

## ARTÍCULO ACEPTADO

# Robots médicos de punción percutánea compatibles con resonancia magnética

Isis Danae Sánchez Hernández, Adriana Herlinda Vilchis González y Juan Carlos Ávila Vilchis

## Introducción

El estudio de Resonancia Magnética (RM) es la tecnología médica diagnóstica de imágenes más apropiada para la visualización de tejidos blandos. La RM produce imágenes anatómicas tridimensionales detalladas de excelente calidad, es capaz de detectar cambios pequeños en estructuras anatómicas y ofrecer contrastes elevados útiles para la diferenciación de tejidos. A diferencia de otros estudios como los rayos X o la tomografía computarizada, la RM no expone a los pacientes ni al personal médico a radiación ionizante, que es potencialmente dañina para el ser humano.

La RM emplea imanes que producen un potente campo magnético que, en conjunto con ondas de radiofrecuencia generadas mediante una computadora, crean las imágenes detalladas de los órganos y tejidos del cuerpo. Aunque la RM no emite radiación ionizante dañina para el ser humano, el campo magnético que produce se extiende más allá de la máquina y ejerce fuerzas de atracción sobre objetos de hierro, algunos aceros y otros objetos magnetizables. Por lo mencionado, la RM está contraindicada en presencia de materiales que pueden ser afectados por los campos magnéticos potentes. Estos materiales incluyen: (1) metales ferromagnéticos; (2) dispositivos médicos magnéticamente activados o controlados electrónicamente (como marcapasos, desfibriladores cardioversores implantables e implantes cocleares); y (3) cables eléctricos o materiales no ferromagnéticos como cables de marcapasos y ciertos catéteres [1].

El campo magnético de la RM es muy fuerte y puede estar siempre activo. Así, un objeto ferromagnético (tanques de oxígeno, postes de metal, o cualquier otro) en la entrada de la sala de exploración puede ser atraído por el imán a alta velocidad y ocasionar un accidente. La única manera de separar el objeto del imán puede ser desactivar (anular) el campo magnético [1].

Algunas de las aplicaciones de la RM son el diagnóstico, investigación y análisis de anomalías, tumores, quistes, y lesiones en diferentes estructuras anatómicas del cuerpo. Debido al avance de robots médicos en términos de tecnología, investigación y desarrollo, muchos campos de la medicina se han visto positivamente impactados con la introducción de sistemas robóticos, como

es el caso de la cirugía robótica en combinación con estudios imagenológicos como la RM. Bajo este esquema, las capacidades de la resonancia magnética han mejorado para permitir intervenciones con aguja dentro del equipo de RM, donde un médico puede seleccionar un objetivo e introducir una aguja a través de la piel en estructuras anatómicas específicas, como articulaciones o raíces nerviosas para inyectar un agente de contraste o un analgésico. El médico también puede llegar a diferentes órganos internos, como la próstata, la mama, el hígado o el cerebro para realizar una biopsia y apuntar a las lesiones cancerosas con procedimientos de ablación con aguja para quemar o congelar las células malignas. Se han desarrollado diversos dispositivos e incluso agujas de materiales que han demostrado no presentar susceptibilidad ante el campo magnético generado por la RM y que son compatibles con el estudio, como pueden ser el Titanio, aleaciones de Cromo-Cobalto, Cobre e incluso acero inoxidable [2].

La aplicabilidad de los sistemas robóticos en procedimientos quirúrgicos ha quedado demostrada en procedimientos complejos, mejorando la precisión en los movimientos del médico, reduciendo el tiempo de convalecencia y de pérdida sanguínea y permitiendo realizar operaciones a distancia; todo ello con un bajo índice de errores y escasas complicaciones presentadas [3]. A su vez, se logra ampliar la utilidad de la RM, pasando de ser exclusivamente un método de diagnóstico a ser parte de la intervención quirúrgica.

A continuación, se presenta una revisión del avance de plataformas robóticas guiadas por RM para realizar la tarea de punción percutánea en tejidos de interés.

## Robots de punción compatibles con RM

Se realizó una revisión de las plataformas robóticas compatibles con RM desarrolladas en los últimos años, tanto experimentales como comerciales. En las secciones siguientes, se hace un compendio de las principales aplicaciones de dichos robots, primeramente, divididos por el tipo de robótica empleada (robótica rígida o robótica suave) y subdividida de acuerdo con la región anatómica para la que el robot tiene aplicación.

---

**Los robots médicos compatibles con resonancia magnética son capaces de mejorar los procedimientos quirúrgicos actuales.**

---

## I. Principales aplicaciones de la robótica guiada por RM

Las siguientes subsecciones se enfocan en los sistemas robóticos tanto rígidos como suaves de RM para intervenciones con aguja. Los sistemas de robótica rígida se comentan para cuatro categorías: (a) diagnóstico e intervención de cáncer de mama; (b) biopsias de próstata y braquiterapia; (c) biopsia e intervenciones neuronales y (d) otras aplicaciones guiadas por RM con aguja. Las aplicaciones de los robots suaves se especifican en su respectiva sección.

## II. Robots rígidos

El manipulador industrial común, es un ejemplo de robot rígido, el cual forma una cadena cinemática de varios grados de libertad, constituido por eslabones y articulaciones. Siendo estructuras con muy poca capacidad de deformación elástica, las articulaciones permiten el movimiento relativo entre eslabones consecutivos gracias a un sistema de actuación y de transmisión que está acoplado a cada eslabón.

### a. Diagnóstico e intervención de cáncer de mama

El cáncer de mama es el tipo de cáncer más común, en 2020 se presentaron más de 2,2 millones de casos y produjo la muerte de alrededor de 685,000 mujeres, posicionándose como la primera causa de muerte en mujeres a nivel mundial. Una estrategia útil para contrarrestar las elevadas cifras de letalidad que ocasiona esta enfermedad es su detección y tratamiento en sus fases iniciales, para lograr esto es necesario contar con procedimientos y dispositivos que brinden diagnósticos oportunos [4].

La RM es altamente sensible a las lesiones del cáncer de mama, proporcionando una tasa de detección de alrededor del 90% Larson [2], desarrolló el primer dispositivo robótico de intervenciones con RM interactivas para mamas en Estados Unidos. A partir de ese momento, se han reportado algunos nuevos sistemas en la literatura. Yang [2], utilizó cilindros neumáticos para desarrollar un sistema maestro-esclavo para biopsias de mamas trabajando en RM. Este sistema cuenta con 6 Grados de Libertad (GDL), uno de ellos acciona la punción de la aguja.

Park [4], desarrolló un sistema robótico automático de intervención con aguja flexible para biopsia de mama guiada por RM para superar

la limitación de espacio del orificio del escáner. Este sistema robótico permite acceder al área de la mama desde un costado del paciente. El cirujano elige un punto de objetivo en las imágenes de RM y el sistema robótico calcula la navegación de la aguja, visualiza la trayectoria de la aguja y conduce automáticamente la aguja que es flexible en una trayectoria curva hacia el objetivo. Los estudios en fantoma (material que simula el tejido humano) mostraron una precisión de 0,8 mm para localizar la punta de la aguja.

En la Universidad de Twente, se desarrolló Stormram 4 [5], un sistema robótico novedoso y compacto de 4 GDL impreso en plástico. Stormram 4 utiliza motores paso a paso neumáticos lineales y un motor paso a paso neumático curvo de reciente desarrollo. Este robot muestra una precisión posicional de 0,71, 0,2 y 0,21 mm en las direcciones X, Y y Z, respectivamente. Tiene el objetivo de realizar extracción de tejido (biopsias) durante la exploración de la mama por RM de una forma más precisa.

### b. Biopsias de próstata y braquiterapia

El cáncer de próstata fue en 2020, el cuarto cáncer que presentó más casos nuevos en el mundo con un total de 1.41 millones de casos nuevos. Una de las principales aplicaciones de los sistemas robóticos compatibles con RM es la braquiterapia y biopsias de próstata. La primera prueba en humanos usando un sistema robótico intraoperativo guiado por RM fue reportado por Bosch en un paciente [2]. Este sistema posee 5 GDL ajustables manualmente y uno para la aguja de inserción automática con precisión de menos de 1mm.

Ball [6], usó un robot con 6 GDL llamado Mr-Bot que fue aprobado para realizar pruebas humanas. Cinco hombres con una edad media de 66 años se sometieron a biopsia con Mr-Bot, donde para 30 pruebas de biopsias, se informó una precisión de focalización de 2,55 mm, sin correcciones de trayectoria ni intentos fallidos. Todos los pacientes toleraron bien el procedimiento. En MrBot, se usaron motores PneuStep (Motor Neumático a Pasos de material dieléctrico no magnético) que proporcionan una actuación neumática diseñada especialmente para esta aplicación. MIRIAM es un sistema robótico para intervenciones de cáncer de próstata, que se encuentra en fase de estudio en fantoma. Es accionado por motores piezoeléctricos, mientras que el me-

canismo de inserción de la aguja es accionado por un motor neumático, tiene un total de 9 GDL [2].

#### c. **Biopsia e intervenciones neuronales**

Los procedimientos relacionados con el cerebro incluyen biopsia, inyección de medicamentos, cirugía con láser, tratamiento con radiación y colocación de electrodos para la estimulación cerebral profunda. La RM es la modalidad de imágenes más utilizada que puede visualizar tanto la función como la estructura del cerebro [1].

Comber [7], presentó un robot accionado neumáticamente para neurocirugía guiada por RM. La estructura de tubo concéntrico del robot resultó en desafíos de control y fallas de linealidad. Se adaptó posteriormente para el tratamiento de la epilepsia mediante ablación térmica y para la hipocampotomía transforaminal. Tiene 5 GDL y una precisión promedio de 0.032mm.

Ho [2], presentó un robot neuroquirúrgico compatible con RM. Usando dos alambres de aleación con memoria de forma antagónica (SMA) como actuadores para cada articulación, usando la temperatura para controlar el movimiento de la articulación del robot. Este fue probado en fantoma y posee 4 GDL.

#### d. **Otras aplicaciones**

Stoianovici [8], desarrolló un robot de RM para biopsias óseas. Un estudio en fantoma mostró un error de focalización 2D promedio de 1,25 mm y un error 3D promedio de 1,39 mm. Utiliza motores PneuStep, tiene 3 GDL, dos para posicionar la aguja y uno para accionarla.

Franco [9], desarrolló un sistema robótico montado en una mesa accionado neumáticamente para ayudar a los médicos en la ablación de tumores hepáticos guiada por RM. Este sistema robótico se sometió a dos estudios clínicos con resultados prometedores. Los experimentos de fantoma sugirieron que el ahorro de tiempo potencial al usar este robot sería de 30 minutos en comparación a los procedimientos de ablación hepática convencionales. Tiene 4 GDL como cilindros neumáticos que son accionados por reguladores de presión para posicionar la aguja.

### III. **Robots Suaves**

Los robots suaves están frecuentemente inspirados en sistemas biológicos con la capacidad de adaptarse mejor a entornos de la misma naturaleza. En

contraste con los robots de cuerpo rígido, los robots suaves tienen una deformación continua en su estructura flexible, lo que resulta en grados de libertad más complejos y a su vez con más similitud a la anatomía humana. Los robots suaves adoptan materiales elásticos para el cuerpo principal y materiales como polímeros, hules, siliconas u otros materiales flexibles para sus partes móviles. Hasta el momento, únicamente se ha encontrado en la literatura un robot suave que se adapta a la tarea de punción percutánea, así como uno adicional en desarrollo, ambos son mencionados a continuación

#### a. **Robot suave de aguja percutánea guiado por RM con actuador impulsado por fluido**

Se trata de un sistema robótico montado en el paciente de tamaño pequeño para la colocación de agujas percutáneas guiadas por RM, que permite la orientación e inserción simultáneas de la aguja en múltiples ubicaciones con varios robots. El dispositivo está diseñado para ayudar al cirujano a realizar intervenciones intraoperatorias, como la ablación por radiofrecuencia y láser de los órganos abdominales [3].

Para guiar la aguja del robot se consideraron 2 grados de libertad planares en el punto de inserción predeterminado por el cirujano, estos grados de libertad se logran con tres cámaras fluidicas suaves, que están llenas de agua destilada. El sistema proporciona un posicionamiento semiautomático de la aguja.

El sistema está construido con materiales que cumplen con el estándar de compatibilidad de RM. Para minimizar la interferencia con las imágenes de RM, la estructura principal del robot está impresa en 3D con polímeros biocompatibles. Los componentes restantes también están hechos de materiales no conductores, no metálicos y no ferromagnéticos.

#### b. **Robot suave para biopsias en la región toracoabdominal compatible con RM**

Actualmente, los autores de este artículo se encuentran trabajando en una innovación del dispositivo propuesto por Cruz [10], se trata de una plataforma experimental que contempla dos grados de libertad en una articulación semiesférica (para el posicionamiento de la aguja), como la mostrada en la Figura 1, generando el movimiento con cuatro cámaras como actuadores de activación neumática. Posee un tercer grado de libertad para la inserción de la aguja.

La innovación se centra en el uso de cámaras de silicona que se accionan neumáticamente, esto se asimila a tener una serie de globos conectados de un costado entre sí que, al ser insuflados, se producirá un movimiento angular. La silicona se encuentra inicialmente en estado líquido en partes A y B, luego de ser mezclada se vierte en moldes prediseñados e impresos en 3D; pasando el tiempo de secado quedan listos para ser montados en la base, accionando el movimiento al ser insuflados por un compresor, como se muestra en la Figura 2.

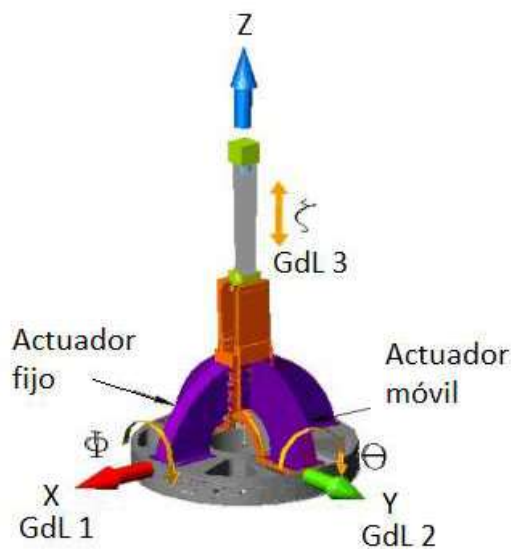


Figura 1. Arquitectura robótica de los 3 GDL [1].

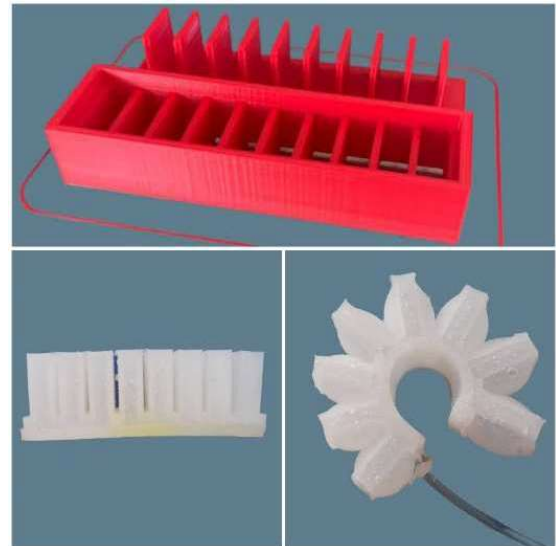


Figura 2. a) Moldes impresos en 3D. b) Actuador en estado pasivo. c) Actuador en estado activo.

Este dispositivo tiene la finalidad de automatizar la etapa de extracción de tejido en las biopsias con aguja, pretendiendo aumentar con respecto a los procedimientos convencionales, la precisión, sensibilidad, visibilidad y control de la etapa de extracción de tejido en biopsias, para su posterior análisis histopatológico y diagnóstico.

## Estos dispositivos favorecen al diagnóstico oportuno de una de las enfermedades más devastadoras del mundo: el cáncer.

### Conclusión

La cirugía robótica se ha convertido en una parte importante de la cirugía clínica, puede ser aprovechada al ser utilizada en conjunto con otras tecnologías como la RM, que posee características y ventajas únicas dentro de la variedad de estudios de imágenes médicas. Con el desarrollo de la tecnología, se ha desplegado una variedad de nuevas aplicaciones de la robótica en la medicina que permiten al médico desarrollar sus actividades con mayor soltura y seguridad, y al paciente acceder a estudios diagnósticos y tratamientos más eficientes que comprometen menos su estado de salud.

Las diversas aplicaciones que se mencionaron en el artículo favorecen principalmente al diagnóstico y decremento de una de las enfermedades más devastadoras del

mundo: el cáncer, que se presenta en sus etapas iniciales como tumores en los diversos órganos y tejidos del cuerpo, para los cuales, los estudios de diagnóstico se basan principalmente en biopsias. Siendo las biopsias de punción percutánea con aguja, las menos invasivas para el organismo, ya que conllevan un riesgo de infección postoperatoria más bajo, un tiempo de recuperación más corto y una lesión mínima. Por lo que, además, la automatización del procedimiento con dispositivos robóticos beneficia a todos los involucrados significativamente.

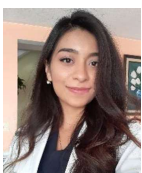
Existe un reto en el desarrollo de materiales y tecnología para la robótica suave, que como se presenta en el artículo, posee algunas bondades debido a su morfología y constitución, sobre todo cuando se requiere interacción directa con el humano, como en las cirugías y la medi-

cina general. No obstante, los robots suaves tienen cada día más presencia en las diversas áreas de la ingeniería, lo que propiciará una gama más amplia de alternativas para seguir desarrollando tecnología y soluciones biomédicas. \*

## REFERENCIAS

1. Tsekos, N., Khanicheh, A., Christoforou, E., y Mavroidis, C. (2007). Magnetic Resonance-Compatible Robotic and Mechatronics Systems for Image-Guided Interventions and Rehabilitation: A Review Study. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 9(1), 351-387.
2. Monfaredi, R., Cleary, K., y Sharma, K. (2018). MRI Robots for Needle-Based Interventions: Systems and Technology. *Biomedical engineering society*, 46(10), 1479-1497.
3. He, Z., Dong, Z., Fang, G., Ho, L., Cheung, L., Chang, C., Chong, N., Chan, K., Chan, M., y Kwok, W. (2020). Design of a Percutaneous MRI-Guided Needle Robot With Soft Fluid-Driven Actuator. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), 2100-2107.
4. Park, S., Kim, G., Lim, W., Yoon, H., Kim, J., Kang, S., y Jo, H. (2017). A magnetic resonance image-guided breast needle intervention robot system: Overview and design considerations. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 12(8), 1319-1331.
5. Groenhuis, V., Siepel, F.J., Veltman, J., van Zandwijk, J.K., y Stramigioli, S. (2018). Stormram 4: An MR Safe Robotic System for Breast Biopsy. *Annals of Biomedical Engineering*, 46(10), 1686-1696.
6. Ball, M.W., Ross, E., Ghabili, K., Kim, C., Jun, C., Petrisor, D., Pan, L., Epstein, I., Macura, J., Stoianovici, S., y Allaf, E. (2017). Safety and Feasibility of Direct Magnetic Resonance Imaging-guided Transperineal Prostate Biopsy Using a Novel Magnetic Resonance Imaging-safe Robotic Device. *Urology*, 109, 216-221.
7. Comber, D.B., Barth, E.J., y Webster, R.J. (2014). Design and Control of an Magnetic Resonance Compatible Precision Pneumatic Active Cannula Robot. *Journal of Medical Devices*, 8(1), 011003.
8. Stoianovici, D., Jun, C., Lim, S., Li, P., Petrisor, D., Fricke, S., Sharma, K., y Cleary, K. (2018). Multi-Imager Compatible, MR Safe, Remote Center of Motion Needle-Guide Robot. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 65(1), 165-177.
9. Franco, E., Ristic, M., Rea, M., y Gedroyc, W.M.W. (2016). Robot-assistant for MRI-guided liver ablation: A pilot study. *Medical Physics*, 43(10), 5347.
10. Cruz, A.M. (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. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma del Estado de México.

## SOBRE LOS AUTORES



**Isis Danae Sánchez Hernández** es estudiante de Bioingeniería Médica en la Universidad Autónoma del Estado de México. Se desempeña actualmente en el departamento de Ingeniería Biomédica en un hospital de tercer nivel de atención y en el desarrollo de una plataforma robótica suave para biopsias compatible con resonancia magnética. Sus áreas de interés incluyen Robótica Médica, Telemedicina y desarrollo de Prótesis de miembro superior.



**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, 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.