

ESTIMACIÓN DE LAS PRESTACIONES DE UN PROPULSOR ONDULATORIO MARINO MEDIANTE CFD Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL

Carlos Gervasio Rodríguez

M^a Isabel Lamas

Primitivo B. González

Juan de Dios Rodríguez

Manuel Vicente Fernández

Grupo Investigación Innovacións Mariñas (Universidade A Coruña)

Abstract

The study of undulating motion of a body in a liquid is an interesting and challenging research subject in the field of engineering. For designers, the practical implementation of propulsion mechanisms in a fluid medium based on rotation has been easy to deal with because of the state of the art in its time, and this has meant that it has not been more interest in the deep developing undulating mechanisms, which are the majority in nature.

In this paper, a Computational Fluid Dynamics (CFD) model was done to investigate the fluid flow around an undulating marine propeller when moving in water. This CFD approach yields a dataset that allows a detailed investigation of the fluid mechanics. The main objectives of this study were: to quantify the thrust and drag forces acting on the foil, to study the variation of the thrust with the frequency of oscillation and to compare calculated results with experimental ones.

Keywords: *marine propeller; undulating propulsion; CFD*

Resumen

El estudio del movimiento ondulatorio de un cuerpo en un líquido es un tema de investigación interesante y un desafío en el campo de la ingeniería. Para los diseñadores, la ejecución práctica de mecanismos de propulsión en un medio fluido basados en la rotación ha sido más fácil de abordar debido al estado de la técnica en su momento, y ello ha motivado que no haya tenido más interés el profundizar en el desarrollo de mecanismos ondulatorios, a pesar de ser la mayoría de los que se observan en la naturaleza.

En el presente trabajo se ha desarrollado un propulsor marino basado en una aleta ondulatoria y se ha elaborado un modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para investigar el movimiento del fluido cuando se mueve en el agua. Este modelo de CFD ha aportado un conjunto de datos que ha permitido realizar una investigación detallada de la mecánica de fluidos asociada al propulsor ondulante marino. Los principales objetivos de este estudio fueron: cuantificar las fuerzas de empuje y resistencia al avance que actúan sobre la aleta, estudiar la variación del empuje con la frecuencia y comparar los resultados calculados con los experimentales.

Palabras clave: *propulsor marino; propulsión ondulatoria; CFD*

1. Introducción

Actualmente el continuo desarrollo de la ingeniería ha dado lugar a que aparezcan nuevos tipos mecanismos y máquinas, entre los que destacan los llamados biológicos. La ingeniería biológica es un campo emergente que se basa en los principios de los organismos vivos de la naturaleza, mucho más eficaces por ser el resultado de millones de años de progresión evolutiva. En cuanto a la propulsión naval, la ingeniería biológica se aplica al movimiento ondulatorio basado en el modo de nadar de los peces, el cual resulta mucho más eficaz que el clásico movimiento rotativo utilizado en las hélices de los barcos.

Hasta hace pocos años, el funcionamiento de los mecanismos de propulsión basados en el movimiento de los peces se entendía difícilmente porque se carecía de las herramientas adecuadas para su estudio. No obstante, un avance que ha ayudado a entender la hidrodinámica de la propulsión biológica ha sido la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). En lo referente a la propulsión ondulatoria, empezó a aplicarse para el estudio del movimiento de los peces, destacando por ejemplo publicaciones como las de Borazjani y Sotiropoulos (2006), quienes analizaron numéricamente la hidrodinámica de natación de los peces carangiformes y posteriormente (2009) compararon esos resultados con los de la natación de peces anguiliformes.

Carling, Williams y Botwell (1998) también siguieron el modelo de propulsor ondulatorio anguiliforme utilizando una geometría simplificada de dos dimensiones. Algunos años más tarde, Kern y Koumoutsakos (2006) realizaron un modelo de simulación en tres dimensiones y compararon sus resultados con los de Carling y colaboradores.

Fauci (1996) aplicó el método "*immersed boundary*" para estudiar los organismos de flotación neutra y posteriormente Dillon y Fauci (2000) mejoraron este modelo para incluir las interacciones de músculo interno con el fluido exterior.

Liu, Wassersug y Kawachi (1996) analizaron la propulsión de los renacuajos utilizando un modelo numérico de dos dimensiones y posteriormente (1997), (1999) modelos tridimensionales, analizando las diferencias entre ellos.

Tian-jinag, Lin-cheng y Pei-ling (2006) estudiaron numéricamente el movimiento de la "*Gymnauchus niloticus*", basado en las ondulaciones de una larga aleta dorsal con la ayuda de dos aletas pectorales.

Adquins y Yan (2006) desarrollaron un modelo CFD turbulento para analizar el movimiento de una aleta de pez en tres dimensiones.

Lewin y Haj-Hariri (2003) estudiaron numéricamente el flujo bidimensional alrededor de un "*airfoil*" senoidal en un rango de frecuencias y amplitudes.

En cuanto a aplicaciones más tecnológicas, Cherukat et al. (1998) y Shen, Zhang y Yue (2003) estudiaron el flujo turbulento tridimensional originado por una pared ondulante Y Bozkurtass et al. (2008) desarrollaron un propulsor para un vehículo submarino autónomo basado en el diseño mecánico y el rendimiento de la aleta pectoral del pez luna, basado en un modelo numérico en tres dimensiones.

En el presente trabajo se ha desarrollado un modelo bidimensional de CFD para analizar el flujo turbulento producido por un propulsor marino ondulatorio. Se trata de una continuación del trabajo de González et al. (2010), en el que se analizó el flujo en régimen laminar a bajas frecuencias de giro. El trabajo está estructurado de la siguiente manera: en primer lugar, se presentan los detalles del modelo y se describe su cinemática; en segundo lugar, se explica brevemente el método numérico utilizado; en tercer lugar, se comentan las fuerzas hidrodinámicas y demás aspectos y se comparan con resultados experimentales y finalmente se presentan las conclusiones y las áreas de investigación futuras.

Nomenclatura

L	[m]	Longitud de aleta
t	[s]	Tiempo
F	[N]	Fuerza
A	[m ²]	Área
n	[]	Vector unitario normal
u	[m/s]	Velocidad en el eje x
v	[m/s]	Velocidad en el eje y
T	[s]	Periodo
p	[Pa]	Presión
g	[s]	Gravedad
k	[m ² /s ²]	Energía cinética turbulenta
ε	[m ² /s ²]	Disipación de energía cinética turbulenta

Caracteres especiales

τ	[N/m ²]	Tensor de tensiones viscosas
ρ	[kg/m ³]	Densidad
ν	[m ² /s]	Viscosidad cinemática
μ	[Pa-s]	Viscosidad dinámica

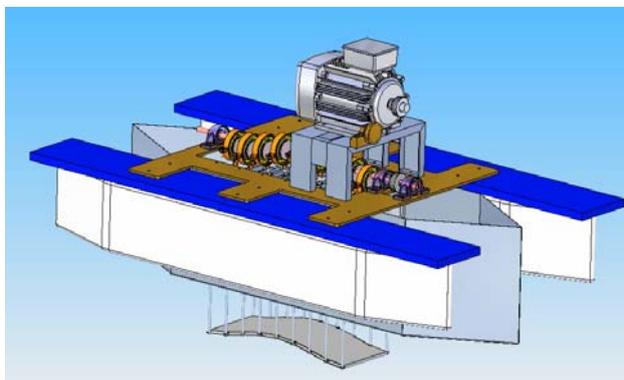
Subíndices

i	Dirección eje x
j	Dirección eje y
p	Presión
v	Viscosidad
t	Turbulento

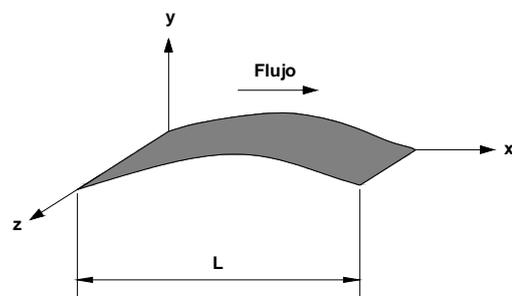
2. Descripción del Problema

El Grupo de Investigación "Innovación Mariñas" (Universidade da Coruña - España) desarrolló y patentó el propulsor ondulatorio que se muestra en la Figura 1a. En la parte inferior de la misma se muestra la aleta propulsora ondulatoria, de 0.52 m de longitud de onda, 0.2 m de ancho y 0.02 m de amplitud. En la Figura 1b se muestra la dirección del flujo que sigue el agua al verse afectada por el movimiento ondulatorio de dicha aleta. La fuente propulsora es un motor eléctrico, que se puede ver en la parte superior de la Figura 1a, el cual transmite la potencia a la aleta mediante un mecanismo de conversión de movimiento basado en excéntricas. Se dispone también de un variador de frecuencia para ajustar la frecuencia de oscilación de la aleta.

Figura 1. (a) Prototipo Experimental. (b) Detalle de la Aleta



(a)



(b)

Una de las ventajas que caracteriza a este sistema es que es reversible, teniendo la misma eficacia de funcionamiento marcha adelante o atrás. Esta característica lo hace ideal para vehículos marinos que requieren alta maniobrabilidad.

3. Modelo Numérico

Para el diseño de este prototipo experimental se llevó a cabo previamente un análisis mediante CFD, el cual proporcionó los parámetros óptimos de diseño en cuanto a dimensiones, amplitud, frecuencia de oscilación, etc. Los detalles del modelo numérico se muestran a continuación.

3.1 Hipótesis de Trabajo

Con el fin de simplificar el modelo CFD, las siguientes hipótesis fueron realizadas:

- Flujo newtoniano e incompresible.
- Modelo bidimensional.
- Propiedades constantes de agua a 25°C.

3.2 Ecuaciones Gobernantes

El movimiento del fluido es regido por la ecuación de conservación de masa y la de conservación de cantidad de movimiento, ecuaciones de Navier-Stokes. El flujo turbulento se caracteriza por campos de velocidades fluctuantes que se producen en una escala tan pequeña que su simulación requeriría muchísimo coste computacional para los ordenadores actuales. Por este motivo, en lugar de resolverse las ecuaciones exactas de Navier-Stokes, para la mayoría de aplicaciones en ingeniería lo que se hace es descomponer las magnitudes en una componente promedio y una fluctuante, resultando un conjunto de ecuaciones modificadas que requieren un coste computacional menor. Éstas se conocen como RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes), que en forma cartesiana vienen dadas por las ecuaciones (1) y (2).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (2)$$

Donde x_i , x_j , u_i y u_j representan las coordenadas cartesianas x e y , y las velocidades a lo largo de los ejes x e y respectivamente. Estas ecuaciones RANS tienen la misma forma que las de Navier-Stokes exactas, diferenciándose en que las velocidades u_i , u_j , densidad ρ , viscosidad μ y otras variables representan los valores promedio. El término adicional que representa el efecto de turbulencia es $-\rho \overline{u_i u_j}$.

Un abordaje muy empleado es utilizar la hipótesis de Boussinesq, la cual relaciona las tensiones de Reynolds con los gradientes de velocidad mediante la ecuación (3).

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3)$$

siendo δ_{ij} la delta de Kronecker ($\delta_{ij}=1$ si $i=j$ y $\delta_{ij}=0$ si $i \neq j$) que se incluye para hacer la fórmula aplicable a las tensiones normales de Reynolds para $i=j$ (Versteeg y Malalasekera, 2007).

El término μ_t de la ecuación (3) es la viscosidad turbulenta, la cual se ha determinado mediante el modelo k- ϵ . El k- ϵ estándar es un modelo semi-empírico que añade dos ecuaciones de transporte adicionales, una de ellas para calcular la energía cinética turbulenta, k, y la otra para calcular su disipación, ϵ , ecuaciones (4) y (5) respectivamente.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_k}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_k}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

En las ecuaciones anteriores, G_k representa la generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes medios de velocidad y viene dada por la ecuación (6):

$$G_k = -\rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (6)$$

La viscosidad turbulenta, μ_t , se calcula combinando k y ϵ según la ecuación (7):

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

C_μ , $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, σ_k y σ_ϵ son constantes cuyo valor en este trabajo se ha tomado como el valor estándar por defecto, $C_\mu = 0.09$; $C_{1\epsilon} = 1.44$; $C_{2\epsilon} = 1.92$; $\sigma_k = 1.0$ y $\sigma_\epsilon = 1.3$.

A pesar de que ningún modelo de turbulencia es perfecto, el k- ϵ tiene la ventaja de ser robusto, computacionalmente económico y lo suficientemente preciso para un amplio rango de flujos turbulentos, siendo ampliamente utilizado en aplicaciones prácticas de la ingeniería. Por este motivo, se ha elegido este modelo en el presenta trabajo.

3.3 Condiciones de Contorno

En cuanto a las condiciones de contorno, se ha considerado la pared derecha como entrada y la pared izquierda como salida. En cuanto a las paredes superior e inferior, se ha impuesto deslizamiento con el fin de modelar lo más parecido a un medio infinito y finalmente en la aleta se ha impuesto no deslizamiento.

3.4 Cálculo de las Fuerzas Hidrodinámicas

A medida que la aleta realiza su movimiento ondulatorio sumergida en el agua, se produce una fuerza en las direcciones x e y. Las componentes de la fuerza que actúan sobre el cuerpo, F_i y F_j , pueden ser evaluadas mediante la integración de la proyección de la presión y el esfuerzo cortante en la direcciones x e y respectivamente. La componente de empuje total a lo largo del eje x se calcula sumando la componente de presión y de fuerzas viscosas, ecuación (8):

$$F_i = F_{pi} + F_{vi} \quad (8)$$

donde F_{pi} es la fuerza de presión en el eje x y F_{vi} es la fuerza viscosa en el eje x.

La fuerza de presión a lo largo del eje x viene dada por:

$$F_{pi} = - \int_A p n_i dA \quad (9)$$

donde n_i es la componente en x del vector unidad normal en dA

La fuerza viscosa a lo largo del eje x viene dada por:

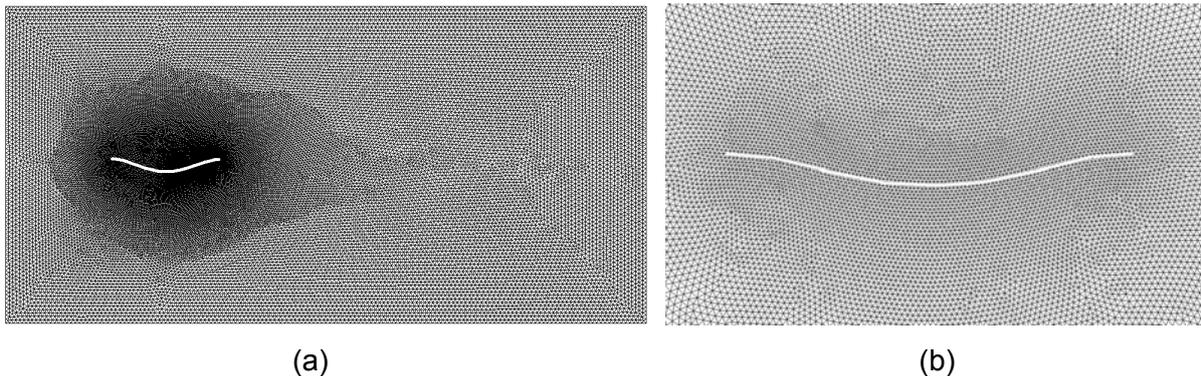
$$F_{vi} = \int_A \tau_{ij} n_j dA \quad (10)$$

Siendo τ_{ij} es el tensor de tensión viscosa.

3.5 Malla Computacional

Para simular el movimiento fue necesario acudir al empleo de una malla dinámica. El dominio de cálculo fue de $3L$ altura y $5L$ longitud, siendo L la longitud de la aleta. Como puede verse en la Figura 2, los elementos fueron triangulares y se refinó el tamaño de la malla en la zona cercana a la aleta. La malla fue creada íntegramente con el programa Gambit 2.4.

Figura 2. (a) Malla Computacional (b) Detalle de la Zona cercana a la Aleta



3.6 Parámetros de cálculo

Para resolver las ecuaciones gobernantes se acudió al software comercial Ansys Fluent 6.3, el cual se basa en el método de volúmenes finitos (FVM).

En cuanto al acoplamiento entre presión-velocidad, se empleó el algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations).

Se utilizó un esquema de primer orden debido a que suele dar mejor resultado para simulaciones con mallas dinámicas. En cuanto a derivadas temporales se acudió a un método implícito.

En cuanto al paso de tiempo, se dividió el periodo T en 100 partes, es decir, el paso de tiempo se ha tomado como $\Delta t = T/100$. Tanto la elección de la malla como del paso de tiempo se verificó estimando la sensibilidad de las simulaciones ante variaciones de los mismos de modo que incrementos de tamaño de malla y de paso de tiempo no varían los resultados.

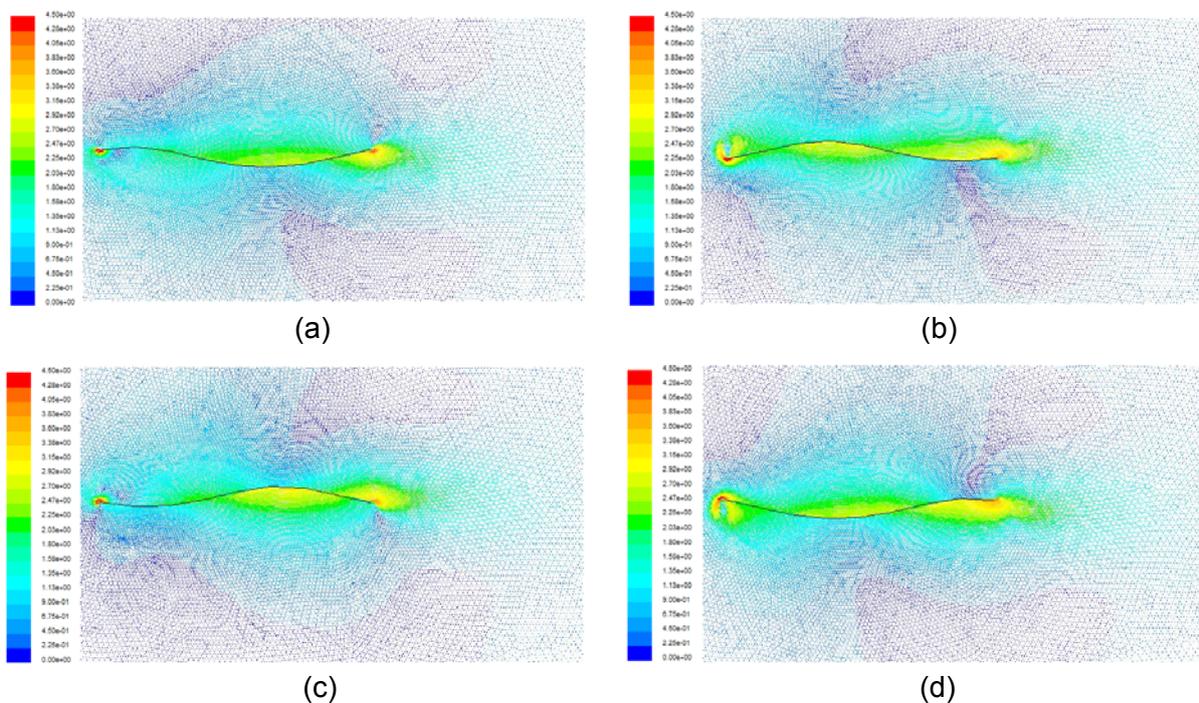
5. Resultados

En lo que sigue se mostrarán los resultados correspondientes al estado estacionario. Con el fin de alcanzar el mismo ha sido necesario considerar un tiempo lo suficientemente largo para que los resultados prácticamente no varien de un ciclo a otro. Para los casos estudiados se verificó que cuando la aleta dio 20 ciclos prácticamente se alcanza dicho estado. No obstante, en este trabajo los resultados presentados se corresponden con el ciclo 30.

5.1 Campo de Velocidades

El campo de velocidades para una frecuencia de 1000 r.p.m. se muestra en la Figura 3. Se han tomado cuatro instantes del ciclo. Más adelante se comentará que se corresponden a cuando se produce el empuje mínimo, Figuras 3a y 3c y empuje máximo, Figuras 3b y 3d.

Figura 3. Campo de Velocidades [m/s] a 1000 r.p.m. para (a) $0.1t/T$ (b) $0.35t/T$ (c) $0.65 t/T$ (d) $0.9t/T$



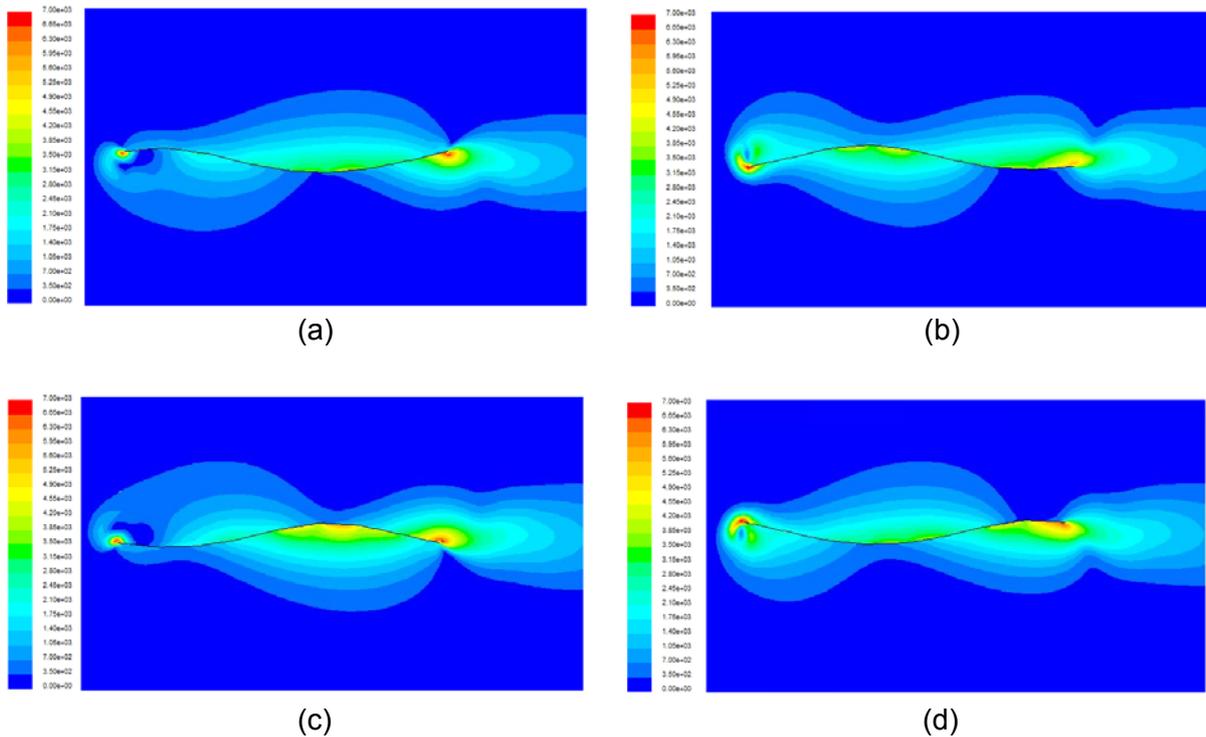
En la Figura 3, se puede observar la formación de un fuerte chorro en la parte derecha de la aleta. Este flujo es el origen del empuje, ya que crea una fuerza que tiende a mover la aleta de derecha a la izquierda. A medida que el chorro se aleja de la aleta su intensidad se reduce hasta un valor prácticamente nulo debido a la disipación viscosa.

En las figuras anteriores también se puede apreciar la formación de otro pequeño chorro en el lado izquierdo de la aleta. Este chorro produce una fuerza que tiende a mover la aleta en la dirección opuesta al anterior reduciendo la eficiencia. Sin embargo, en todas las simulaciones realizadas se verificó que esta fuerza residual es mucho menor que la primaria, por lo que puede ser prácticamente despreciada.

5.2 Campo de Presiones

En la Figura 4 se muestra la distribución de la presión dinámica a 1000 r.p.m. Esta secuencia de imágenes se corresponde con el campo de velocidades mostrado en la Figura 3. Comparando ambas figuras se observa como la dirección de la velocidad se produce desde donde la presión es mayor hacia donde la presión es menor, como era de esperar. Asimismo, en el campo de presiones también se puede percibir el chorro originado en el lado derecha de la aleta, responsable del empuje generado.

Figura 4. Presión Dinámica [Pa] a 1000 r.p.m. para (a) 0.1t/T (b) 0.35t/T (c) 0.65 t/T (d) 0.9t/T

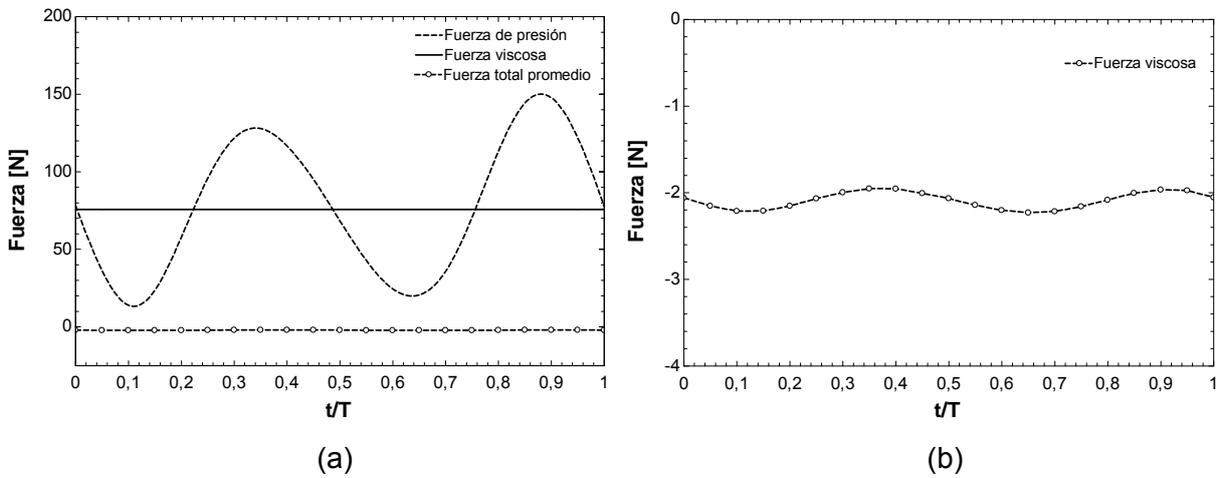


5.3 Fuerzas Hidrodinámicas

Para cuantificar el empuje instantáneo durante un ciclo del propulsor ondulatorio se creó la Figura 5. Esta figura representa la evolución temporal durante un ciclo completo de los valores instantáneos de la fuerza de presión y la fuerza viscosa. Debido a que la fuerza viscosa es prácticamente cero, la fuerza total casi es igual a la fuerza de presión. Por esta razón, sólo la fuerza de presión instantánea fue representada en la Figura 5a, y la fuerza total instantánea fue omitida. La fuerza viscosa es representada en la Figura 5b, con otra escala para que pueda ser apreciada con mayor claridad.

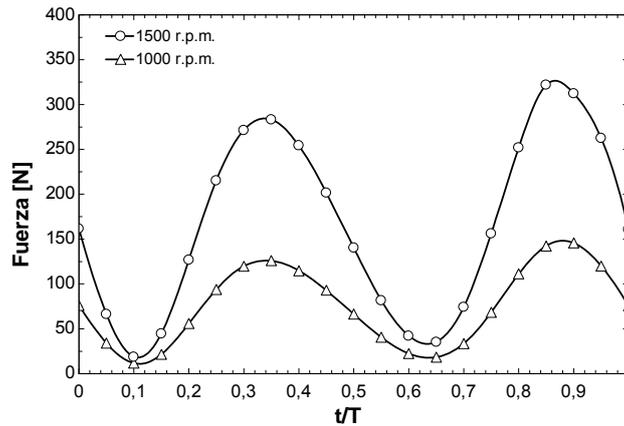
Como ya se ha comentado anteriormente, se puede observar en la Figura 5a que el valor instantáneo de la fuerza de presión alcanza su valor máximo dos veces en cada ciclo debido al movimiento ondulante simétrico. El empuje mínimo tiene lugar en los instantes en que los extremos de la aleta están próximos a amplitud cero, 0.1t/T y 0.65t/T, correspondientes a las Figuras 3a, 3c, 4a, 4c. En cuanto al empuje máximo, tiene lugar en el momento que los extremos de la aleta están próximos a la máxima amplitud, 0.35t/T y 0.9t/T, correspondientes a las Figuras 3b, 3d, 4b, 4d.

Figura 5. (a) Evolución Temporal de la Fuerza Total, Fuerza de Presión y Fuerza Viscosa a 1000 r.p.m. (b) Detalle de la Fuerza Viscosa

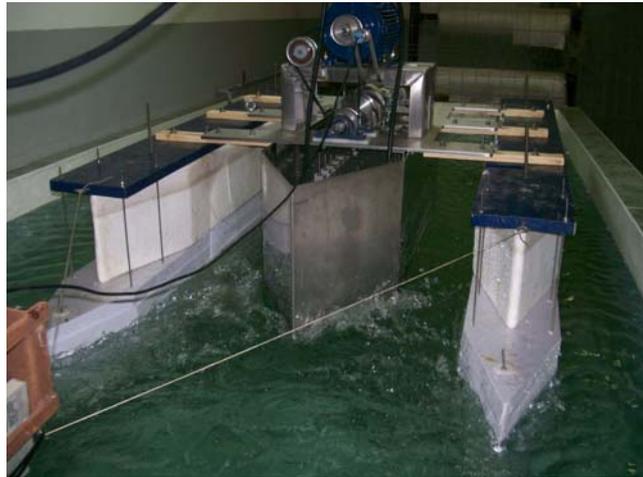


En el presente trabajo también se ha estudiado cómo se ve afectado el empuje si varía la frecuencia de oscilación del motor eléctrico. Como era de esperar, el empuje aumenta cuando la frecuencia aumenta. Esto se muestra en la Figura 6, que representa la fuerza total instantánea para 1000 r.p.m. y 1500 r.p.m.

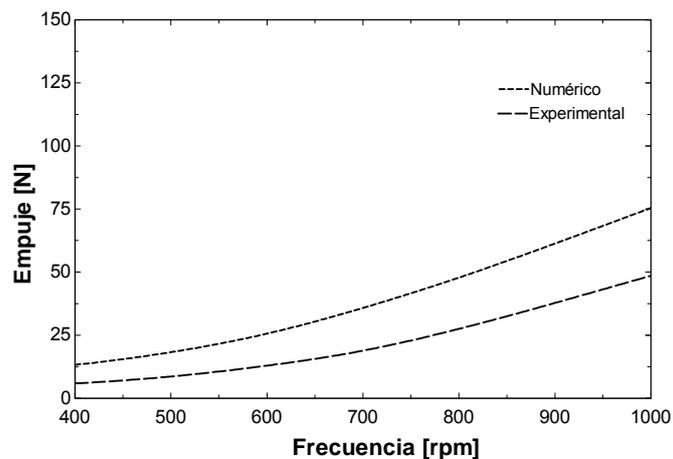
Figura 6. Evolución Temporal de la Fuerza Total para 1000 r.p.m. and 1500 r.p.m.



Con el fin de estudiar este fenómeno en detalle se hizo un estudio para frecuencias comprendidas entre 1000 y 1500 r.p.m. y se compararon los resultados obtenidos numérica y experimentalmente. Los resultados experimentales se basan en el método de "Tiro a Punto Fijo" similar a las pruebas realizadas en buques remolcadores. Éste consiste en amarrar el prototipo a un bolardo o noray por medio de un cable, Figura 7, y cuantificar la fuerza con la que tira del cable.

Figura 7. Prueba Experimental de “Tiro a Punto Fijo”

Los resultados obtenidos numérica y experimentalmente del empuje se representan en la Figura 8.

Figura 8. Fuerza Promedio frente a la Frecuencia. Resultados Numéricos y Experimentales.

A partir de la Figura 8 se puede apreciar que el empuje varía parabólicamente con la frecuencia. Los valores obtenidos numéricamente son mayores que los experimentales porque el modelo CFD ha sido bidimensional, despreciando las pérdidas laterales. En las pruebas experimentales se ha observado que existen pérdidas de flujo en el eje z, no modeladas en el código CFD debido a que una simulación de este tipo en tres dimensiones requeriría de muchísimo coste computacional.

5. Conclusiones

Este trabajo propone un modelo CFD para simular un propulsor marino ondulante. Se ha empleado una malla dinámica para resolver el movimiento y se han calculado las fuerzas de presión, viscosidad y totales. Los resultados obtenidos muestran que el mayor empuje se produce en el momento en que los extremos de la aleta están en posición correspondiente a

amplitud cero y el empuje menor se produce cuando los extremos de la aleta están próximos a su máxima amplitud.

Con el presente estudio se confirma que el CFD es una herramienta muy eficaz a la hora de resolver problemas de bio-locomoción, aportando un avance muy importante en el conocimiento en este tipo de propulsores. No obstante, un problema que deja por resolver el presente trabajo es un estudio más detallado de los efectos tridimensionales.

6. Referencias

- Adkins, D. & Yan, Y.Y. (2006). CFD simulation of fish-like body moving in viscous liquid. *Journal of Bionic Engineering*, 3, 147-153.
- Borazjani, I. & Sotiropoulos, F. (2008). Numerical investigation of the hydrodynamics of carnguiform in the transitional and inertial flow regimes. *The Journal of Experimental Biology*, 211, 1541-1558.
- Borazjani, I. & Sotiropoulos, F. (2009). Numerical investigation of the hydrodynamics of an anguilliform swimming in the transitional and inertial flow regimes. *The Journal of Experimental Biology*, 212, 577-592.
- Bozkurttas, M., Tangorra, J., Lauder, G. & Mittal, R. (2008). Understanding the hydrodynamics of swimming: from fish fins to flexible propulsors for autonomous underwater vehicles. *Advances in Science and Technology*, 58, 193-202.
- Carling, J., Williams, T.L. & Bowtell, G. (1998). Self-propelled anguilliform swimming: Simultaneous solution of the two-dimensional Navier-Stokes equations and Newton's laws of motion. *Journal of Experimental Biology*, 201, 3143-3166.
- Cherukat, P., Na, Y., Hanratty, T.J., McLaughlin, J.B. (1998). Direct numerical simulation of a fully developed turbulent flow over a wavy wall. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 11, 109-134.
- Dillon, R.H., & Fauci, L.J. (2000). An integrative model of internal axoneme mechanics and external fluid dynamics in ciliary beating. *Journal of Theoretical Biology*, 207, 415-430.
- Fauci, L.J. (1996). A computational model of the fluid dynamics of undulatory and flagellar swimming. *American Zoologist*, 36, 599-607.
- González P.B., Rodríguez J.D., Rodríguez C.G., Lamas M.I. (2010). Numerical modeling and experimental investigation of a biologically-inspired undulating marine propeller. *7th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*. Antalya – Turkey.
- Kern, S., & Koumoutsakos, P. (2006). Simulations of optimized anguilliform swimming. *The Journal of Experimental Biology*, 209, 4841-4857.
- Lewin, G.C. & Haj-Hariri, H. (2003). Modelling thrust generation of a two-dimensional heaving airfoil in a viscous flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 492, 339-362.
- Liu, H., Wassersug, R.J., & Kawachi, K. (1996). A computational fluid dynamics study of tadpole swimming. *Journal of Experimental Biology*, 199, 1245-1260.
- Liu, H., Wassersug, R. & Kawachi, K. (1997). The three dimensional hydrodynamics of tadpole locomotion. *Journal of Experimental Biology*, 200, 2807-2819.
- Liu, H. & Kawachi, K. (1999). A numerical study of undulatory swimming. *Journal of Computational Physics*, 155, 223-247.

- Shen, L., Zhang, X., Yue, D.K.P. & Triantafyllou, M.S. (2003). Turbulent flow over a flexible wall undergoing a streamwise travelling wave motion. *Journal of Fluid Mechanics*, 484, 197-221.
- Tian-jinag, H., Lin-cheng, S. & Pei-ling, G. (2006). CFD validation of the optimal arrangement of the propulsive dorsal fin of *gymnarchus niloticus*. *Journal of Bionic Engineering*, 3, 139-146.
- Versteeg, H.K. & Malalasekera, W. (2007) *An introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method*. Pearson Prentice Hall.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Juan de Dios Rodriguez Garcia.
Phone: +34 981 337 400 Ext 3002
Fax: + 34 981 337 401
E-mail : jdedios@cdf.udc.es
URL :