

# DISEÑO DE ROBOTS NADADORES BIOMIMÉTICOS CON MOVIMIENTO DE ONDA PLANA

Traver Becerra, José Emilio

La microrrobótica es una disciplina de la ingeniería de diseño y fabricación de Microrobots. No hay una definición estandarizada que describa este término, pero en la literatura disponible se consideran microrobots aquellos cuyo tamaño es inferior al orden de los milímetros, dimensiones que ponen de manifiesto las fuerzas viscosas frente a las inerciales y, por tanto, las características necesarias en este tipo de robots (Nelson, Kaliakatsos y Abbott, 2010).

En los últimos años, el campo de la microrrobótica se ha visto impulsado por los logros conseguidos en la microtecnología, los avances tecnológicos y el aumento de la demanda de nuevos microsistemas para aplicaciones en medicina, biotecnología, microfabricación y microsensores, creando pequeños robots capaces de acceder a espacios inaccesibles hasta ahora. Sin embargo, el diseño de microsistemas implica numerosos desafíos en el campo de la ingeniería, tanto en el área física del análisis de las fuerzas implicadas en su movimiento, así como en el área de fabricación.

Aunque esta área de la robótica aún está en una fase muy temprana de su evolución, ya demuestra grandes capacidades en estudios biológicos o de ingeniería biomédica, microfluidos, nanofabricación y aplicaciones militares y médicas, principalmente para diagnóstico y tratamiento (Nelson *et al.*, 2010).

## 1. Entorno microscópico

El entorno microscópico se encuentra regido por las leyes físicas descritas por Newton. Sin embargo, cuando las estructuras comienzan a reducir su tamaño, siendo próximas al nivel molecular, nuevas teorías como la física cuántica adquieren relevancia para describir su dinámica y comportamiento. La suposición física de los medios continuos comienza a perder su validez y es necesario profundizar en su comportamiento y cómo las acciones externas les afectan.

La dimensión en el entorno microscópico caracteriza la propia dinámica de los Microrobots, ya que esta implica volúmenes de masa de pequeña magnitud que, de acuerdo a la tercera ley de Newton, conlleva que

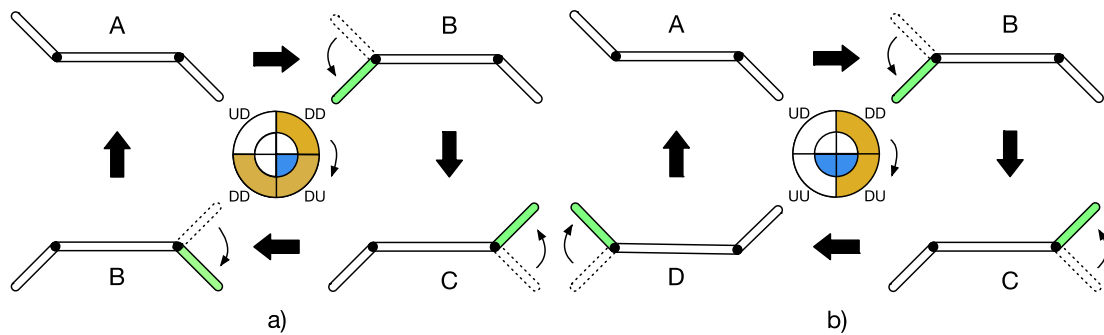
las fuerzas externas aplicadas sobre el objeto de estudio pueden llegar a considerarse despreciables frente al resto de fuerzas interactuantes. En contrapartida, las fuerzas viscosas, despreciables a nivel macroscópico, adquieren un papel protagonista y clave para el modelado y diseño de los microrrobots. La viscosidad determina la resistencia de un fluido a ser deformado bajo la acción de un esfuerzo tangencial. La principal consecuencia de encontrarse en un ambiente viscoso es la pérdida del comportamiento líquido para asumir las características propias de un sólido, aumentando así las fuerzas de rozamiento existentes en el desplazamiento. Este tipo de medios se caracterizan por un bajo número de Reynolds ( $Re$ ), un parámetro adimensional que manifiesta la relación de los efectos inerciales frente a los viscosos en un fluido (Happel, 1983; Purcell, 1977).

Los dominios con número de  $Re < 1$  son clasificados como entorno Stokes. Trabajar en el régimen de Stokes implica un flujo reversible, es decir, un flujo desarrollado con independencia de la velocidad y cuya evolución no depende del tiempo, sino de la trayectoria del movimiento, de su historia. Es decir, si realizamos un movimiento y acto seguido deshacemos este movimiento siguiendo los mismos pasos logramos volver a la posición de partida. Esto evidencia una necesidad de revisar las técnicas de movimiento desarrolladas para la robótica actual.

## **2. Métodos de propulsión**

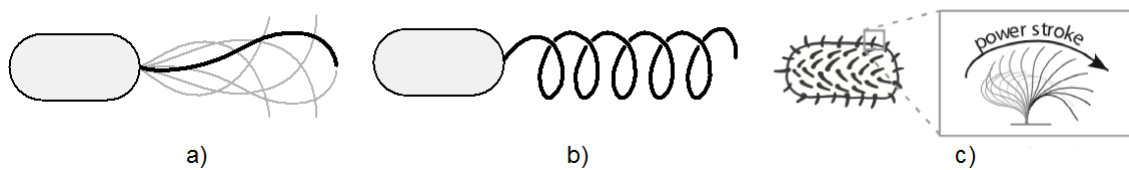
El desarrollo de la robótica en esta nueva área requiere el diseño de nuevas técnicas y métodos de propulsión que permitan alcanzar velocidades y desplazamientos óptimos en un régimen de Stokes.

Estudiando la cinemática, se pueden establecer dos tipos de movimiento: recíprocos y no recíprocos. Ambos casos pueden ser explicados analizando un microrrobot con dos aletas y un cuerpo central, representado en la Imagen 1. Un movimiento recíproco, o simétrico, se caracteriza por alcanzar una posición C a través de los estados A y B, y regresar a la posición inicial A mediante la misma secuencia de estados (BA) o movimientos anteriores. Por otro lado, un movimiento no recíproco se diferencia del anterior por realizar una trayectoria alternativa al regresar a la posición inicial, es decir, la secuencia de estados o movimientos (CA) es diferente respecto a la realizada desde A hasta C. El movimiento no-recíproco garantiza desplazamiento neto, ya que ningún estado contrarresta la acción del anterior (Purcell, 1977).



**Imagen 1.** Clasificación de movimientos: a) recíproco, b) no recíproco. Fuente: Elaboración propia.

Las formas de movimiento no-recíproco tienen su origen en las células eucariotas, procariontas y paramecium, las cuales describen un movimiento de onda plana y helicoidal, respectivamente. El primer tipo consiste en hacer avanzar una oscilación a lo largo de un medio continuo, como ilustra la Imagen 2a, mientras que el segundo se basa en la rotación de una hélice helicoidal (Imagen 2b), donde la geometría de la hélice puede ser debida a una estructura rígida o inducida por el movimiento a través de una estructura flexible y en cuanto al tercero es un movimiento de agarre y empuje a través de un elemento rígido en un sentido, pero flexible en el contrario (Imagen 2c).

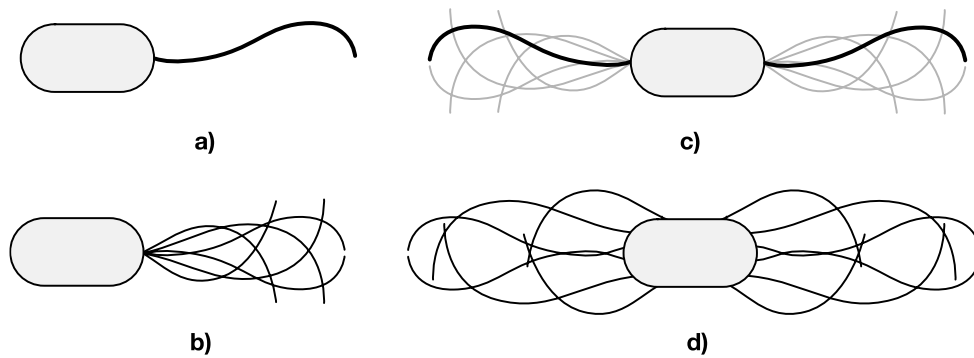


**Imagen 2.** Tipos de movimiento: a) onda plana, b) helicoidal. Fuente: Elaboración propia y Nelson *et al.* (2010)

### 3. Movimiento biomimético de onda plana

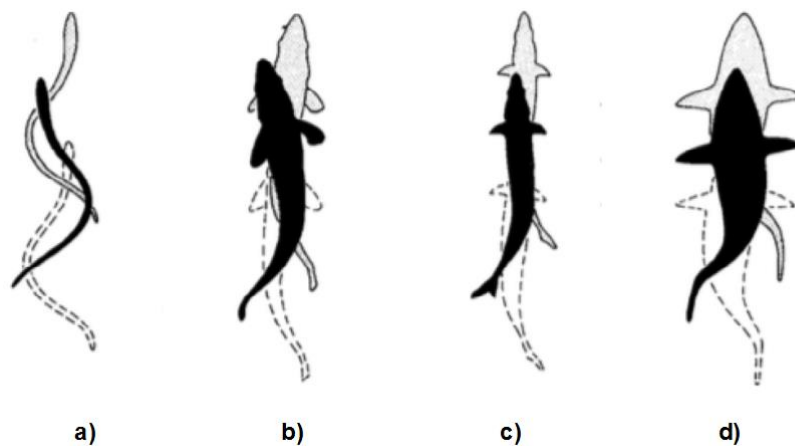
La relevancia del movimiento en entornos con régimen de Stokes ha promovido el estudio e investigación de cómo el tipo de movimiento y su forma benefician el mejor desplazamiento y control de los microrrobots. Los primeros estudios tomaron como base y referencias los ejemplos existentes en la naturaleza: las células. Atendiendo al número de flagelos empleados y su localización pueden clasificarse en cuatro tipos: Monotricas, lofotricas, anfitricas y peritrico. El primer tipo se clasifica por emplear un único flagelo, como ilustra la Imagen 3a. Las células lofotricas en cambio presentan dos o más flagelos situados en el mismo punto o zona de inserción (ver Imagen 3b). El tercer tipo engloba a las células cuyos flagelos se encuentran en zonas o puntos de inserción opuestos (ver Imagen 3c), con indiferencia de su número. En cuanto al

cuarto tipo son las células cuyos flagelos se encuentran repartidos por toda la superficie sin organización aparente (Imagen 3d).



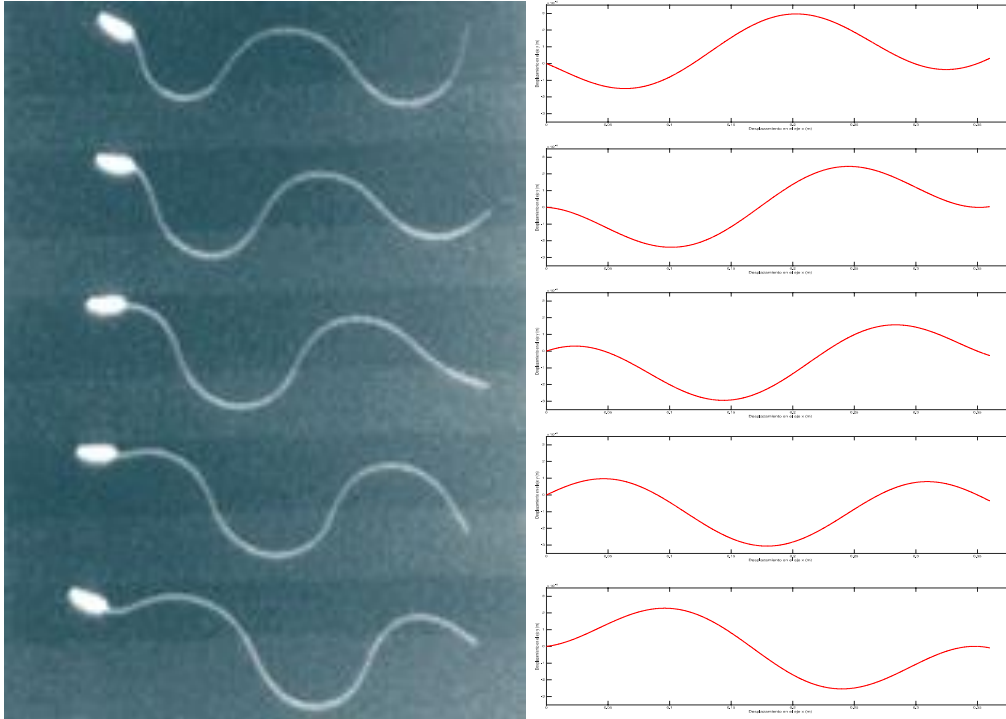
**Imagen 3.** Clasificación de las células según el número de flagelos y su localización: a) *Monotricas*, b) *lofotricas*, c) *anfitricas* y d) *peritricas*. Fuente: Elaboración propia.

No obstante, también es posible encontrar ejemplos en la naturaleza a escala macroscópica como es el caso de los peces, cuyo movimiento guarda ciertas similitudes con las células y concretamente aquellos cuyo movimiento es categorizado como “*body and caudal fin*”. Según su tamaño, la longitud de la cola y la proporción del cuerpo involucrado en el movimiento es posible distinguir cuatro tipos, los cuales se muestran en la Imagen 4: *anguiliform*, *subcarangiform*, *carangiform* y *thunniform*. Los peces englobados en la clasificación anguiliforme realizan una gran ondulación sinusoidal en la que se encuentra implicado todo el cuerpo, como es el caso de las anguilas (ver Imagen 4a). El movimiento con mayor similitud a las células es el *carangiform* cuya oscilación se limita a los dos últimos tercios del cuerpo.



**Imagen 4.** Movimiento a) *anguiliform*, b) *subcarangiform*, c) *Carangiform* y d) *Thunniform*. Fuente: Sfakiotakis, Lane y Davies (1999).

De acuerdo con la ictiología y los trabajos de Brokaw (2020), el movimiento realizado por ambos organismos puede ser descrito por la expresión de una onda armónica con restricciones de movimiento, como se observa en la Imagen 5 para el caso de una célula eucariota.



**Imagen 5.** Comparación del movimiento de onda armónica con el flagelo de un espermatozoide.

Fuente: Brokaw (2020).

El estudio y optimización de este movimiento ha sido objeto de números estudios (Traver, Vinagre y Tejado, 2016) y su implementación es abordada desde diferentes perspectivas: 1) a través de actuación distribuida, 2) actuación mediante dos puntos de excitación y 3) actuación en un único punto con absorción de vibraciones.

## REFERENCIAS

Brokaw, C. J. R. (2020). Caltech: the division of biology and biological engineering. California, EU. Recuperado de: <https://www.bbe.caltech.edu/people/charles-j-brokaw>

Happel, J. (1983). *Low Reynolds number hydrodynamics*. Boston, USA: Martinus Nijhoff Publishers.

Nelson, B. J., Kaliakatsos, I. K. y Abbott, J. J. (2010). Microrobots for minimally invasive medicine. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 12, 55-85.

Purcell, E. M. (1977). Life at low Reynolds number. *American Journal of Physics*, 45(1), 3-11.

Sfakiotakis, M., Lane, D. M. y Davies, J. B. C. (1999). Review of fish swimming modes for aquatic locomotion. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 24(2), 237-252.

Traver, J. E., Vinagre, B. M. y Tejado, I. (2016). New waveforms for propulsion of planar artificial bacterial flagella microrobots. *Libro de resúmenes de la VI reunión del Capítulo Español de la Sociedad Europea de Biomecánica* (pp. 78-79). Badajoz, España.

## **APUNTES BIOGRÁFICOS**

**José Emilio Traver Becerra** (Badajoz, 28 de abril de 1993) es Graduado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática y Máster Universitario en Ingeniería Biomédica por la Universidad de Extremadura. Actualmente reside en Talavera la Real y desarrolla su Tesis Doctoral en Badajoz dentro de la línea de investigación “Diseño de Microrobots Nadadores Biomiméticos tipo Flagelo Plano”, financiada por una beca FPU/16 del Ministerio de Educación.

Correo electrónico de contacto: **jetraverb@unex.es**