

## Estudio experimental del nado ondulatorio en la interfase aire-agua

Lugar de trabajo: Laboratorio de Interacción Fluido-Estructura y Materiales Activados (LIFEMA).

INFINA & Departamento de Física FCEN - UBA.

Dirección: V. Raspa.

### ○ Introducción:

El nado ondulatorio es un mecanismo de locomoción compartido por un amplio rango de organismos vivos. Desde serpientes hasta peces de arena, desde anguilas y mantarrayas hasta espermatozoides o bacterias móviles, todos logran avanzar gracias a la propagación de una onda a lo largo de su cuerpo. En todos los casos la fuerza neta que genera el animal para desplazarse puede estimarse a partir del principio de acción y reacción. Básicamente, la fuerza aplicada por el fluido circundante sobre el cuerpo del animal en reacción al movimiento dentro de su seno, tiene dos componentes: una llamada resistiva (debido a la fricción local en la interfase fluido/sólido) y una reactiva (o inercial, proveniente del líquido desplazado en la dirección contraria al avance). De acuerdo al tamaño y forma del animal y a la naturaleza del fluido, la teoría que describe los mecanismos de nado se construye según prevalezcan los efectos viscosos sobre los inerciales o viceversa. Los nadadores de pequeña escala (i.e. espermatozoides) se ubican en el dominio de bajo número de Reynolds donde los efectos viscosos son dominantes. La teoría resistiva describe este régimen y está basada en la fricción local [1]. Por otro lado, la teoría de nadadores inerciales como los que se propone investigar en este proyecto está en el dominio de número de Reynolds intermedio a alto y fue formalizada por Lighthill [2,3] y Wu [4] proponiendo una teoría de flujo potencial y despreciando efectos viscosos. Este modelo simplificado se completa al considerar un término de arrastre cuadrático que incluye la disipación debido al movimiento lateral del cuerpo [5].

La cinemática del nado ondulatorio es impulsada por acciones musculares a lo largo del cuerpo, involucrando una coordinación espacio-temporal compleja de todas las acciones locales. Esta cinemática de nado puede ser reproducida artificialmente, de una manera más simple, usando pasivamente la elasticidad del cuerpo deformable. La presente propuesta focaliza su interés en nadadores ondulatorios, elásticos y autopropulsados, actuados magnéticamente sobre una superficie libre aire-agua [6]. Al abordar el problema de la interacción fluido-estructura para este tipo de nadadores artificiales, se observa que puede describirse adecuadamente acoplando la teoría de una viga actuada, con el modelo de flujo potencial de Lighthill [7]. La naturaleza propagativa de la onda elástica que produce la fuerza propulsora depende en gran medida de la disipación de energía a lo largo del cuerpo del nadador [8].

### ○ Objetivos Generales

El objetivo general de esta propuesta es el de investigar experimentalmente la física del nado ondulatorio inercial en la interfase aire-agua. Las investigaciones se llevarán adelante utilizando nadadores inerciales, del tipo anguiliforme, con cabeza magnética y cola elástica pasiva. Estudiaremos las características del nado en términos de las variables cinemáticas, la eficiencia mecánica y la generación de propulsión. Analizaremos los efectos que tienen sobre las variables de interés, tanto el confinamiento (morfología/estructura del recinto) como la profundidad del líquido donde se desarrolla el nado.

### ○ El nadador propuesto:

Los nadadores se componen de un cuerpo cilíndrico de diámetro uniforme (300 – 500  $\mu\text{m}$ ) fabricado en un material elástico adecuado (i.e.: elastómeros siliconados - VPS, PDMS -, látex) en cuyo extremo se fija un pequeño imán cilíndrico que constituye la cabeza. Dado el diámetro del nadador, la acción de fuerzas capilares garantiza la flotación del conjunto en la superficie libre de un tanque de agua. La actuación se realiza a través de la aplicación de un campo magnético variable pero espacialmente

uniforme generado por un par adecuado de bobinas de Helmholtz alimentadas con una señal alterna de amplitud y frecuencia variable. El campo activa la cabeza magnética del nadador produciendo un par magnético oscilante mientras el imán permanente intenta alinearse con el campo alterno. Las oscilaciones del imán generan una onda que se propaga hacia atrás a lo largo de la cola flexible, produciendo su propulsión en la dirección contraria. La Figura 1 (a-b) muestra esquemáticamente la configuración experimental propuesta y la geometría del nadador. En el panel (c) se presentan imágenes sucesivas del nadador durante un período de oscilación. El tiempo transcurre desde arriba hacia abajo. En la figura 1(c) se definen algunas de las variables que se utilizarán para la evaluación de la performance del nadador:  $U$  indica la velocidad de nado,  $v_\phi$  la velocidad de propagación de la onda a lo largo del cuerpo y las amplitudes  $A_f$  y  $A_r$  corresponden a las amplitudes máximas de oscilación de la cabeza y la cola respectivamente.

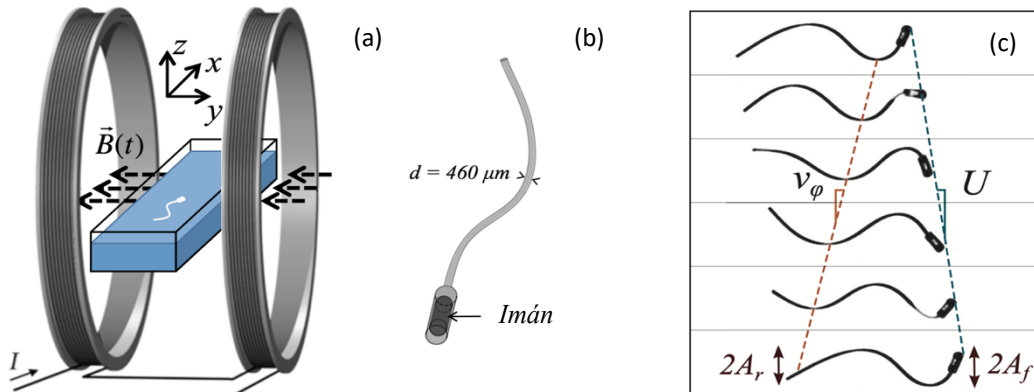


Figura 1: (a) configuración experimental propuesta. (b) Geometría del nadador. (c) El nado: imágenes sucesivas del nadador durante un período de oscilación. El tiempo transcurre desde arriba hacia abajo. Definición de las variables cinemáticas: velocidad de nado ( $U$ ), velocidad de propagación de la onda a lo largo del cuerpo ( $v_\phi$ ) y amplitudes máximas de oscilación de la cabeza y de la cola ( $A_f$  y  $A_r$ ).

## ○ Tareas Específicas

Las tareas específicas del proyecto involucran la puesta a punto y caracterización del sistema de actuación magnética y la implementación de un montaje experimental adecuado para el registro y procesamiento de imágenes del nadador en movimiento. También se requerirá trabajar sobre el diseño, fabricación y caracterización mecánica de las estructuras flexibles. Por último, deberán abordarse la concepción y confección de las geometrías confinantes usando materiales rígidos (uso de taller mecánico, sala de muestras e impresión 3D). Todas estas tareas estarán divididas en las dos etapas que componen la cursada de la siguiente forma:

### **Etapas iniciales**

En la primera etapa las tareas estarán centradas en la caracterización y puesta en marcha del sistema de actuación magnética, adquisición de imágenes y montaje general del experimento. Específicamente se pretenderá:

En el dominio de la **actuación magnética**:

- Diseñar y construir (usando software ad-hoc e impresión 3D) una estructura de montaje versátil para el conexionado y posicionamiento de las bobinas asegurando la configuración de Helmholtz. Debe garantizarse la estabilidad del conjunto, el control de la distancia entre ellas y su correcta alineación.

- Caracterizar las bobinas en función tanto de sus parámetros eléctricos concentrados (Resistencia, Inductancia, Capacidad) como constructivos.
- Calibrar el campo Magnético generado en la zona de interés, en función de la amplitud y frecuencia de la excitación armónica aplicada (uso de sonda Hall y/o magnetómetros arduino).

En lo vinculado al **registro y procesamiento de imágenes**:

- Adquirir/Registrar imágenes del nadador en movimiento, a partir de las cuales se estimarán experimentalmente las variables de interés. Esta tarea requiere el montaje del sistema de adquisición y control del registro de imagen (iluminación, uso de cámaras de video standard y/o rápidas).
- Determinar experimentalmente las variables cinemáticas (i.e.: trayectoria, velocidad de nado, velocidad y amplitud de la onda propagada) a partir de un análisis de imágenes adecuado que permita la detección de la cabeza y la reconstrucción de las deformaciones de la estructura flexible. Esto último, permitirá determinar la eficiencia hidromecánica de nado [2,3]. Finalmente, la inferencia de la fuerza efectiva de propulsión se realizará a partir del análisis de las trayectorias [9].

En cuanto al **nadador**:

- Fabricar las estructuras blandas (cola pasiva). Inicialmente se considerarán filamentos cilíndricos, de radio constante fabricados en diferentes materiales elastómeros siliconados. La fabricación se realiza por moldeado, usando tubos capilares de vidrio de distintas longitudes y diámetros. El material reticula a temperatura ambiente. No hay requerimientos de sala limpia.
- Caracterizar de las estructuras blandas (cola pasiva). Se hará en términos de la uniformidad del radio, la longitud y el modulo de flexión del filamento, a través del procesamiento de imágenes tomadas con una cámara digital directamente o a través de un microscopio (de acuerdo a los requerimientos del caso). La determinación del módulo elástico del material con el que esta fabricada la cola, completa la caracterización mecánica (ensayo de tracción).

## Segunda Fase

En esta segunda etapa se llevarán adelante las mediciones. Se espera:

- Medir las variables cinemáticas del problema, la fuerza efectiva de propulsión y la eficiencia hidromecánica del nado, en función de:
  - la elasticidad y geometría de la cola pasiva
  - la amplitud y frecuencia de la actuación magnética.
- Investigar el efecto que sobre las características de nado y la producción de propulsión tienen:
  - la profundidad del recinto de nado
  - la presencia de superficies confinantes.

### ○ Factibilidad

El proyecto propuesto se llevará adelante en el **Laboratorio de Interacción Fluido-Estructura y Materia Activada (LIFEMA)** del Departamento de Física, FCEN-UBA. Todos los insumos, materiales e instrumental necesarios para iniciar y llevar adelante las actividades de la presente propuesta están ya disponibles en nuestro laboratorio. Esta propuesta está financiada por el proyecto PIBAA 28720210100411CO.

Para la **fabricación de estructuras flexibles** disponemos de distintos polímeros blandos (i.e.: PDMS, PVS, siliconas) y capilares de distintos diámetros y longitudes, que permitirán construir nadadores con distinta respuesta elástica a la actuación. Respecto de la **actuación magnética**, disponemos de un par de Helmholtz en funcionamiento, con su fuente de alimentación (generador de funciones armónicas configurable y amplificador de corriente). Para la **adquisición de imágenes** disponemos de cámaras de video standard (Nikon D3500, D90 - FULL HD, 60 fps -) y ultra-rápidas (1 Mpx, 10 bits de profundidad de color, 1kHz de cadencia temporal); con óptica de alta definición con distancias focales que cubren el rango entre 18 y 200 mm. Contamos también con distintos paneles y aros LED que proveen correcta y estable iluminación. El análisis de imágenes y la realización de simulaciones se llevará adelante en las computadoras que ya están disponibles en el grupo.

Esta propuesta se beneficia del acceso al Taller de Prototipado, Mecanizado de Precisión e Impresión 3D del DF-UBA. Este recurso es muy valioso para las **tareas de configuración y optimización del montaje**, a la vez que pone a los estudiantes en contacto con herramientas de diseño 3D y CAD. Además de acceso a la sala de fabricación de muestras y caracterización material del DF-UBA, donde las estructuras flexibles podrán ser elaboradas, caracterizadas y testeadas.

## Referencias

- [1] G. I. TAYLOR. Analysis of the Swimming of Long and Narrow Animals. Proc. Roy. Soc. London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 214(1117):158–183, 1952.
- [2] LIGHTHILL M J. Note on the swimming of slender fish. J. Fluid Mech., 1960.
- [3] LIGHTHILL M J. Aquatic animal propulsion of high hydromechanical efficiency. J. Fluid Mech., 1970.
- [4] T. Y. WU. Swimming of a waving plate. J. Fluid Mech., 1961.
- [5] PIÑEIRUA M, GODOY-DIANA R, AND THIRIA B. Resistive thrust production can be as crucial as added mass mechanisms for inertial undulatory swimmers. Phys. Rev. E, 2015.
- [6] S. RAMANANARIVO, B. THIRIA, AND R. GODOY-DIANA. Elastic swimmer on a free surface. Phys. Fluids, 26(9):091112, 2014.
- [7] S RAMANANARIVO, R GODOY-DIANA, AND B THIRIA. Passive elastic mechanism to mimic fish-muscle action in anguilliform swimming. J. Roy. Soc. Interface, 10(88):20130667–20130667, 2013.
- [8] S RAMANANARIVO, R GODOY-DIANA, AND B THIRIA. Propagating waves in bounded elastic media: Transition from standing waves to anguilliform kinematics. *EPL (Europhysics Letters)*, 105:1–5, 2014.
- [9] V.RASPA, R GODOY-DIANA, AND B THIRIA. Topology-induced effect in biomimetic propulsive wakes. *J.FluidMech.*, vol. 729, 2013.