Miembro superior Flexión- extensión	Neumática	PID
6 RS	En proces o	Exoguante	R	Mano (dedos) Flexión- extensión	Neumático	No aplica
7 RS	(Cruz, 2007)	Robot de punción	TB	Órganos Tumores	Neumática	No aplica
8 RS	(Dávila -Vilchis et al., 2024)	Robot Origami Yoshimura	R	Miembro superior Flexión- extensión	Neumática	Lazo abierto

Tabla 2 continuación. Ejemplos de Robots Médicos.

No. Fig/ Tipo	Autor	Sistema	Aplicación	Extremidad objetivo	Actuación	Estrategia de Control
9 RR	(Palomares Orihuela, 2016)	Brazo robótico "Da Vinci"	CR	Miembros superior e inferior y cavidad abdominal	Eléctrica con motores	Maestro – Esclavo
10 RS	(Lee et al., 2023)	Microrobot Origami	LM (cápsula)	Cavidad torácica	Piezoeléctric o	No Aplica

Tipo: prótesis (P), robot rígido (RR), robot suave (RS) o sistema basado en tensegridad (SBT)

Aplicación: R: Rehabilitación, CR: Cirugía Robótica, TB: Toma Biopsias, LM: Liberación de Medicamentos.

DISCUSIÓN

La robótica ha evolucionado rápidamente en distintos campos de la medicina para mejorar la salud de las personas directamente en sus tratamientos, o por medio del desarrollo de dispositivos que ayuden a los pacientes, médicos, especialistas o personal clínico durante sus protocolos de rehabilitación o procedimientos quirúrgicos, por ejemplo.

Los robots médicos se han diversificado en formas, tamaños, materiales, aplicaciones, dependiendo de las patologías emergentes y necesidades de los usuarios (pacientes, médicos, terapeutas, especialistas) como clientes directos. Principalmente, se han desarrollado en las áreas de rehabilitación, asistencia y procedimientos quirúrgicos donde se requieren herramientas y/o dispositivos médicos para ejecutar tareas pesadas, repetitivas y de alta precisión, y disminuir o evitar problemas o accidentes clínicos causados por errores de humanos.

Una visión de la robótica médica y sus contribuciones

Mayormente, se han desarrollado dos tipos de robots, los rígidos o convencionales, los cuales al ser pesados, grandes e incómodos se utilizan para tareas de rehabilitación y asistencia, aunque también se utilizan para procedimientos quirúrgicos, por ejemplo, el sistema Da Vinci®. Los cirujanos robóticos deben capacitarse en el uso de este sistema para ganar experiencia y horas prácticas que avalen su destreza previa a su uso directo con pacientes.

Por otro lado, los robots suaves, surgieron como solución a las problemáticas de los robots rígidos, para ofrecer dispositivos flexibles, ligeros, compactos y con menor consumo energético. Además, por diseños cómodos y de uso intuitivo beneficia a los usuarios su manejo, al no requerir capacitaciones especializadas y ser portables para no depender de estaciones fijas, lo que permite realizar las tareas de rehabilitación o asistencia fuera de clínicas. Su ergonomía y capacidad de doblez han permitido crear microrobots del tamaño de una capsula para la liberación de medicamentos u ofrecer tratamientos mínimamente invasivos.

Los robots suaves se han caracterizado por procesos de fabricación que se apoyan de técnicas artesanales como vaciado en moldes, o aplicación de la ingeniería inversa, digitalización 3D e impresión 3D. En general este tipo de robots se rigen bajo el principio de "constrúyelos tú mismo" (DIY por sus siglas en inglés). En ambos casos es necesario establecer sus criterios de diseño (ver sección 2), ya que entre mejor definidos los requerimientos y establecidos los criterios de diseño más fácil es lograr el propósito para el cual se pretende desarrollar (aplicación). Se sugiere validar cada una de sus etapas para garantizar su funcionamiento, aunque es inevitable que existan cambios de ingeniería, sobre todo hasta que cumpla con los requerimientos de los usuarios finales.

Si bien los esfuerzos en la robótica médica han sido enormes, todavía su comercialización es limitada. Generalmente, en los centros de investigación o Universidades, el nivel de madurez tecnológica (TRL) alcanzado es el nivel TRL4 donde el robot o dispositivo médico es validado en un laboratorio en condiciones reales, por lo que es necesario impulsar su crecimiento para ser utilizados en su entorno real (TRL9).

Actualmente, la robótica médica se está apoyando de la inteligencia artificial para dotar al robot de autonomía total en el desarrollo de su tarea, para lo cual es importante la investigación en cuestiones éticas y el desarrollo de normativas. El uso de robots en el área de la salud busca la colaboración entre el robot y los especialistas médicos con el objetivo de proporcionar un servicio de calidad con la finalidad de dar abasto a las demandas de la población.

LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Este estudio se centró principalmente en la revisión de la literatura existente sobre robótica médica, lo que puede limitar la profundidad del análisis en áreas específicas. La rápida evolución de la tecnología robótica médica puede hacer que cierta información quede rápidamente desactualizada. Además, la disponibilidad de datos clínicos detallados sobre la eficacia a largo plazo de ciertos sistemas robóticos puede ser limitada.

ESTUDIOS FUTUROS

Las investigaciones futuras deberían enfocarse en el desarrollo de sistemas robóticos más autónomos y adaptables, capaces de tomar decisiones en tiempo real durante procedimientos médicos complejos. Es crucial realizar estudios clínicos a gran escala para evaluar la seguridad

Una visión de la robótica médica y sus contribuciones

y eficacia de las nuevas tecnologías robóticas, así como su impacto en los resultados para los pacientes y los costos de atención médica. Además, la integración de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático en la robótica médica ofrece un gran potencial para mejorar la precisión y personalización de los tratamientos.

CONTRIBUCIÓN DE LOS COAUTORES

Juana Mariel Dávila-Vilchis:

- Se encargó de la recopilación y análisis de la literatura científica, así como de la redacción de las secciones relacionadas con las aplicaciones clínicas de la robótica médica.

Juan Carlos Ávila-Vilchis:

- Contribuyó al análisis de las tendencias tecnológicas en robótica médica y a la identificación de los desafíos y oportunidades para futuras investigaciones.

Adriana Herlinda Vilchis-González:

- Participó en la revisión y edición del manuscrito, asegurando la coherencia y claridad del contenido, y apporto información relevante en cuanto a la ética en la robótica medica

FINANCIACIÓN: Esta investigación no recibió financiación externa

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen las imágenes de los robots médicos proporcionados por parte de investigadores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, así como al Doctor Cirujano de Tórax Gildardo Cortés Julián, especialista en el manejo del robot Da Vinci del Hospital de Zumpango, Estado de México, México

CONFLICTOS DE INTERESES:

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

CONCLUSIONES

En este artículo se presenta una clasificación de robots para analizarlos de acuerdo con su tamaño, tipo, material, aplicación o dispositivo. Se presentó una metodología general con 10 etapas que puede ser aplicada a los robots en medicina. Un aspecto importante de esta metodología es la validación que debe realizarse en cada etapa a fin de garantizar la tarea objetivo del robot.

Si bien los ingenieros y/o investigadores son los creadores del robot, se necesita de un trabajo en conjunto con los especialistas, pacientes, terapeutas para definir la tarea objetivo del dispositivo médico que requieren. Por lo que se presentaron los principales criterios de diseño que deben establecerse para cumplir con los requerimientos de ellos como usuarios finales. Este artículo también presenta diferentes robots médicos algunos de ellos desarrollados en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México con la finalidad de ilustrar avances en diferentes áreas.

REFERENCIAS

- Asimov, I. (1942). *Runaround*.
- Barrientos, A. (2014). *Nuevas aplicaciones de la robótica. Robots de servicio*.
- Beasley, R. A. (2012). Medical Robots: Current Systems and Research Directions. *Journal of Robotics, 2012*, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2012/401613>
- Bensalem, S., Gallien, M., Ingrand, F., Kahloul, I., & Thanh-Hung, N. (2009). Designing autonomous robots. *IEEE Robotics & Automation Magazine, 16*(1), 67–77. <https://doi.org/10.1109/MRA.2008.931631>
- Camacho-Ramirez, A., Ávila-Vilchis, J. C., Saldivar, B., Vilchis-González, A. H., & Jacinto-Villegas, J. M. (2022). Adjustable Stiffness-Based Supination–Pronation Forearm Physical Rehabilitator. *Applied Sciences, 12*(12), 6164. <https://doi.org/10.3390/app12126164>
- Chavez Cardona M, Rodríguez Spitia, Felipe, & Baradica López, Asfur. (2010). Repository.eia.edu.co > entities > publicationExoesqueletos para potenciar las capacidades humanas y apoyar la rehabilitación. *Revista Ingeniería Biomédica, 4*(7), 63–73.
- Cianchetti, M., Laschi, C., Menciassi, A., & Dario, P. (2018). Biomedical applications of soft robotics. *Nature Reviews Materials, 3*(6), 143–153. <https://doi.org/10.1038/s41578-018-0022-y>
- Cifuentes, M, & Luis A. (2002). *Ortesis y Prótesis*.
- Cruz, Angel. (2007). *Diseño de un robot de tres grados de libertad para punción, compatible con ambientes de tomografía computada y resonancia magnética, y fabricación de un primer prototipo de laboratorio* [Thesis]. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Cruz Martínez, G. M., & Z.-Avilés, L. A. (2020). Design Methodology for Rehabilitation Robots: Application in an Exoskeleton for Upper Limb Rehabilitation. *Applied Sciences, 10*(16), 5459. <https://doi.org/10.3390/app10165459>
- Dario P, Eugenio Guglielmelli, Benedetto Allota, & Maria Chiara Carrozza. (1996). Robotics for medical applications. *IEEE Robotics & Automation Magazine, 44–56*.
- Dario, P., (Guglielmelli), (Eugenio) (Allotta), (Benedetto). (1994). Robotics in medicine. *In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'94), 2*, 739–752.
- Dávila-Vilchis, J.-M., Ávila-Vilchis, J. C., Vilchis-González, A. H., Zúñiga-Avilés, L. A., & Jacinto-Villegas, J. M. (2022). Fabric Inflatable Soft Actuators for Soft Wearable Devices: The MOSAR Case. *Machines, 10*(10), 871. <https://doi.org/10.3390/machines10100871>

Una visión de la robótica médica y sus contribuciones

- Dávila-Vilchis, J.-M., LAZ-Avilés, Ávila Vilchis, J. C., & Vilchis-González, A. H. (2019). Design Methodology for Soft Wearable Devices—The MOSAR Case. *Applied Sciences*, 9(22), 4727. <https://doi.org/10.3390/app9224727>
- Dávila-Vilchis, J.-M., Morales, G. L. L., González, A. H. V., & Omonte, D.-. (2024). *El Arte de los Origamis como Actuadores en la Robótica Suave*. 3.
- Diario Oficial de la Federación. (2021). *NOM-241-SSA1-2021* [Online post]. <https://sidofqa.segob.gob.mx/notas/5638793>
- Díaz, I., Gill, Juan, & Sánchez, E. (2011). Lower-Limb Robotic Rehabilitation: Literature Review and Challenges. *Jopurnal of Robotics*, 1–11.
- Domínguez-Ruiz, A., López-Caudana, E. O., Lugo-González, E., Espinosa-García, F. J., Ambrocio-Delgado, R., García, U. D., López-Gutiérrez, R., Alfaro-Ponce, M., & Ponce, P. (2023). Low limb prostheses and complex human prosthetic interaction: A systematic literature review. *Frontiers in Robotics and AI*, 10, 1032748. <https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1032748>
- Elendu, C., Amaechi, D. C., Elendu, T. C., Jingwa, K. A., Okoye, O. K., John Okah, M., Ladele, J. A., Farah, A. H., & Alimi, H. A. (2023). Ethical implications of AI and robotics in healthcare: A review. *Medicine*, 102(50), e36671. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000036671>
- European, U. (2024, September 7). *EUR-Lex* [Online post]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32017R0745>
- FDA, U. S. F. & D. (2024, August 30). *CFR - Code of Federal Regulations Title 21* [Online post]. <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/CFRSearch.cfm?CFRPart=820>
- Fiorillo, L., D'Amico, C., Turkina, A. Y., Nicita, F., Amoroso, G., & Risitano, G. (2020). Endo and Exoskeleton: New Technologies on Composite Materials. *Prosthesis*, 2(1), 1–9. <https://doi.org/10.3390/prosthesis2010001>
- Hockstein, N. G., Gourin, C. G., Faust, R. A., & Terris, D. J. (2007). A history of robots: From science fiction to surgical robotics. *Journal of Robotic Surgery*, 1(2), 113–118. <https://doi.org/10.1007/s11701-007-0021-2>
- Housley, S. N., Fitzgerald, K., & Butler, A. J. (2018). Telerehabilitation Robotics: Overview of approaches and clinical outcomes. In *Rehabilitation Robotics* (pp. 333–346). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811995-2.00026-6>
- ISO. (2016). *ISO 13485:2016* [Standard]. <https://www.iso.org/standard/59752.html>

- Lee, J. G., Raj, R. R., Day, N. B., & Shields, C. W. (2023). Microrobots for Biomedicine: Unsolved Challenges and Opportunities for Translation. *ACS Nano*, *17*(15), 14196–14204. <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c03723>
- Li, F., Chen, J., Ye, G., Dong, S., Gao, Z., & Zhou, Y. (2023). Soft Robotic Glove with Sensing and Force Feedback for Rehabilitation in Virtual Reality. *Biomimetics*, *8*(1), 83. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8010083>
- Miriyev, A., Stack, K., & Lipson, H. (2017). Soft material for soft actuators. *Nature Communications*, *8*(1), 596. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00685-3>
- Online Browsing Platform. (2021). *Robotics* [Online post]. ISO. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:8373:ed-3:v1:en>
- Palmer, A., & Schwan, D. (2024). More Process, Less Principles: The Ethics of Deploying AI and Robotics in Medicine. *Cambridge Quarterly of Healthcare Ethics*, *33*(1), 121–134. <https://doi.org/10.1017/S0963180123000087>
- Palomares Orihuela, R. J. (2016). Robot Da Vinci: El quirófano del futuro. *Perfiles de Ingeniería*, *2*(11). https://doi.org/10.31381/perfiles_ingenieria.v2i11.430
- Resquín, F., Cuesta Gómez, A., Gonzalez-Vargas, J., Brunetti, F., Torricelli, D., Molina Rueda, F., Cano De La Cuerda, R., Miangolarra, J. C., & Pons, J. L. (2016). Hybrid robotic systems for upper limb rehabilitation after stroke: A review. *Medical Engineering & Physics*, *38*(11), 1279–1288. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2016.09.001>
- Ríos-Hernández, M., Jacinto-Villegas, J. M., Portillo-Rodríguez, O., & Vilchis-González, A. H. (2021). User-Centered Design and Evaluation of an Upper Limb Rehabilitation System with a Virtual Environment. *Applied Sciences*, *11*(20), 9500. <https://doi.org/10.3390/app11209500>
- Rivera Robles, J., Bory Reyes, J., Instituto Politécnico Nacional, Hernández Simón, L. M., Instituto Politécnico Nacional, Palacios Hernández, J. I. E., & Instituto Politécnico Nacional. (2024). Rehabilitation Exoskeletons: A Systematic Literature Review. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, *45*(2), 78–99. <https://doi.org/10.17488/RMIB.45.2.5>
- Rus, D., & Tolley, M. T. (2015). Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*, *521*(7553), 467–475. <https://doi.org/10.1038/nature14543>
- Sabino, M. A., Loaza, M., Dernowsek, J., & Rezende, R. (2017). *Técnicas para la fabricación de andamios poliméricos con aplicaciones en Ingeniería de tejidos*. *37*(2), 1–27.
- Song, T., Yan, Z., Guo, S., Li, Y., Li, X., & Xi, F. (2023). Review of sEMG for Robot Control: Techniques and Applications. *Applied Sciences*, *13*(17), 9546. <https://doi.org/10.3390/app13179546>

Una visión de la robótica médica y sus contribuciones

- Turiel, J. P., Marinero, J. C. F., & Gonzalez, J. R. P. (2002). *Aplicaciones de la Robótica: Últimas tendencias y nuevas perspectivas*.
- Vulpe, M., & Stancu, S. (2024). *The Forever Robotics Rules? An Overview Analysis of Their Applicability Scaled Over Time from Isaac Asimov to Our Software Robots* (Vol. 921). Springer.
- Walker, J., Zidek, T., Harbel, C., Yoon, S., Strickland, F. S., Kumar, S., & Shin, M. (2020). Soft Robotics: A Review of Recent Developments of Pneumatic Soft Actuators. *Actuators*, 9(1), 3. <https://doi.org/10.3390/act9010003>
- Wallin, T. J., Pikul, J., & Shepherd, R. F. (2018). 3D printing of soft robotic systems. *Nature Reviews Materials*, 3(6), 84–100. <https://doi.org/10.1038/s41578-018-0002-2>
- Yang, C., Ma, H., & Fu, M. (2016). Robot Kinematics and Dynamics Modeling. In C. Yang, H. Ma, & M. Fu, *Advanced Technologies in Modern Robotic Applications* (pp. 27–48). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0830-6_2
- Yang, H. D., & Asbeck, A. T. (2018). A New Manufacturing Process for Soft Robots and Soft/Rigid Hybrid Robots. *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 8039–8046. <https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8593688>
- Zagoya-López, J., Zúñiga-Avilés, L. A., Vilchis-González, A. H., & Ávila-Vilchis, J. C. (2021). Foot/Ankle Prostheses Design Approach Based on Scientometric and Patentometric Analyses. *Applied Sciences*, 11(12), 5591. <https://doi.org/10.3390/app11125591>
- Zimmermann, E. A., & Ritchie, R. O. (2015). Bone as a Structural Material. *Advanced Healthcare Materials*, 4, 1287–1304.