



# Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



## Diseño y fabricación de microrrobot propulsado por campos magnéticos y plataforma experimental.

Mancha-Sánchez, E.<sup>a,\*</sup>, Serrano-Balbontín, A.J.<sup>a</sup>, Tejado, I.<sup>a</sup>, Vinagre, B.M.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Universidad de Extremadura, Escuela de Ingenierías Industriales, Avda. de Elvas, s/n, 06006, Badajoz, España.

### Resumen

La microrrobótica es un campo en crecimiento de la robótica. En el ámbito de la medicina, los microrrobots permiten realizar intervenciones de manera mínimamente invasiva, liberar fármacos o ser usado como biosensores. El objetivo de este trabajo es desarrollar un microrrobot con flagelo pasivo movido por campos magnéticos, así como fabricar una plataforma de experimentación. El microrrobot se creó usando PDMS y un pequeño imán situado en su cabeza. La plataforma está formada por dos bobinas enfrentadas, una tubería, un sistema de engranajes que permiten el giro de las bobinas sobre la tubería, y un raíl por el que el sistema de bobinas se desplaza. Se probó uno de los microrrobots fabricados en la plataforma, observando que el microrrobot generaba el movimiento oscilatorio deseado. Del mismo modo, y debido al movimiento del flagelo, se producía un desplazamiento neto del microrrobot sobre la tubería.

*Palabras clave:* Tecnología robótica, Simulación, Robot bioinspirado, Campo magnético, Microrrobot .

### Design and manufacture of magnetic field propelled microrobot and experimental platform

#### Abstract

Microrobotics is a growing field of robotics. In the field of medicine, microrobots make possible to perform minimally invasive interventions, to release drugs, or act like biosensors. The aim of this work is to develop a microrobot with a passive flagellum moved by magnetic fields, as well as to build an experimental platform. The microrobot was created using PDMS and a small magnet placed in its head. The platform consists of two coils facing each other in a pipe, a system of gears that allow the coils to rotate on the pipe, and a rail along which the coil system moves. One of the developed microrobots was tested on the platform, observing that the microrobot generated the desired oscillatory movement. In the same way, and due to the movement of the flagellum, a net displacement of the microrobot on the pipe was produced.

*Keywords:* Robotics technology, Simulation, Bio-inspired Robotics, Magnetic fields, Microrobot .

### 1. Introducción

La robótica se encuentra en todos los campos de nuestra vida diaria, sin embargo, existen todavía fronteras en las que esta disciplina está comenzando a desarrollarse. El ámbito de la robótica médica es un campo en plena expansión. Mientras que ya se utilizan robots para cirugía de manera más extendida, existen otros áreas donde estos robots debido a su tamaño, de momento no se han expandido. Estos robots de pequeño tamaño son denominados como microrrobots. Los microrrobots son robots de pequeña escala que pueden operar en pequeños espacios y realizar tareas que los robots convencionales no pueden. Tienen muchas aplicaciones en diversos campos, no sólo

en el ámbito médico sino en la ingeniería ambiental, la nanotecnología o la seguridad. Los microrrobots aplicados a la salud pueden realizar diversas tareas tales como la cirugía mínimamente invasiva, la liberación de fármacos de forma controlada, o su uso como sensores para la monitorización de enfermedades o parámetros sanitarios, entre otros (Li et al., 2017) .

Esta disciplina, la microrrobótica aplicada al ámbito médico, ha visto reducido su uso en un mayor porcentaje debido a los desafíos a los que se enfrenta su desarrollo. El tamaño reducido hace que estos dispositivos se relacionen con el medio de una manera diferente a como lo hacen los dispositivos de mayor tamaño. Esto es debido a que las fuerzas inerciales se

\*Autor para correspondencia: emancha@unex.es

hacen insignificantes, siendo de este modo las fuerzas viscosas las que toman relevancia. Estos desafíos incluyen el diseño, los materiales, la fuente de energía, la localización, el control y la comunicación. (Yang et al., 2019)

Uno de los desafíos más importantes es la manera de alimentar al microrrobot. Existen dos estrategias diferentes para conseguir llevar energía al microrrobot, aplicando la energía de forma externa, denominados no autónomos, o utilizando energía almacenada de manera interna o del propio medio en el que se encuentren, conocidos como autónomos. Existen multitud de alternativas para aplicar energía externa a un microrrobot y que éste pueda desplazarse. Lo más utilizado es la aplicación de campos externos, como pueden ser campos eléctricos, ópticos, acústicos, o magnéticos (Choi et al., 2021). La aplicación de campos magnéticos es uno de los más usados dentro de este grupo (Celi et al., 2021). Esto es debido a sus ventajas, como la penetración profunda, la baja atenuación, la fácil generación y la alta precisión. Los microrrobots magnéticos pueden ser fabricados con materiales magnéticos o no magnéticos, dependiendo de si el campo magnético se utiliza para generar fuerzas o torques sobre el microrrobot. Los microrrobots magnéticos pueden realizar diversos modos de locomoción.

La inspiración biológica es una fuente importante para el diseño y la optimización de los microrrobots magnéticos, ya que los organismos vivos han desarrollado diversas formas de locomoción eficientes y adaptativas en la naturaleza. Entre los organismos vivos, los microorganismos o células flageladas (Singh et al., 2020) y los peces son especialmente interesantes para el estudio de los microrrobots magnéticos, ya que pueden nadar con gran agilidad y versatilidad en medios acuosos, que son los más comunes para las aplicaciones biomédicas de los microrrobots (Heo et al., 2007). El movimiento ondulatorio de estos organismos puede ser imitado por los microrrobots magnéticos mediante el uso de materiales blandos y campos magnéticos oscilantes.

El objetivo de este trabajo es desarrollar, fabricar y estudiar el comportamiento de microrrobots magnéticos en un campo magnético, realizar simulaciones computacionales iniciales y diseñar y fabricar una plataforma de experimentación.

## 2. Fabricación microrrobots

Esta sección detalla las diferentes alternativas realizadas para desarrollar y fabricar los microrrobots que puedan ser actuados mediante campos magnéticos.

### 2.1. Microrrobot con cabeza recubierta

Se desarrolló un microrrobot siguiendo un principio similar al descrito por (Wang et al., 2021). En ese artículo se utiliza una estructura semicilíndrica en forma de balancín con la base truncada con un recubrimiento metálico de Níquel (Figura 1a). Esta estructura es excitada mediante campos magnéticos para generar un movimiento de balanceo. Este balanceo, junto con la base truncada le permite desplazarse alternado el campo magnético aplicado. Se propone utilizar este movimiento oscilatorio para impulsar un microrrobot. La adición de un flagelo en la cara con el recubrimiento metálico de la estructura, nos permitirá usar el movimiento oscilatorio de la cabeza para proporcionar la propulsión del microrrobot

Las diferencias entre la estructura presentada en el artículo de (Wang et al., 2021)(Figura 1a) y la realizada por nosotros (Figura 1b) sugieren que replicar exactamente el movimiento descrito en el artículo podría presentar desafíos. La diferencia más notable es el tamaño: mientras que la cabeza en el artículo mide  $100 \times 113 \times 36 \mu\text{m}$ , la nuestra es aproximadamente cuarenta veces más grande, con dimensiones de  $4 \times 3 \times 2 \text{ mm}$ . Además, el grosor de la capa que recubre la cara plana de la estructura en el artículo es de  $300 \text{ nm}$ , en contraste con los  $100 \text{ nm}$  de nuestra estructura, lo que corresponde a un tercio del grosor original. Estas diferencias podrían corregirse utilizando un recubrimiento metálico de mayor grosor. Por otro lado, y debido a la naturaleza del movimiento deseado, la cabeza fabricada por nosotros es un semicilindro y no presenta la forma del semicilindro truncada de (Wang et al., 2021). Para comprobar si se podía generar un movimiento oscilatorio se realizaron una serie de experimentos con imanes. En ellos, se comprobó que esta estructura poseía el ferromagnetismo propio del Ni, no así magnetismo propio o inducido.

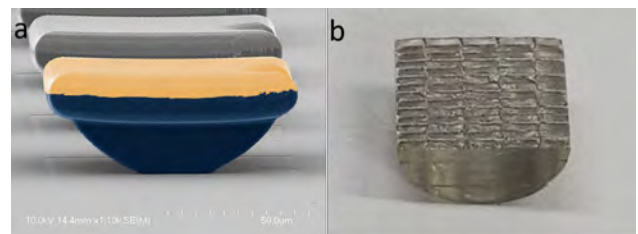


Figura 1: a. Imagen de microscopía de la estructura desarrollada en (Wang et al., 2021). b. Fotografía de nuestra estructura de resina con la capa de Ni

Para comprobar si el movimiento obtenido con la cabeza era suficiente para poder desplazar un microrrobot en un fluido se fabricó un microrrobot con un molde de plástico flexible. Este molde se rellenó con PDMS y se le introdujo la estructura semicilíndrica con el recubrimiento de Ni. Del mismo modo que con la cabeza desnuda se comprobaron las propiedades magnéticas de la cabeza con el flagelo de PDMS. Así se observó que la respuesta al campo magnético quedaba aún más reducida, haciéndolo imposible de utilizar con las bobinas existentes.

### 2.2. Microrrobots con imanes

Se fabricó una alternativa al microrrobot con la cabeza recubierta. En este caso el microrrobot se fabricó introduciendo un imán en un molde realizado con silicona que se rellenó de PDMS (Figura 2) Se realizaron diferentes prototipos con imanes en su interior. Para ello, se utilizaron imanes cilíndricos de  $1 \times 1 \text{ mm}$  que se introdujeron en diferentes microrrobots fabricados de PDMS.

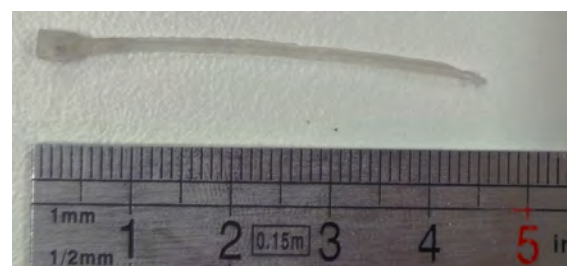


Figura 2: Imagen con uno de los microrrobots con imán en la cabeza

### 3. Simulación

Para poder entender cómo es el campo magnético generado por las bobinas, así como cómo se comporta el microrrobot frente a esos campos es necesario primero realizar simulaciones computacionales. Para realizar estas simulaciones se utilizó COMSOL Multiphysics.

Se realizó una simulación en el aire de una pareja de bobinas entre las cuales se situaba una cabeza de un material magnético. Para poder realizar una simulación de campo magnético con un elemento móvil (en nuestro caso la cabeza del microrrobot) es necesario confinar la estructura en un volumen amplio. Por esto se introdujeron todos los elementos en una esfera de gran tamaño. Los parámetros establecidos para la geometría aparecen en la tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de la geometría del modelo del modelo

Elemento	Tamaño (cm)
Esfera	20
Elipsoide	1x2x1 (semieje-a-b-c)
Bobina (x2)	5x2,5 (b-h)

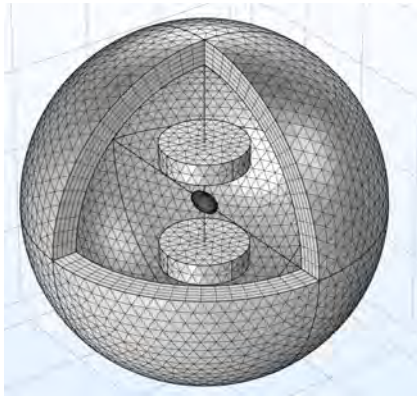


Figura 3: Imagen del modelo con su malla.

Posteriormente se empleó el Módulo AC/DC para modelar la generación de campos magnéticos, más concretamente la física de “Campos magnéticos sin corrientes”. Las paredes de la esfera, para evitar interacciones con el campo magnético generado por las bobinas, se caracterizaron como “elementos infinitos”. Para poder calcular el campo magnético ( $B$ ) de un elemento que posee magnetismo intrínseco ( $M$ ) se aplica la siguiente fórmula:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (1)$$

donde,  $B$  es el campo magnético generado,  $\mu_0$  la permeabilidad magnética del material,  $H$  la intensidad de campo magnético (externo) y  $M$  la magnetización del material. En nuestro caso  $H = 0$  en ambas bobinas, por lo tanto  $B$  será el resultado de la magnetización interna del material. De este modo a cada una de las bobinas se le aplicó una magnetización periódica correspondiente a una función seno a una de las bobinas y coseno a la otra. A la bobina 1 se le aplicó  $1,1e^5 \cos(20\pi t)$  A/m, mientras que a la otra  $1,1e^5 \sin(20\pi t)$  A/m. La representación del campo magnético generado puede verse en la figura 4. En cuanto a la

elipsoide, correspondiente a la cabeza, se le calculó un movimiento provocado por la fuerza generada según su material por el campo magnético resultante. Utilizando la componente x de la fuerza generada por el campo magnético y dividiendo por la masa de la elipsoide, se obtiene la aceleración producida en la cabeza:

$$\frac{\delta v}{\delta t} = F_z/m \quad (2)$$

donde  $\frac{\delta v}{\delta t}$  es la aceleración,  $F_z$  la fuerza en la componente z y  $m$  la masa de la elipsoide. Finalmente integrando la aceleración y posteriormente la velocidad se obtiene el desplazamiento del cuerpo.

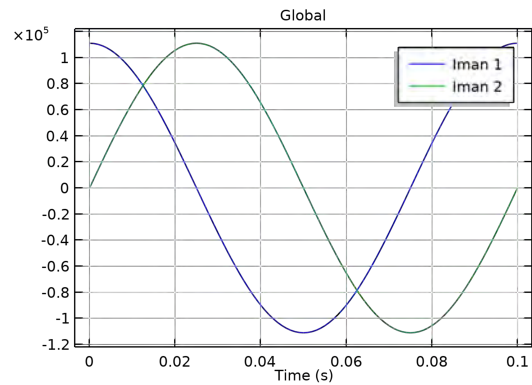


Figura 4: Gráfica del campo magnético generado por cada una de las bobinas

Por otro lado, para permitir que la elipsoide se mueva dentro del volumen se le aplicó la física de “Malla móvil”. Aplicando por el contrario la física de “Malla fija.” El resto de componentes. Dentro de la malla móvil de la elipsoide, se le prescribió un desplazamiento para permitir que su malla se desplazara con la misma velocidad que lo hacía el cuerpo, evitando problemas posteriores en la simulación. Este desplazamiento fue el mismo que el calculado según las fuerzas aplicadas. Posteriormente, se generaron las mallas de todos los elementos, teniendo especial cuidado a la hora de generarla en las inmediaciones de la elipsoide. El resultado del mallado puede observarse en la figura 3. Finalmente se realizó la simulación. El tiempo de computación se marcó en 0.1 s. La duración final de esta simulación fue de 3 h y 26 min. Los resultados del campo magnético derivado de la activación periódica de ambas bobinas pueden verse en la figura 5. En esta figura se observa cómo la segunda bobina no está activa en  $t = 0$  mientras que la primera se encuentra en su máximo. Posteriormente, en  $t = 0,012$ , ambas bobinas se encuentran generando el mismo campo magnético. Siguiendo el proceso, en  $t = 0,025$  la segunda bobina se encuentra en su máximo de activación, generando el máximo de campo magnético, mientras que la primera está desactivada ( $B = 0$ ). Por último, en  $t = 0,05$ , la primera bobina ha cambiado la dirección de magnetización con respecto a  $t = 0$ , mientras que la segunda se encuentra con  $B = 0$ .

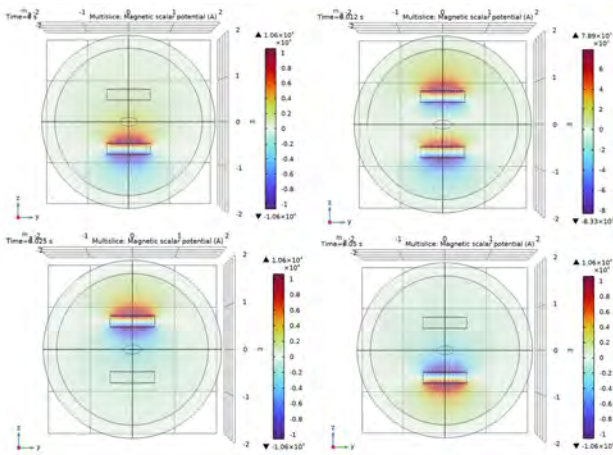


Figura 5: Resultados de la aplicación de los campos magnéticos por las bobinas a tiempos  $t = 0, t = 0,012, t = 0,025$  y  $t = 0,05$

Los resultados del desplazamiento y la aceleración de la elipsoide se pueden observar en la Figura 6. Como se muestra en la figura, la cabeza comienza moviéndose a una velocidad que disminuye progresivamente a medida que se activa la bobina opuesta. La velocidad oscila alrededor de cero, pero con un ligero *offset*. Esto, al igual que en el caso del desplazamiento, se debe a la falta de control sobre la activación y desactivación de las bobinas. Cuando una de las bobinas se activa primero, la activación de la segunda bobina solo logra compensar parcialmente la fuerza ejercida por la primera. De manera similar a la velocidad, el elipsoide se mueve hacia arriba y hacia abajo, oscilando en torno a un valor que gradualmente disminuye, acercándose siempre a la bobina que se activó primero.

Esta simulación es un punto de partida inicial para observar los campos magnéticos generados por dos bobinas enfrentadas y su interacción con una partícula situada entre ellas.

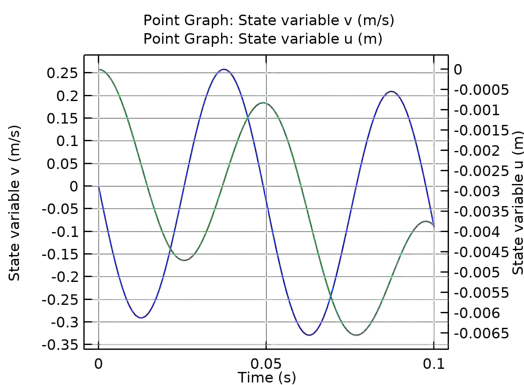


Figura 6: Gráfica del desplazamiento y la velocidad de la elipsoide, donde  $u$  (en azul) es el desplazamiento y  $v$  (en verde) la velocidad.

#### 4. Plataforma de experimentación

En esta sección se describe la plataforma experimental diseñada para realizar los experimentos con microrrobots y sistemas de actuación magnéticos. Esta plataforma ha sido concebida para ofrecer versatilidad y servir como base para diferentes experimentos tanto de diseño de microrrobots en fluido, como

para sistemas de navegación en tres dimensiones o para actuación magnética. Esta plataforma tiene como finalidad proporcionar un sistema que permita el movimiento de microrrobots. Estos robots se colocan dentro de una tubería. Fuera de esta tubería, cerca de sus paredes, hay dos bobinas enfrentadas dispuestas a lo largo de su eje que pueden girar, creando un campo magnético. Este campo magnético es el que impulsa y dirige el movimiento de los microrrobots. Todo el sistema de bobinas se mueve a lo largo de la tubería gracias a un raíl.

##### 4.1. Visión general de la plataforma

La plataforma está compuesta por tres elementos principales: El elemento que rota las bobinas, la tubería por la que se desplaza el microrrobot y el raíl que permite el movimiento del vehículo a lo largo de la tubería (figura 7).

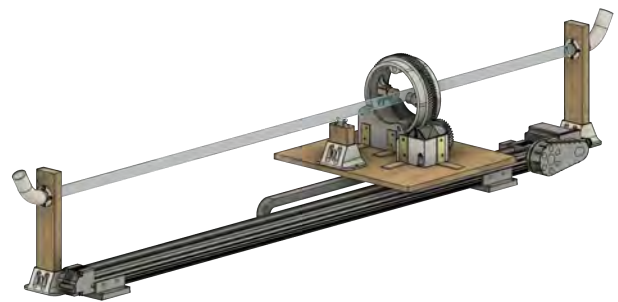


Figura 7: Diseño CAD del sistema completo

El primer elemento es el lugar donde se encuentran las bobinas y su sistema de giro. Está formado por un engranaje grande, donde se encuentran las bobinas, un soporte con rodamientos que permite el giro controlado y un engranaje más pequeño que posibilita la transmisión de la rotación desde el sistema de bobinas. El engranaje de mayor tamaño es un engranaje de espiga de 148,66 mm de diámetro, un módulo de 1,6 mm y 93 dientes. Por otro lado, el motor que proporciona el giro a la pieza de las bobinas es un motor paso a paso NEMA 17 que posee un engranaje pequeño y una carcasa que permite anclarlo a la plataforma. El engranaje de menor tamaño, situado en el eje del motor, es un engranaje en espiga. Tiene 57,42 mm de diámetro, un módulo de 1,6 y 36 dientes.

La tubería es el lugar por el que el microrrobot se introduce. Esta tubería de 1,5 m de largo, 18 mm de diámetro interior y plástico transparente se llena de agua para que los microrrobots se desplacen dentro de ella. Para sostener la tubería se colocan unos soportes de madera que la tubería atraviesa. Estos soportes permiten ajustar la tubería a distintas alturas y permiten que el agua dentro de ellas no se vierta. A una longitud determinada se coloca un anillo de deslizamiento que permite que los cables de las bobinas puedan girar libremente sin enrollarse en la tubería.

Por último, el raíl permite que el sistema de bobinas pueda desplazarse a lo largo de la tubería. Este raíl está formado por una plataforma deslizante y un motor paso a paso del sistema Dobot Magician que se controla mediante Python.

##### 4.2. Fabricación y montaje

La mayoría de las piezas se fabricaron mediante impresión 3D por FDM. Se escogió PETG como el material a utilizar de-

bido a que proporciona una mejor resistencia mecánica, poco desgaste y alta precisión dimensional. Un reducido número de piezas se fabricaron en madera, como son los soportes de la tubería y la base del sistema de actuación. Finalmente las escuadras que se utilizaron para anclar los soportes de las bobinas y el soporte del motor son de acero galvanizado. El sistema final montado se observa en la Figura 8



Figura 8: Montaje final

### 4.3. Electrónica

Todo el sistema electrónico de control de las bobinas y rotación se realiza a través de un Arduino Uno. El sistema de las dos bobinas se controla con un módulo L298N y el motor paso a paso con un driver A4988. (figura 9). El driver L298N es un controlador de motores que permite encender y controlar dos motores desde Arduino, en nuestro caso con este controlador se modula el voltaje que pasa a cada una de las bobinas de manera independiente. Este driver tiene una entrada de tensión que proporciona el voltaje a las bobinas, dos salidas A y B que se conectan a cada una de las bobinas y controlan la intensidad mediante una señal PWM, y seis pines de entrada que controlan la intensidad, modificando el sentido del campo magnético de la salida A y B respectivamente. El voltaje con el que se alimenta a la placa es de 12 V. El driver A4988 es un controlador de motor paso a paso integrado. Permite controlar el motor paso a paso bipolar. El A4988 se conecta al motor paso a paso y al Arduino. Se utilizaron 1/16 micropasos. Por su parte, el raíl se puede controlar mediante la aplicación DOBOT Studio utilizando los controles preprogramados o a través de Python. En nuestro caso, se utilizó la API propia de Python para controlar el raíl. Para poder observar el microrrobot se colocó una webcam conectada a un ordenador. Esta webcam permitirá realizar el seguimiento del microrrobot, y mediante segmentación

de imagen a través de Python realizar el control de las bobinas y raíl.

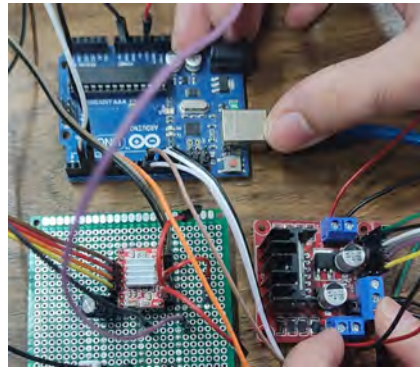


Figura 9: Imagen del cableado de los elementos electrónicos

## 5. Experimentos

Se realizaron diferentes experimentos con la pareja de bobinas. En el primero, se colocó una piscina con agua entre dos bobinas enfrentadas. Mediante una webcam colocada enfocando al microrrobot se realizó una segmentación de la imagen a través de Python con la que se podía conocer su posición. Utilizando este dato se hizo una realimentación de la posición a las bobinas. De este modo el microrrobot se pudo mantener realizando un movimiento oscilatorio. En la figura 10 se puede observar el setup del experimento, así como el desplazamiento total del microrrobot. El desplazamiento viene dado por la aplicación de un campo magnético alterno entre las dos bobinas. Este campo hace que la cabeza del microrrobot se gire hacia una u otra de las bobinas, dependiendo de cuál genere el campo, haciendo que el flagelo genere un movimiento oscilatorio. Con el movimiento generado por el flagelo se produce un desplazamiento neto del microrrobot.

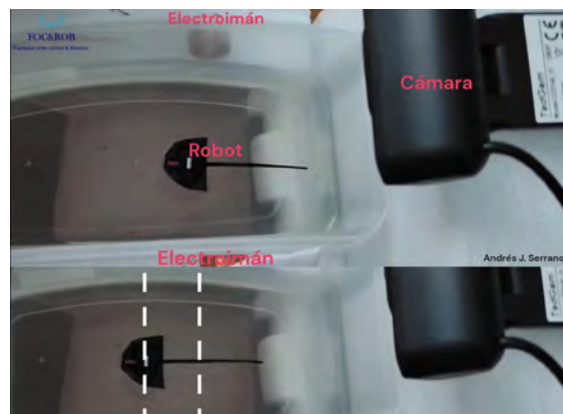


Figura 10: Secuencia de imágenes del experimento realizado con las dos bobinas y la cámara, donde se observa el desplazamiento neto del microrrobot (tiempo total 20 segundos)

Los experimentos realizados con la plataforma de pruebas diseñada y fabricada en la sección anterior, proporcionan un punto de partida en cuanto al desarrollo de microrrobots nadadores magnéticos y su ensayo.

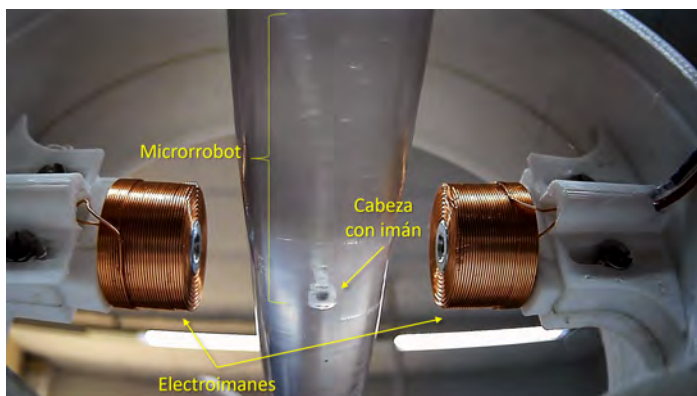


Figura 11: Detalle del sistema de bobinas activas con un microrrobot dentro en movimiento.

En el siguiente experimento se introdujo uno de los microrrobots en el interior de la tubería con agua, concretamente el que posee el imán en la cabeza. Se activaron de manera alterna las bobinas con el microrrobot dentro de la tubería a distintas frecuencias (figura 11). En la figura 12 se observan capturas en una de las frecuencias probadas para hacer mover al microrrobot. En este caso a 2 Hz se observa la forma de la onda del flagelo. Además se observa como se desplaza la cabeza hacia la bobina que en ese momento se está activando. En la figura 13, por el contrario, se puede observar uno de los experimentos realizados a una frecuencia mayor (20 Hz). En este experimento no se observa tan fácilmente la forma de la onda, ya que a mayor frecuencia la forma de la onda es menos acentuada debido a que la cabeza no tiene tanto tiempo para desplazarse de una a la otra bobina. Sí se puede observar cómo se produce un desplazamiento del microrrobot al completo por la tubería. Esto es debido al impulso que genera la cola al moverse generando una onda.

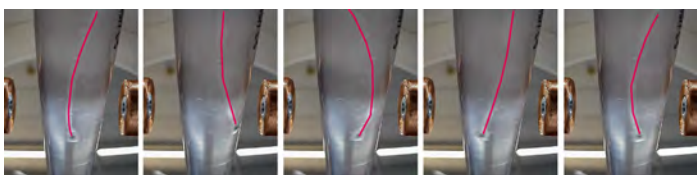


Figura 12: Secuencia de imágenes mostrando el movimiento del microrrobot con una frecuencia de activación de las bobinas de 2 Hz)

## 6. Conclusiones

En este trabajo se ha logrado fabricar microrrobots capaces de actuar eficazmente bajo campos magnéticos, utilizando inspiración biológica para optimizar su locomoción. Se ha utilizado simulación computacional como herramienta para modelar y evaluar el campo magnético y el movimiento de los microrrobots, lo que nos permite optimizar el diseño del sistema. Además, la plataforma experimental desarrollada nos proporciona un medio versátil para probar diferentes configuraciones de microrrobots, así como para la actuación magnética. A través de los experimentos, se ha podido observar el comportamiento de los microrrobots bajo diversas condiciones.

Para posibles mejoras en el futuro destacan varias. Explorar diferentes materiales y diseños para los microrrobots. Se podrían implementar simulaciones más complejas que incorporen físicas adicionales, como interacciones fluido-estructura y campos magnéticos más variados. Podrían añadirse distintos componentes electrónicos y sensores para mejorar el análisis y la detección de la navegación de los microrrobots. Por último, realizar pruebas en diferentes fluidos, como aceite de silicona permitiría evaluar en mayor medida la eficacia del sistema de actuación.

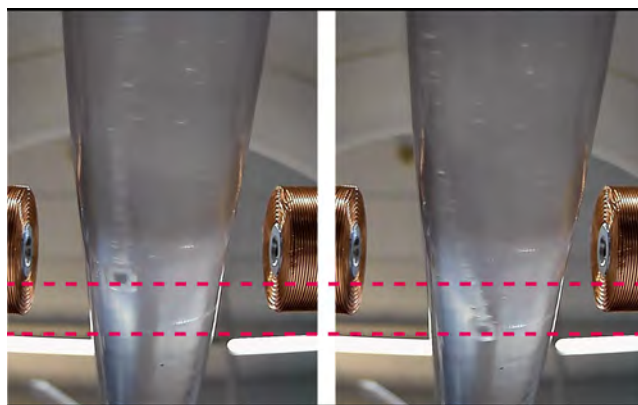


Figura 13: Secuencia de imágenes mostrando el movimiento del microrrobot con una frecuencia de activación de las bobinas de 20 Hz. La línea roja señala el inicio y el final del desplazamiento ( $t=1.5$  s)

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos PID2022-141409OBC22 y PID2019111278RB-C22, a través de MCI-N/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, EU

## Referencias

- Celi, N., Gong, D., Cai, J., 2021. Artificial flexible sperm-like nanorobot based on self-assembly and its bidirectional propulsion in precessing magnetic fields. *Scientific Reports* 11 (1), 1–11. DOI: 10.1038/s41598-021-00902-6
- Choi, H., Yi, J., Cho, S. H., Hahn, S. K., 2021. Multifunctional micro/nanomotors as an emerging platform for smart healthcare applications. *Biomaterials* 279 (March), 121201. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2021.121201
- Heo, S., Wiguna, T., Park, H. C., Goo, N. S., 2007. Effect of an Artificial Caudal Fin on the Performance of a Biomimetic Fish Robot Propelled by Piezoelectric Actuators. *Journal of Bionic Engineering* 4 (3), 151–158. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(07\)60027-4](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(07)60027-4)
- Li, J., Esteban-Fernández de Ávila, B., Gao, W., Zhang, L., Wang, J., mar 2017. Micro/nanorobots for biomedicine: Delivery, surgery, sensing, and detoxification. *Science Robotics* 2 (4), 1–10. DOI: 10.1126/scirobotics.aam6431
- Singh, A. V., Ansari, M. H. D., Mahajan, M., Srivastava, S., Kashyap, S., Dwivedi, P., Pandit, V., Katha, U., 2020. Sperm cell driven microrobots: Emerging opportunities and challenges for biologically inspired robotic design. *Micromachines* 11 (4). DOI: 10.3390/MI11040448
- Wang, T., Kim, D. G., Shi, Y., Hao, Z., Ansari, A., 2021. Bidirectional microscale rocker robots controlled via neutral position offset. *Journal of Micro-Bio Robotics* 17 (2), 103–114. DOI: 10.1007/s12213-022-00149-y
- Yang, J., Zhang, C., Wang, X. D., Wang, W. X., Xi, N., Liu, L. Q., 2019. Development of micro- and nanorobots: A review. *Science China Technological Sciences* 62 (1), 1–20. DOI: 10.1007/s11431-018-9339-8