

OPTIMIZACIÓN HIDRODINÁMICA DE BOYA SUBSUPERFICIAL CON ALETAS ORIENTABLES: ANÁLISIS CFD

Hydrodynamic optimization of a subsurface buoy with orientable fins: CFD Analysis

Daniel José Coronil Huertas¹
Juan Manuel Vidal Pérez²
José Juan Alonso del Rosario³

Recibido: 20/05/2018

Aceptado: 04/09/2018

Resumen

Se presenta la optimización hidrodinámica de una boya de flotación sub-superficial provista con aletas orientables para fondeos oceanográficos, definida a partir de un perfil NACA de cuerda variable en su eje vertical al que se le añade un timón y aletas orientables, la boya está inspirada en un pez luna. La nueva forma consigue reducir el arrastre y aumentar la sustentación frente a boyas de referencia esféricas equivalentes. Se analizan los resultados de las distintas simulaciones hidrodinámicas del comportamiento de esta boya con respecto a boyas esféricas equivalentes empleando CFD. Se demuestra que el arrastre se reduce en más del 50%. Las aletas orientables son configurables en su ángulo de ataque para su mejor rendimiento en función del régimen de velocidades propio de cada emplazamiento. Dentro del rango

de velocidades de 0.1-3.0 m/s, se determina que el ángulo de ataque óptimo está en torno a los 10°.

Palabras Clave: fondeos oceanográficos, fuerza de arrastre, fuerza de sustentación, coeficiente de arrastre, dinámica de fluidos computacional, CFD.

Abstract

The hydrodynamic optimization of a sub-surface float provided with adjustable fins for oceanographic anchorages is presented. Defined from a NACA profile of variable rope in its vertical axis to which a rudder and adjustable fins are added, the buoy is inspired by a sunfish. The new shape reduces drag and increases lift compared to equivalent spherical reference buoys. The results of the different hydrodynamic simulations of the behavior of this buoy

¹Ph.D., Universidad de Cádiz - daniel.coronil@uca.es.

²Ph.D., Universidad de Cádiz - juan.vidal@uca.es.

³Ph.D., Universidad de Cádiz - josejuan.alonso@uca.es.

with respect to equivalent spherical buoys using CFD are analyzed. It is demonstrated that drag is reduced by more than 50%. The adjustable fins are customizable in their angle of attack for best performance depending on the speed

regime of each site. Within the speed range of 0.1-3.0 m/s, the optimum angle of attack is determined to be around 10°.

Keywords: oceanographic moorings, drag force, lift force, drag coefficient, CFD.

Introducción

Los oceanógrafos se han visto obstaculizados en la toma rutinaria de mediciones “in situ” debido a la extensión de los océanos, la lejanía de los puntos de observación, el ambiente severo y agresivo, las dificultades presentes y los costes (Wilson & Kerut, 1982). Las mediciones desde un buque solo proporcionan una caracterización puntual de las condiciones oceanográficas en el momento de la medida. Por lo tanto, oceanógrafos e ingenieros han tenido la necesidad de enviar sistemas que les permitan dejar instrumentos de medición en el océano fijados al fondo marino.

Un fondeo oceanográfico puede ser definido como una estructura o sistema flotante que se instala en el océano con el propósito de elaborar y registrar mediciones (en un periodo de tiempo) de distintas variables oceanográficas y/o meteorológicas (Berteaux, 1976), que permitan cuantificar los cambios en las condiciones del océano. Suele estar compuesto de boyas de flotación y/o balizamiento, cables o cabos, cadenas, liberadores acústicos, lastres e instrumentos de medida (Berteaux, 1976 y Vidal & Tejedor, 2004). Los instrumentos permiten medir una serie de propiedades tales como la velocidad y dirección de la corriente, la salinidad, la temperatura, el estado de la mar, entre otras (Trask & Weller, 2001). Además permiten el análisis de complejas interacciones entre el océano y la atmósfera, obteniendo series temporales de variables oceanográficas en los puntos donde se fondean.

Cada nuevo paso o innovación en el diseño de fondeos ha permitido comprender mejor los procesos en el océano y sus interacciones. Los estudios recientes se basan en la observación del océano mediante instrumentos y sensores con mayor autonomía y comunicación permanente para que puedan alimentar los datos de las bases científicas en tiempo real. Esto permite que se puedan analizar periodos más largos y en un rango espacial mayor. En la última década se han desarrollado una gran cantidad de estudios relacionados con los sistemas de fondeos oceanográficos y proyectos innovadores, como por ejemplo (Baba, 2012), (Ochi, Ishihara, & Sugiyama, 2012), (Song, Xue, Sun, & Tian, 2012), (Von Jouanne, Brekken, Lettenmaier, Amon, & Phillips, 2012), (Walpert, Guinasso Jr. & Bender, 2009), (Antoine, 2008). Con estos ejemplos se pretende incidir en la necesidad de elaborar nuevos diseños de sistemas oceanográficos o incluso mejorar los diseños existentes ante las diferentes necesidades o problemas que surjan.

La inclinación de las líneas de fondeo debido a la fuerza de arrastre de la corriente provoca errores en el registro de las series temporales de las variables oceanográficas. El diseño de estos fondeos requiere estudiar la flotabilidad mínima necesaria para mantener las líneas de amarre verticales. El grado de inclinación de estas líneas es un factor crítico en el error de las mediciones de los instrumentos. Cuando alcanzan inclinaciones muy altas, algunos instrumentos empiezan a medir incorrectamente o las medidas están sujetas a grandes variaciones que crean incertidumbre en la medición (Vidal, López, & Penagos, 2011).

Por lo tanto, uno de los principales requisitos que presenta un sistema de fondeo es que la excursión tanto horizontal como vertical de sus componentes en respuesta a las corrientes sea pequeña. Una forma de reducir esta excursión es dando rigidez al amarre mediante el aumento de la tensión de la línea. El aumento de la flotabilidad y de la tensión de los cables de amarre se traduce en una necesidad de uso de una línea de amarre más resistente y razonablemente más costosa. Por lo tanto, la rigidez en el diseño de líneas de fondeos oceanográficos es un compromiso entre el coste de la flotabilidad y el movimiento del fondeo, los cuales están inversamente relacionados (Sundaravadivelu, Vara Prasad, & Gopu, 1987). Entonces, la pretensión buscada en el cable se consigue con la flotabilidad de la boya. Un aumento del valor de la pretensión requiere una boya más grande, que se traduce generalmente en una mayor fuerza de arrastre horizontal.

Los fondeos oceanográficos en lugares con velocidades de corrientes elevadas, requieren de un estudio previo detallado. La evolución temporal de la línea de fondeo permite analizar previamente su comportamiento, permitiendo optimizar su diseño. La predicción de los desplazamientos, las tensiones que soportan los cables e instrumentos y la distribución adecuada de los elementos de flotación puede realizarse mediante programas de cálculo que desarrollan las ecuaciones del equilibrio dinámico de cables (Vidal, Muriel, & de los Santos, 2006).

Un lugar singular, por sus características oceanográficas y de gran dificultad desde el punto de vista instrumental y operacional para el fondeo de instrumentos oceanográficos es el Estrecho de Gibraltar, sur de la Península Ibérica (Bryden, Candela, & Kinder, 1994). Además de su batimetría abrupta, se caracteriza por sus corrientes de intensidad elevada, que a veces pueden superar los 2 m/s (Bruno, 2002) y (La fuente, 2000). Es por ello que los diseños de fondeos oceanográficos en estas zonas requieren un exhaustivo análisis.

El trabajo de (Vidal, Muriel, & de los Santos, 2006) presenta un estudio de una línea de fondeo oceanográfico en el Estrecho de Gibraltar, elaborando su diseño mediante un programa de cálculo basado en el equilibrio dinámico del mismo. En 2002 se fondeó una línea de correntímetros cuyo análisis de las series temporales registradas mostraron desplazamientos verticales, que superaron los 50 m. Por lo tanto, la intensidad de las corrientes en dicha zona y sus variaciones en profundidad, somete a la línea de fondeo a inclinaciones muy severas. Para evitar la excesiva inclinación de los instrumentos de medida se necesitaban grandes elementos de flotación que tensionaran la línea y evitaran su desplazamiento respecto a la vertical.

En 2003 se fondeó en una zona cercana una línea de correntímetros similar a la anterior, pero a la que se le incluyeron más elementos de flotación. En el análisis de los datos registrados se detectó que para ciertas condiciones de corriente, el ángulo de inclinación de los correntímetros era muy elevado y esto se explicaba debido al arrastre producido por los sistemas de flotación instalados. Por lo tanto, para el diseño definitivo

del fondeo se debió tener en cuenta que estas boyas no podían tener un tamaño elevado, para que el arrastre de la misma no aumentase significativamente.

Con lo expuesto anteriormente es posible manifestar que el criterio clave para mejorar este tipo de fondeo es el diseño de una boya o de elementos de flotación sumergidos que aporten la máxima flotabilidad y la mínima fuerza de arrastre debido a su tamaño y forma (Zambrano, MacCready, Letourneau, Roddier, & Cermelli, 2006).

Los métodos empleados para llevar a cabo este tipo de estudio requieren en primer lugar la elección de diferentes diseños. Los cuerpos que lo forman están sujetos a la fuerza que produce el flujo circundante (Nakayama & Boucher, 1998), por lo que el control del flujo es importante para reducir la resistencia y la magnitud de la fuerza que actúa sobre ellos (Morel & Bohn, 1980 y Igarashi, 1982). Posteriormente, se procede al análisis mediante modelos numéricos del comportamiento de los diseños, el cual no exime la necesidad de experimentar con modelos a escala reducida (Coleman & Steele, 1999 y Valle, Terceño, & Carrillo, 2007); ya que representan de manera aceptable el comportamiento del prototipo (Chakrabarti, 1994).

Para que el diseño de un sistema de fondeo oceanográfico sea viable y se comporte favorablemente, es necesario analizar previamente los diferentes aspectos que les afectan negativamente, para así poder proponer mejoras que los optimicen. Para ello, uno de los principales puntos a tratar será la disminución de las excursiones de los equipos que los integran. Por lo tanto, es necesario prestar una atención especial al arrastre que se produce debido a los elementos que aportan flotación al sistema (boyas). Así pues, existe la necesidad de buscar nuevas formas o configuraciones de los elementos que reduzcan significativamente el arrastre.

Cuando una boya está inmersa en un fluido viscoso, experimenta una fuerza de gravedad “W” (constante y en dirección descendente), una fuerza de flotación “B” (constante y en dirección ascendente), y una fuerza de resistencia “D” (creciente con la velocidad y contra la dirección del movimiento) (Vidal, López, & Penagos, 2011). El arrastre “D” en un cuerpo es la suma de la presión de arrastre “Dp” y del arrastre por fricción “Df”, cuyas proporciones pueden variar con la forma del cuerpo. El cálculo teórico del coeficiente de arrastre de un cuerpo situado en un flujo uniforme “U” es generalmente difícil excepto para cuerpos de formas simples y para una gama limitada de velocidades. Por lo tanto, no existe otra manera más que depender de los experimentos. En general, el arrastre “D” se expresa de la siguiente manera:

$$D = C_D A \frac{\rho U^2}{2} \quad (1)$$

Donde “A” es el área proyectada del cuerpo en el plano vertical a la dirección del flujo uniforme y “CD” es un número adimensional llamado coeficiente de arrastre.

El control del flujo tiene como objetivo reducir la resistencia y la magnitud de la fuerza que actúa sobre un cuerpo inmerso en él. Un control de flujo eficaz puede reducir la resistencia que actúa sobre un cuerpo. Se han diseñado una gran variedad de formas para lograrlo (Koenig & Roshko, 1985 y Zhou, Cheng, & Hung, 2005).

En el estudio que se presenta, se elige como sistema de flotación un prototipo de boya especial, diseñada por Innova oceanografía litoral s.l., patentada junto con la Universidad de Cádiz, con la forma semejante a un pez luna y que pretende reducir la fuerza de arrastre. En este cuerpo se obtiene por su diseño el menor arrastre cuando el eje largo es paralelo a la dirección del flujo y el extremo más protuberante se dirige aguas arriba (Fig. 1). Se analizará el comportamiento de dicha boya y se propondrán mejoras de diseño que optimicen la configuración del fondeo donde se instale.

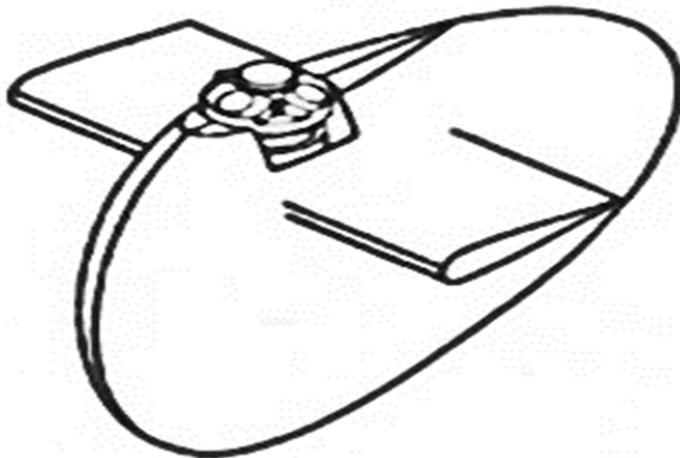


Figura 1. Prototipo de boya especial, con forma semejante al pez luna.

Fuente: Vidal, López, & Penagos, 2011

Normalmente, los elementos de flotación presentan formas esféricas o cilíndricas (Vidal, López, & Penagos, 2011). Las curvas de coeficientes de arrastre para esferas y placas planas se describen a menudo en informes de mecánica de fluidos (Lamb, 1932), (Hoerner, 1965) y (Pierson, Neumann, & James, 1960). La dificultad se eleva de manera considerable cuando se pretende obtener dicha información sobre formas más complejas o no convencionales, como el caso de esta boya prototipo. Para este análisis, se ha recurrido al estudio comparativo de los datos de arrastre para esferas de estudios anteriores con los datos de arrastres obtenidos mediante softwares de dinámica de fluidos computacional (CFD).

Método

El software de simulación utilizado es el programa “TDYN” y su paquete de análisis “CFD+HT” de la empresa “Compass ingeniería y sistemas, s.a.”. Constituye una completa solución de ingeniería para resolver problemas que involucran flujos transferencia de calor (fluidos y sólidos) y multi-física. La esencia del mismo es la tecnología del solucionador de cálculo por elementos y volúmenes finitos, que ofrece rápidamente soluciones fiables y precisas. El módulo RANSOL cuenta con la última tecnología para resolver flujos de fluidos en 3D (transitorios o permanentes), incluyendo efectos de turbulencia. Los modelos de fluidos disponibles permiten resolver totalmente los problemas de flujo de fluidos compresibles e incompresibles y flujos en medios porosos (Compass Ingeniería y Sistemas, S.A., 2018).

Resolvedor de Navier-Stokes (módulo RANSOL)

Las ecuaciones para fluidos incompresibles de Navier-Stokes en un dominio tridimensional dado Ω y en un intervalo de tiempo $(0, t)$ puede escribirse como:

$$\left. \begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \nabla) u \right) + \nabla p - \nabla (\mu \nabla u) &= \rho f \text{ en } \Omega \times (0, t) \\ \nabla u &= 0 \text{ en } \Omega \times (0, t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Donde $u=u(x,t)$ denota el vector velocidad, $p=p(x,t)$ el campo de presión, ρ la densidad (constante), μ la viscosidad dinámica del fluido y f la aceleración volumétrica. La anterior ecuación necesita ser combinada con las siguientes condiciones de contorno:

$$\left. \begin{aligned} u &= u_c \text{ en } \Gamma_D \times (0, t) \\ p &= p_c \text{ en } \Gamma_P \times (0, t) \\ n \sigma g_1 &= 0, \quad n \sigma g_2 = 0, \quad n u = u_M \text{ en } \Gamma_M \times (0, T) \\ u(x, 0) &= u_0(x) \text{ en } \Omega_D \times (0) \\ p(x, 0) &= p_0(x) \text{ en } \Omega_D \times (0) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

En las ecuaciones anteriores, $\Gamma = \partial\Omega$ denota las condiciones de contorno del dominio Ω , n es el vector normal unitario, y g_1, g_2 , el vector tangente a la superficie de contorno $\partial\Omega$, u_c es el campo de velocidad en Γ_D (la parte de contorno del tipo Dirichlet, o tipo de velocidad prescrita), p_c es la presión prescrita en Γ_P (presión de

contorno prescrita), σ es el campo de esfuerzos, u_M es el valor del vector velocidad normal y u_{0,p_0} son los valores iniciales de los campos de velocidad y presión. La unión de $\Gamma_D, \Gamma(P)$ y Γ_M debe ser Γ ; su intersección debe estar vacía, un punto del contorno solo puede ser parte de uno de los tipos de contorno, a menos que sea parte de la frontera entre ellos. La discretización espacial de las ecuaciones de Navier-Stokes debe realizarse por medio del método de los elementos finitos, mientras que para la discretización del tiempo se considera un algoritmo iterativo y se usa un “método de paso fraccionado” (implícito de dos pasos).

El uso del método estándar de Galerkin para discretizar las ecuaciones de Navier-Stokes conduce a inestabilidades numéricas. En los últimos años, se ha desarrollado un gran esfuerzo en buscar formas de estabilizar las ecuaciones gobernantes, muchos de los cuales implican añadir artificialmente términos a las ecuaciones para equilibrar la convección, por ejemplo, el método de la difusión artificial (Oñate & Manzano, 2000). Un nuevo método de estabilización, conocido como “Cálculo de Incremento Finito”

(FIC), se ha desarrollado recientemente (Oñate, 1999) y (García, Oñate, Sierra, Saceo, & Idelsohn, 1998). Los detalles sobre la obtención de la ecuación estabilizada FIC y las recomendaciones para el cálculo de los términos de estabilización pueden encontrarse en (Oñate, García, & Idelsohn, 1998). Una característica interesante de la formulación FIC es que permite usar la interpolación de igual orden para las variables de velocidad y presión (Oñate, García-Espinosa, & Idelsohn, 2004) y (García-Espinosa & Oñate, 2003).

Condiciones de contorno de la pared del cuerpo

TDYN ofrece la posibilidad de elegir diferentes condiciones de contorno de pared, destacando entre ellas el tipo “V_fixWall”, que impone la condición de velocidad nula en la pared. Esta condición es usada para resolver explícitamente la región cercana a la pared con el modelo numérico. Con el fin de resolver precisamente la capa límite usando esta condición, se debe usar un análisis global de malla. En muchas aplicaciones de ingeniería, es únicamente práctica para análisis en un régimen con moderados o bajos números de Reynolds (Compass Ingeniería y Sistemas, S.A., 2018).

Proceso de simulación

El análisis por medio de TDYN CFD+HT responde al siguiente esquema de pasos básicos.

Pre-proceso: el primer paso es la creación del problema, generando la geometría del modelo o importando desde un archivo CAD. Se asignan las condiciones de contorno y las condiciones iniciales, se definen los materiales y se insertan los datos generales del problema, definiendo además los datos del solucionador y unidades. Finalmente, se genera la malla.

Cálculo: Tras la creación del problema, el cálculo puede empezar. La información sobre la evolución de la solución puede ser visualizada.

Post-proceso: Terminado el cálculo, los resultados ya están disponibles. Estos pueden visualizarse usando varias opciones del sistema como encendiendo/apagando elementos, usando rellenos, vectores, cortes, gráficos, animaciones, etc. También es posible visualizar información y gráficos evolutivos referentes a fuerzas y momentos en el cuerpo, movimientos del cuerpo y normas de convergencia.

Resultados y discusión

Datos obtenidos en CFD para boya esférica equivalente y boya pez luna original

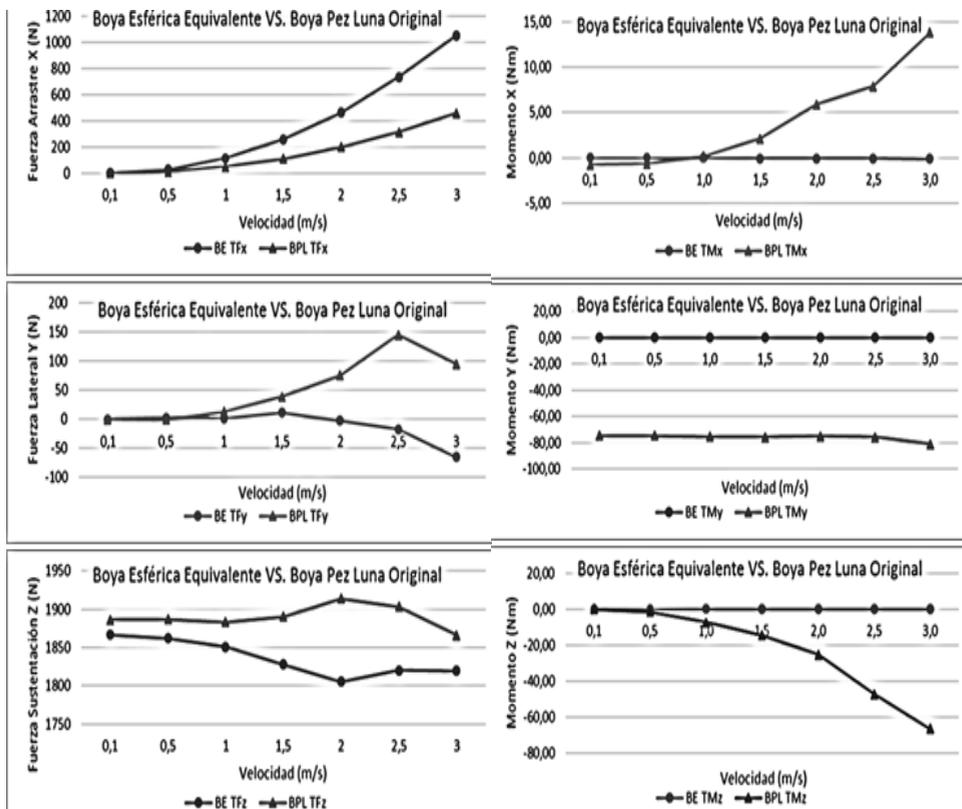


Figura 2. Gráficas de componentes de fuerzas y momentos en ambos cuerpos.

La Fig. 2 muestra los datos de fuerzas y momentos totales obtenidos en la simulación numérica para el prototipo de la boya pez luna original y para una boya esférica con empuje total equivalente. Dichas fuerzas se han calculado para diferentes velocidades. Las componentes de dichas fuerzas se denominan en este caso:

1. F_x : fuerza de arrastre, en la misma dirección que el flujo principal.
2. F_y : fuerza lateral sobre el cuerpo, perpendicular a la dirección del flujo principal.
3. F_z : fuerza de sustentación, vertical hacia arriba y perpendicular a la dirección del flujo principal.
4. M_x : momento respecto al eje X, en la misma dirección que el flujo principal.
5. M_y : momento respecto al eje Y, perpendicular a la dirección del flujo principal.
6. M_z : momento respecto al eje Z, vertical hacia arriba y perpendicular a la dirección del flujo principal.

La boya pez luna original en comparación con la boya esférica equivalente correspondiente reduce la fuerza de arrastre entre un 55-57%; experimenta mayores fuerzas laterales a medida que aumenta la velocidad; y consigue un ligero aumento de la fuerza de sustentación (del 1 al 6% en función de la velocidad). Referente a los momentos, aumentan significativamente los momentos en las tres componentes; siendo en X y en Z más acusados con la velocidad.

Datos obtenidos en CFD para boya pez luna optimizada

En esta optimización se añade un apéndice de cola a la boya (a modo de timón) y se orientan los apéndices laterales con diferentes ángulos de ataque (Fig. 3).

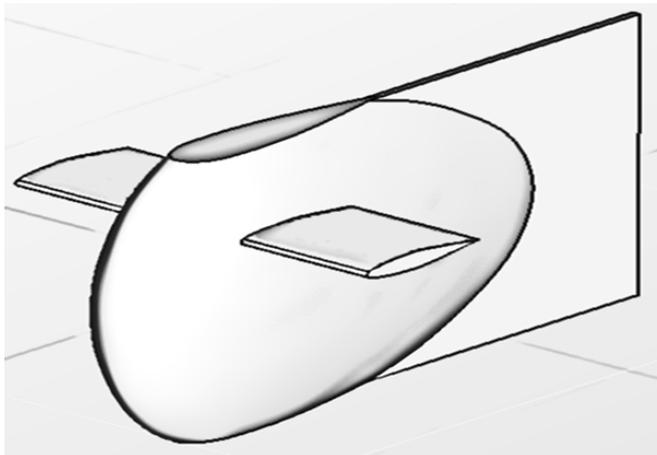


Figura 3. Nueva boya optimizada, con apéndice a modo de timón en el borde de salida

La Fig. 4 presenta los valores obtenidos en la optimización de la boya pez luna original. Los valores se presentan enfrentando por separado cada valor por componente. Se muestran los datos para cada ángulo de ataque y se añade el valor de la boya original para su comparativa. La boya pez luna optimizada con apéndice de cola en comparación con la boya pez luna original consigue una ligera reducción de la fuerza de arrastre con un ángulo de ataque de 0-5°, siendo similar a 10° y aumentando ligeramente entre 15-20°; reduce considerablemente la fuerza lateral en todos los ángulos de ataque, siendo prácticamente nula a 10° y consigue un ligero aumento de la fuerza de sustentación con un ángulo de ataque de 0-5° hasta una velocidad de 2 m/s y se reduce a partir de esta; a 10° existe un ligero aumento y es prácticamente constante a todas las velocidades; y con 15-20° el aumento de sustentación es más acusado con la velocidad. Referente a los momentos, se pretende buscar el ángulo de ataque que reduzca el valor absoluto de los momentos en X y en Z, y que aumente el valor absoluto del momento en Y, siendo elegido el ángulo de 10°.

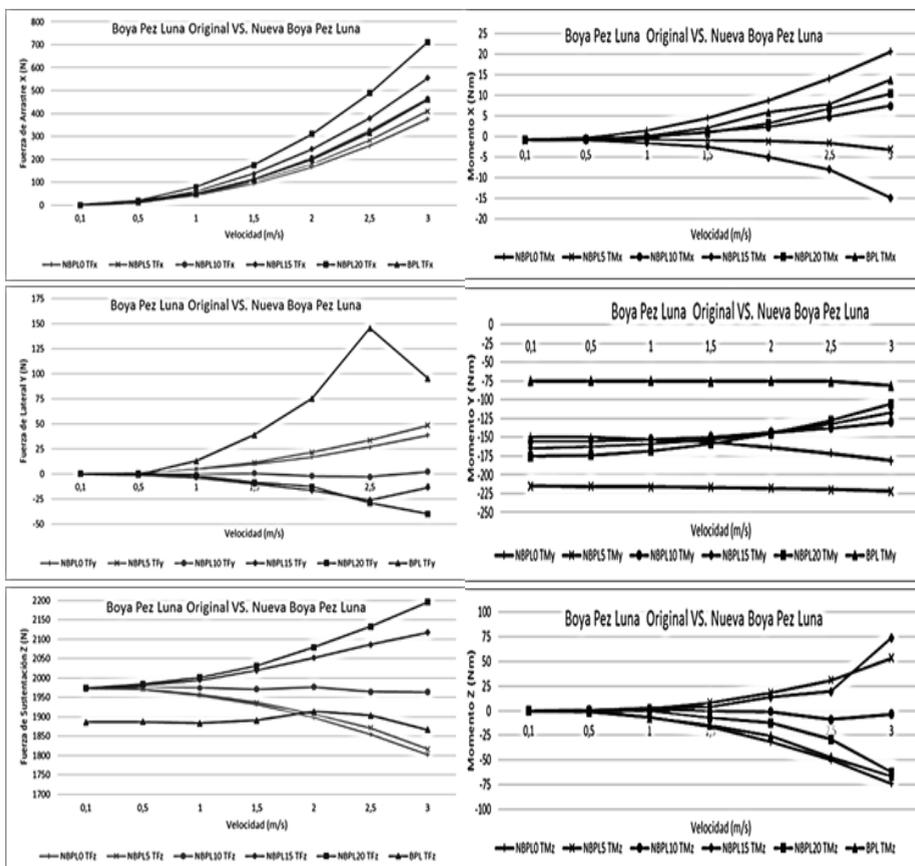


Figura 4. Gráficas de componentes de fuerzas y momentos para la boya pez luna original y para la nueva boya pez luna a diferentes ángulos de ataque de los apéndices.

Datos obtenidos en CFD tras la optimización de la boya

La Fig. 5 muestra las fuerzas y momentos totales obtenidos en la simulación numérica para la nueva boya esférica con empuje total equivalente al de la boya pez luna optimizada con ángulo de ataque 10° . La boya pez luna optimizada en comparación con la boya esférica equivalente correspondiente, reduce la fuerza de arrastre entre un 44-56%; las fuerzas laterales son cercanas a cero, y consigue un ligero aumento de la fuerza de sustentación (del 1 al 2% en función de la velocidad). Referente a los momentos se consigue un comportamiento óptimo de la boya; el momento en X es menor que en la boya original (se reduce en función de la velocidad entre un 36-61%); el momento en Y en comparación con la boya original aumenta en función de la velocidad del 60 al 100%; y el momento en Z es menor que en la boya original (se reduce en función de la velocidad de un 81-117%).

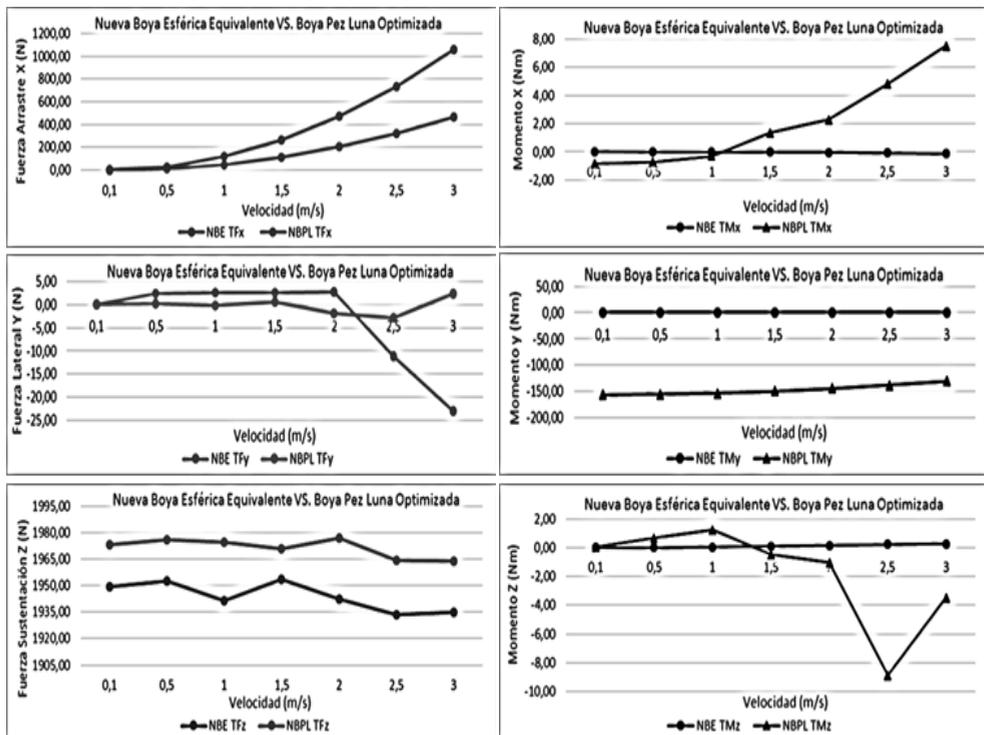


Figura 5. Gráficas de componentes de fuerzas y momentos en ambos cuerpos.

Conclusiones

El presente estudio muestra satisfactoriamente los resultados de optimización de una boya oceanográfica mediante cálculos simulados numéricamente en el software TDYN CFD+HT. La boya pez luna original en comparación con la boya esférica equivalente correspondiente presenta la ventaja de reducir considerablemente (del orden del 55%) el arrastre de la misma. Por el contrario, presenta serios inconvenientes como la significativa fuerza lateral (que aumenta con la velocidad) y el aumento significativo de los momentos en las tres componentes, y con mayor importancia el momento en el eje Z. Estos motivos propician la necesidad de optimizar dicha boya, con el fin de mejorar su comportamiento como elemento de un sistema de fondeo oceanográfico. Los objetivos de dicha optimización buscaban mantener la reducción del arrastre lograda por la boya original, disminuyendo los momentos que la perjudicaban (X y Z).

Las mejoras propuestas para optimizar la boya original (añadir a modo de timón un apéndice de cola a la boya y orientar los apéndices laterales con un ángulo de ataque de 10°), producen resultados satisfactorios. Las fuerzas de arrastre se reducen en torno al 50%, las fuerzas laterales son prácticamente nulas, el momento en X es entre un 36-61% menor, el momento en Z se reduce considerablemente (en más del 80%) y aumenta el momento en Y en más de un 60%.

No obstante, cabe destacar que cuando se crea un método matemático para una solución que reproduzca una realidad física, se realizan simplificaciones y se asumen valores y premisas que llevan a inexactitudes en los modelos. Por este motivo, se debe utilizar además la información generada en la experimentación con modelos a escala, incluso cuando se dispone de una solución matemática analítica. En muchos procesos de ingeniería, la geometría, las condiciones de contorno y los propios fenómenos físicos son tan complicados que dificultan la formulación de modelos numéricos o analíticos que predigan de forma satisfactoria los fenómenos observados. En estos casos, el conocimiento de los fenómenos en estudio se consigue únicamente con la experimentación con modelos a escala. Por todo ello, se plantea como trabajo futuro la experimentación con modelos a escala de la nueva boya optimizada.

Referencias

Antoine, D., Guevel, P., Desté, J., Bécu, G., Louis, F., Scott, A., & Bardey, P. (2008). *The 'BOUSSOLE' Buoy - A new transparent-to-Swell taut mooring dedicated to marine optics: Design, tests, and performance at sea. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 968-989.*

- Baba, S., Ohta, Y., Tahara, J., Fukuda, T., Ishihara, Y., Murashima, T., & Amitani, Y. (2012). *Deployment of an ice buoy at 60°S in the Southern Ocean*. Hampton Roads Conference: Harnessing the Power of the Ocean. Virginia Beach, United States: Oceans.
- Berteaux, H. (1976). *Buoy engineering*. New York: Wiley-Interscience Publication.
- Bruno, M., Alonso, J., Cózar, A., Vidal, J., Ruiz-Cañavete, A., Echevarría, F., & Ruiz, J. (2002). *The boiling-water phenomena at Camarinal Sill, the strait of Gibraltar*. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 4097-4113.
- Bryden, H., Candela, J., & Kinder, T. (1994). *Exchange through the Strait of Gibraltar*. *Progress in Oceanography*, 201-248.
- Chakrabarti, S. (1994). *Offshore Structure Modeling*. Singapore: World Scientific Publishing Co.
- Coleman, H., & Steele, W. (1999). *Experimentation and Uncertainty analysis for engineers*. New York: John Wiley & Sons.
- Compass Ingeniería y Sistemas, S.A. (2018). *Tdyn Theory Manual*. Disponible el 01/03/2018 en: http://www.compassis.com/downloads/Manuals/Tdyn_Theory_Manual.pdf.
- García, J., Oñate, E., Sierra, H., Saceo, C., & Idelsohn, S. (1998). *A stabilized numerical method for analysis of ship hydrodynamics*. Proceedings Eccomas Conference on CFD. Athens: John Wiley.
- García-Espinosa, J., & Oñate, E. (2003). *An unstructured finite element solver for ship hydrodynamics*. *Jnl. Appl. Mech.*, 18-26.
- Hoerner, S. (1965). *Fluid Dynamic Drag*. Midland Park, New Jersey: 148 Bustead Drive.
- Igarashi, T. (1982). *Characteristics of a flow around two circular cylinders of different diameters arranged in tandem*. *Bulletin of the JSME*, 349-357.
- Koenig, K., & Roshko, A. (1985). *An experimental study of geometrical effects on the drag and flow field of two bluff bodies separated by a gap*. *Journal of Fluid Mechanics*, 167-204.
- Lafuente, J., Vargas, J., Plaza, F., Sarhan, T., Candela, J., & Bascheck, B. (2000). *Tide at the eastern section of the Strait of Gibraltar*. *Journal of Geophysical Research C: Oceans*, 14197-14213.
- Lamb, H. (1932). *Hydrodynamics*. New York: Cambridge University Press.

- Morel, T., & Bohn, M. (1980). *Flow over two circular disks in tandem*. *Journal of Fluids Eng.*, 104-111.
- Nakayama, Y., & Boucher, R. (1998). *Introduction to Fluid Mechanics*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Ochi, H., Ishihara, Y., & Sugiyama, T. (2012). *Concept of a tsunami warning buoy system and an acoustic telemetry system for high current area*. Yeosu Conference: The Living Ocean and Coast - Diversity of Resources and Sustainable Activities. Yeosu, South Korea.
- Oñate, E. (1999). *A stabilized finite elements method for incompressible viscous flows using a finite increment calculus formulation*. Barcelona: CIMNE.
- Oñate, E., & Manzano, M. (2000). *Stabilization techniques for finite element analysis of convection-diffusion problems*. Barcelona: CIMNE.
- Oñate, E., García, J., & Idelsohn, S. (1998). *On the stabilisation of numerical solutions of advective-diffusive transport and fluid flow problems*. *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.*, 233-267.
- Oñate, E., García-Espinosa, J., & Idelsohn, S. (2004). *Ship Hydrodynamics*. In *Encyclopedia of computational Mechanics*. John Wiley & Son.
- Pierson, W., Neumann, G., & James, R. (1960). *Observing and Forecasting Ocean waves*. *Hydrographic Office Publication*, 603.
- Song, D., Xue, B., Sun, J., & Tian, C. (2012). *The fixed-point ocean turbulence observation based on submerged buoy*. International Conference on Intelligent Control, Automatic Detection and High-End Equipment. Beijing, China.
- Sundaravadivelu, R., Vara Prasad, K., & Gopu, P. (1987). Analysis of moorings for subsurface buoy system. *The Ocean an International Workplace*, PROC., (pp. 244-247). Halifax, Canada.
- Trask, R., & Weller, R. (2001). Moorings. In J. Steele, *Encyclopedia of Ocean Sciences* (pp. 1850-1860). Oxford: Academic Press.
- Valle, J., Terceño, M., & Carrillo, E. (2007). *Estudio de incertidumbres y errores sistemáticos en los ensayos en canales de experiencias hidrodinámicas: Un proyecto internacional de I+D+I*. Canal de experiencias Hidrodinámicas de El Pardo, Madrid: Ministerio de defensa.

- Vidal, J., & Tejedor, B. (2004). *Manual para fondeos oceanográficos*. Cádiz.
- Vidal, J., López, O., & Penagos, G. (2011). Study of a mooring line with a SSBO buoy. *Instrumentation viewpoint*.
- Vidal, J., Muriel, C., & de los Santos, M. (2006). Estudio de una línea de fondeo oceanográfico en el Estrecho de Gibraltar. *V Conferencia iberoamericana en sistemas, cibernética e informática*. Orlando, Estados Unidos.
- Von Jouanne, A., Brekken, T., Lettenmaier, T., Amon, E., & Phillips, R. (2012). *A novel Ocean Sentinel instrumentation buoy for wave energy testing*. Power and Energy Society General Meeting. San Diego, United States.
- Walpert, J., Guinasso Jr., N., & Bender, L. (2009). A new buoy for oceanographic and spill response applications. *Marine Tech. for Our Future: Global and Local Challenges. Biloxi*, United States.
- Wilson, W., & Kerut, E. (1982). *The design of drifting buoy systems*. Oceans, 641-648.
- Zambrano, T., MacCready, T., Letourneau, D., Roddier, D., & Cermelli, C. (2006). *Development and testing of a submerged buoy wave power system*. International Offshore and Polar Engineering Conference. San Francisco, United States.
- Zhou, L., Cheng, M., & Hung, K. (2005). *Suppression of fluid force on a square cylinder by flow control*. Journal of Fluids and Structures, 151-167.



La mujer como parte integrante de la Armada Nacional.



Fase de entrenamiento de los cadetes en el simulador de Puente Full Mission.
