

# INTRODUCCIÓN AL MOVIMIENTO EN EL ROBOT NADADOR TIPO PURCELL DE TRES SEGMENTOS

Nuevo-Gallardo, Cristina

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. Aunque aún está en una fase muy temprana de su evolución, la robótica ya demuestra grandes capacidades y aplicaciones, principalmente para diagnóstico y tratamiento (Metzger y Adler, 2011).

No existe una definición estandarizada que describa el término de microrrobótica, pero se consideran microrrobots aquellos cuyo tamaño es inferior al orden de los milímetros, dimensiones que hacen necesario comprender la dinámica en el entorno microscópico donde predominan las fuerzas viscosas frente a las inerciales (Nelson, Kaliakatsos y Abbott, 2010).

En este contexto, Purcell definió el animal más sencillo que puede navegar en la escala microscópica, el cual en su honor ha sido denominado robot nadador Purcell de tres segmentos (Purcell, 1977). Está formado por un cuerpo central y dos segmentos enlazados a ambos lados del mismo, y su dinámica y movimiento serán analizados en este capítulo.

## 1. Entorno microscópico

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

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.

## 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, pero invertida (BA). 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 entre C y A (CDA) es diferente respecto a la realizada desde A hasta C (ABC). El movimiento no-recíproco garantiza desplazamiento neto, ya que ningún estado contrarresta la acción del anterior (Purcell, 1977).

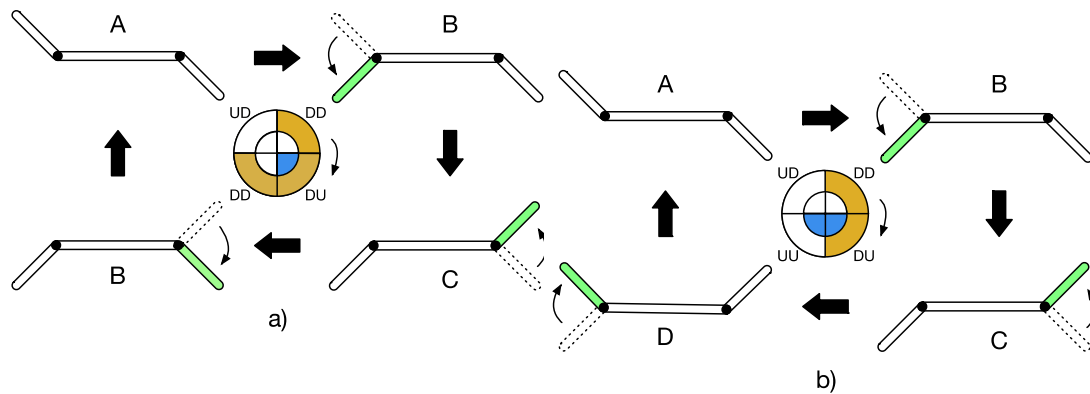
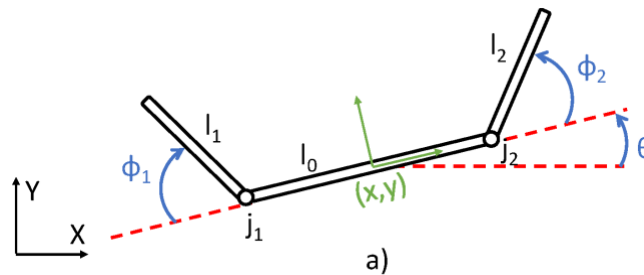


Imagen 1. Clasificación de movimientos: a) recíproco, b) no recíproco. Fuente: Elaboración propia.

## 3. Purcell de tres segmentos

El robot nadador tipo Purcell de tres segmentos está caracterizado por tres segmentos cilíndricos de radio  $a$  enlazados mediante uniones rotatorias de un grado de libertad. Un esquema del robot puede observarse en la Imagen 2, donde los segmentos se han denotado como  $l_i$  ( $i = 0,1,2$ ), siendo ésta su longitud. Las uniones se han indicado como  $j_1$  y  $j_2$ , y en ellas se encuentran los actuadores que aportan movimiento a los segmentos 1 y 2. Los ángulos  $\phi_1$  y  $\phi_2$  definen el movimiento de los segmentos laterales, mientras que  $\theta$  es

la posición angular del segmento central. Otros parámetros referentes al robot son su longitud total, que viene dada por  $l = \sum_{i=0}^2 l_i$ , y la relación entre las longitudes de los segmentos, siendo  $\eta = l_0/l$ .



**Imagen 2.** Purcell de 3 segmentos. Fuente: Elaboración propia.

### 3.1. Primitivas de movimiento

Como consecuencia de la reversibilidad del fluido en un entorno de bajo  $Re$ , es necesario desarrollar un movimiento no recíproco para obtener un desplazamiento neto. Aplicado al robot nadador tipo Purcell de tres segmentos, el desplazamiento se obtiene mediante la implementación de una primitiva de movimiento, esto es, aportar movimiento a los segmentos 1 y 2 definiendo los ángulos  $\phi_1$  y  $\phi_2$  respecto al sistema de referencia  $(x,y)$  mostrado en la Imagen 2.

Dos tipos de primitivas se muestran en el Gráfico 1. La primera de ellas (Gráfico 1a) define un movimiento consecutivo de los segmentos, esto es, un segmento se encuentra en movimiento mientras el otro está en reposo. En el segundo caso (Gráfico 1b), los dos segmentos se mueven de forma simultánea, consiguiendo un movimiento más eficiente. La marca circular representa el punto de inicio de cada primitiva.

### 3.2. Desplazamiento del robot

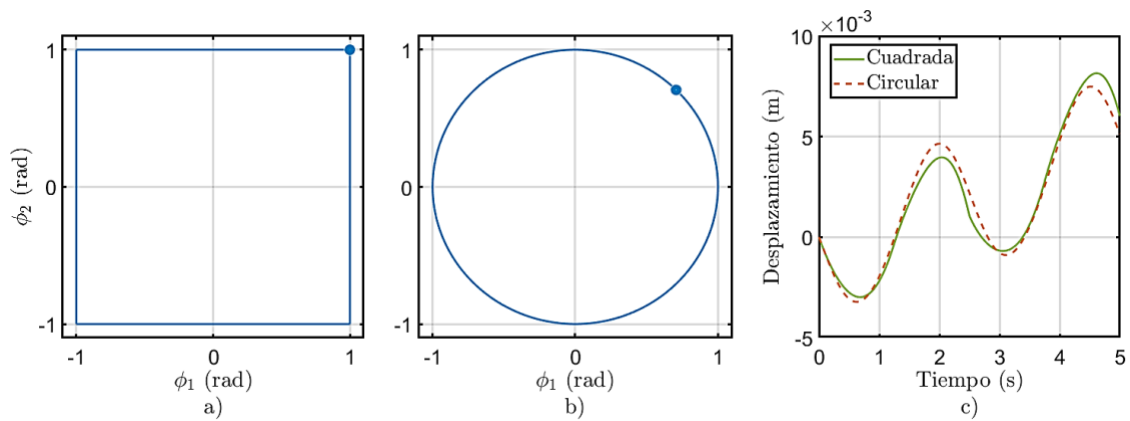
El desplazamiento del robot nadador puede ser estimado a partir de las ecuaciones que rigen la teoría de fuerza resistiva (RFT). La RFT estudia las fuerzas de arrastre que aparecen a partir del movimiento de un objeto en el seno de un fluido viscoso. Estas fuerzas dependen principalmente de la velocidad relativa del robot respecto al fluido y de los coeficientes de arrastre tangencial y longitudinal ( $c_t$  y  $c_n$ , respectivamente) (Cox, 1970; Gray, 1955).

Una vez realizado el análisis dinámico que puede ser consultado en Nuevo-Gallardo, Traver, Lòpez, Tejado y Vinagre (2020) y Wiezel y Yizhar (2016), se calcula la velocidad del segmento central del robot mediante la ecuación:

$$V = \frac{\sum_{i=0}^2 T_i^T R_i E_i}{\sum_{i=0}^2 T_i^T R_i T_i} \dot{\phi} \quad (1)$$

Donde  $V$  es la velocidad del segmento central,  $T_i$ ,  $R_i$  y  $E_i$  son matrices que dependen de cada segmento y vienen dadas en la referencia (Wiezel y Or, 2016), y  $\dot{\phi} = (\dot{\phi}_1 \ \dot{\phi}_2)^T$  es la velocidad angular del segmento central.

En el Gráfico 1c se muestra la comparativa del desplazamiento calculado para las primitivas cuadrada y circular mencionadas anteriormente, con los parámetros  $\eta = 1/3$ ;  $l = 0,2m$ ;  $a = 0,025m$ . Únicamente se ha calculado el desplazamiento en el eje  $X$  puesto que se ha comprobado que ambas primitivas aportan desplazamiento en este eje. Se puede extraer que, aplicando la primitiva cuadrada, se obtiene un mayor desplazamiento con el robot, aunque la diferencia entre ambas es poco significativa.



**Gráfico 1.** Primitivas y desplazamiento del Purcell de 3 segmentos: a) trayectoria cuadrada, b) trayectoria circular, c) desplazamiento del segmento central en el eje X respecto al tiempo. Fuente: Elaboración propia.

## 4. Conclusiones

En este trabajo se han introducido los principales inconvenientes de trabajar en el entorno microscópico, en el régimen de bajo número de Reynolds ( $Re$ ), así como se ha estudiado la dinámica de un robot nadador tipo Purcell de tres segmentos implementando dos primitivas de movimiento: cuadrada y circular. A partir de la teoría de fuerza resistiva (RFT) se ha obtenido la ecuación que rige el desplazamiento del robot en estas condiciones, y se han comparado ambas primitivas en cuanto al desplazamiento que aportan al robot.