

Análisis CFD del comportamiento hidrodinámico de un vehículo submarino no tripulado

Luis Arturo Reyes Osorio^A, Octavio García Salazar^A, Bruno Silva Morales^C
Miguel Fernando Delgado Pamanes^B, Marisol Vázquez Tzompantzi^C

^A Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica, San Nicolás de los Garza, NL, México

^B Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas, Zacatecas, México

^C Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México

octavio.garciasl@uanl.edu.mx, mfdelgadop@ipn.mx, mvazquez@ipn.mx, bsilvam1200@alumno.ipn.mx
Autor de Correspondencia: luis.reyessr@uanl.edu.mx

RESUMEN

Este trabajo presenta el modelado geométrico y el análisis hidrodinámico mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de un vehículo sumergible no tripulado (UUV) de pequeña escala, diseñado para misiones de inspección y exploración subacuática. El modelo tridimensional del vehículo fue desarrollado en CAD e integrado a un dominio fluido para evaluar la distribución de presión, campos de velocidad y fuerzas hidrodinámicas bajo diferentes ángulos de ataque y velocidades de avance. Se empleó un modelo de turbulencia apropiado para flujos externos incompresibles, permitiendo estimar los coeficientes de arrastre (C_D) y sustentación (C_L). Los resultados numéricos se contrastan con datos obtenidos de un conjunto de simulaciones paramétricas lo que permite validar tendencias hidrodinámicas y discutir el impacto geométrico del fuselaje y el carenado de la hélice. Los hallazgos proporcionan criterios de diseño para la optimización hidrodinámica del vehículo, con implicaciones directas en eficiencia energética, estabilidad direccional y capacidad de maniobra en entornos marinos someros.

PALABRAS CLAVE

CFD, vehículo sumergible, hidrodinámica, coeficiente de arrastre, UUV.

ABSTRACT

This work presents the geometric modeling and hydrodynamic analysis, using Computational Fluid Dynamics (CFD), of a small-scale unmanned underwater vehicle (UUV) designed for inspection and subaquatic exploration missions. The three-dimensional model of the vehicle was developed in CAD and integrated into a fluid domain to evaluate pressure distributions, velocity fields, and hydrodynamic forces under different angles of attack and forward velocities. An appropriate turbulence model for incompressible external flows was employed, enabling the estimation of the drag and lift coefficients (C_D and C_L). The numerical results are compared with data obtained from a set of parametric simulations stored in a CSV file, which allows the validation of hydrodynamic trends and the discussion of the geometric impact of the fuselage and the propeller shroud. The findings provide design criteria for the hydrodynamic optimization of the vehicle, with direct implications for energy efficiency, directional stability, and maneuverability in shallow marine environments.

KEYWORDS

Computational fluid dynamics, unmanned underwater vehicle, hydrodynamic coefficients, drag and lift, vehicle design optimization.

INTRODUCCIÓN

Los Vehículos Submarinos No Tripulados (UUV, por sus siglas en inglés) se han convertido en herramientas esenciales para la exploración marina, el monitoreo ambiental, la inspección de infraestructura y la recolección de datos científicos en entornos de aguas someras y profundas.¹ Sus aplicaciones abarcan desde el levantamiento de arrecifes de coral y la inspección de ductos hasta el mapeo y monitoreo ecológico. A medida que aumentan las demandas operativas, la eficiencia hidrodinámica, la estabilidad y la maniobrabilidad de estos vehículos desempeñan un papel crucial en la autonomía de misión, el consumo energético y el desempeño del control.

El comportamiento hidrodinámico de los UUV está fuertemente influenciado por su geometría externa, incluyendo la forma del fuselaje, los perfiles de la proa y la popa, así como la presencia de apéndices como aletas, propulsores y carenados de protección. Incluso modificaciones geométricas sutiles pueden generar variaciones significativas en el arrastre, la sustentación y los patrones de separación del flujo, impactando directamente en la eficiencia de propulsión y en la estabilidad del vehículo.² En consecuencia, la evaluación temprana del desempeño hidrodinámico constituye una etapa clave en el proceso de diseño de plataformas robóticas subacuáticas.

Las pruebas experimentales en canales de agua o tanques de arrastre proporcionan información valiosa sobre la hidrodinámica de los UUV; sin embargo, estos experimentos suelen ser costosos, demandan mucho tiempo y presentan limitaciones en el rango de condiciones de operación que pueden evaluarse. Por ello, la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se ha consolidado como una herramienta ampliamente adoptada para la predicción de campos de flujo externos, distribuciones de presión y cargas hidrodinámicas en vehículos submarinos. Estas herramientas numéricas permiten realizar estudios paramétricos sistemáticos en función de la velocidad, el ángulo de ataque y la configuración geométrica, ofreciendo un marco viable para la exploración y optimización del diseño previo al prototipado físico.

Estudios recientes han demostrado la capacidad del CFD para capturar con precisión las características del flujo alrededor de cuerpos submarinos aerodinámicos y para estimar coeficientes hidrodinámicos como el arrastre, los cuales son fundamentales para la evaluación del desempeño del vehículo y su modelado dinámico.³ Por ejemplo, Amit Rey *et al.*, determinaron los coeficientes aerodinámicos de un vehículo sumergible simétrico a través de técnicas CFD.⁴

E. Javanmard y Mansoorzadeh desarrollaron un estudio de CFD para evaluar el procedimiento experimental para calcular el coeficiente de arrastre de un UUV.⁵ Se analizó el efecto de los soportes de sujeción utilizados para fijar el modelo al carro de remolque, así como la influencia de la profundidad relativa y de la presencia de superficie libre, considerando velocidades representativas de operación.

Además, en estudios previos se ha analizado de manera sistemática la forma del casco (proa elíptica y popa parabólica) y la influencia de los apéndices en la resistencia al avance de un UUV. Se determinó que las transiciones geométricas suavizadas en la popa contribuyen a reducir el arrastre por presión, mientras que la incorporación de apéndices puede incrementar la resistencia total de forma significativa (hasta ~30%) debido a interferencias de flujo y aumento de fricción superficial.⁶

No obstante, aún existe la necesidad de estudios específicos de caso que integren geometrías realistas de vehículos, incluyendo carenados de hélice y alojamientos externos, y que proporcionen tendencias cuantitativas de los coeficientes hidrodinámicos bajo distintas condiciones de operación relevantes para misiones en aguas someras.

En este contexto, el presente trabajo se centra en la caracterización hidrodinámica mediante CFD de un vehículo sumergible no tripulado de pequeña escala, diseñado para tareas de inspección y exploración. La geometría del vehículo fue modelada y analizada bajo diferentes ángulos de ataque. Los campos de presión, las distribuciones de velocidad y los coeficientes hidrodinámicos resultantes se emplean para evaluar la influencia de la forma externa del vehículo en el arrastre, la sustentación y el comportamiento global del flujo. Los resultados numéricos se apoyan además en datos de simulaciones paramétricas, lo que permite identificar tendencias de desempeño y generar conclusiones relevantes para el diseño.

MODELOS MATEMÁTICOS

El comportamiento hidrodinámico del vehículo sumergible se modela mediante las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento para un fluido incompresible y newtoniano, resueltas en un marco de referencia inercial. En este trabajo se asume un flujo monofásico de agua a temperatura ambiente, con propiedades constantes de densidad y viscosidad dinámica. La interacción fluido-estructura se considera unidireccional, donde el fluido ejerce cargas hidrodinámicas sobre el vehículo, mientras que la deformación estructural del cuerpo se desprecia debido a su elevada rigidez relativa.

El campo de velocidades u y el campo de presión p del fluido se describen mediante las ecuaciones de Navier–Stokes para flujo incompresible:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + f \quad (2)$$

donde $u = (u, v, w)$ es el vector de velocidad del fluido, p es la presión hidrodinámica, ρ es la densidad del agua, μ es la viscosidad dinámica, y f representa fuerzas volumétricas externas (en este caso despreciadas). Para el régimen de operación del vehículo, el número de Reynolds se encuentra en el rango turbulento, por lo que se emplea un modelo de turbulencia de dos ecuaciones para cerrar el sistema.

Se adoptó el modelo de turbulencia k – ω SST (Shear Stress Transport) debido a su capacidad para capturar adecuadamente los gradientes de presión adversos y los fenómenos de separación del flujo en cuerpos fuselados. El modelo resuelve de manera adicional las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta k y la tasa de disipación específica ω :

$$\frac{\partial(pk)}{\partial t} + \nabla \cdot (pku) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + p_k - \beta^* \rho k \omega \quad (3)$$

$$\frac{\partial(pw)}{\partial t} + \nabla \cdot (pwu) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_w} \right) \nabla w \right] + \alpha \frac{w}{k} p_k - \beta w^2 \quad (4)$$

donde μ_t es la viscosidad turbulenta y P_k representa el término de producción de energía cinética turbulenta. La formulación SST combina el comportamiento cercano a la pared del modelo k – ω con la robustez en el campo libre del modelo k – ϵ .

FORMULACIÓN DE FUERZAS HIDRODINÁMICAS

Las fuerzas hidrodinámicas totales que actúan sobre el vehículo se obtienen mediante la integración de los esfuerzos de presión y viscosos sobre la superficie del cuerpo:

$$F = \int_S^0 (-pn + \tau \cdot n) ds \quad (5)$$

donde n es el vector normal a la superficie, y τ es el tensor de esfuerzos viscosos.

A partir de estas fuerzas, se definen los coeficientes adimensionales de arrastre y sustentación:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A_{ref}} \quad (6)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho U^2 A_{ref}} \quad (7)$$

donde F_D es la fuerza de arrastre, F_L es la fuerza de sustentación, U es la velocidad del flujo incidente, y A_{ref} es el área de referencia del vehículo.

METODOLOGÍA

La metodología empleada en este trabajo se estructura en cuatro etapas principales: (i) modelado geométrico del vehículo, (ii) definición del dominio computacional y generación de malla, (iii) configuración numérica del modelo CFD y (iv) post procesamiento y análisis de resultados. Este enfoque permite evaluar de manera sistemática el desempeño hidrodinámico del UUV bajo diferentes condiciones de operación.

El vehículo sumergible tipo torpedo fue modelado en un entorno CAD a partir de sus dimensiones principales y la configuración del prototipo conceptual. La geometría incluye el fuselaje principal, el carenado del sistema de propulsión y los elementos externos relevantes que influyen en el flujo, tales como alojamientos estructurales y soportes. Con el fin de reducir el costo computacional sin comprometer la fidelidad del modelo, se omitieron detalles geométricos de pequeña escala que no afectan de manera significativa el campo de flujo global, ver figura 1. En estudios recientes se han demostrado buenas características hidrodinámicas de vehículos sumergibles con adaptación de superficies de control.^{7,8}

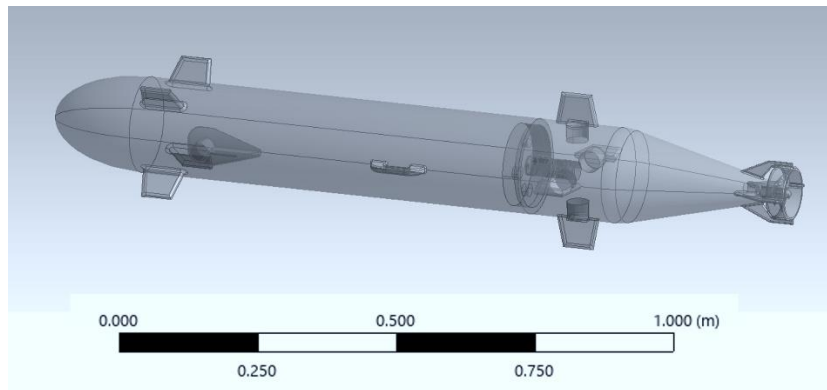


Fig. 1. Modelo CAD del vehículo sumergible.

Previo a la importación del vehículo al entorno CFD, la geometría fue depurada para eliminar intersecciones, aristas y superficies degeneradas, asegurando la correcta generación de la malla superficial y del dominio volumétrico. Esta etapa es crítica para evitar errores numéricos y garantizar la estabilidad del solucionador.

El dominio del fluido se definió como un bloque tridimensional que rodea completamente al vehículo, con dimensiones suficientes para evitar la influencia de las fronteras artificiales en el desarrollo del campo de flujo. Se establecieron condiciones de frontera en la entrada con velocidad uniforme correspondiente a la condición de operación del vehículo. La salida se estableció a través de presión estática de referencia. Las superficies del vehículo se establecieron bajo condición de no deslizamiento. Finalmente, las fronteras laterales del dominio se consideraron como pared deslizante, ver figura 2.

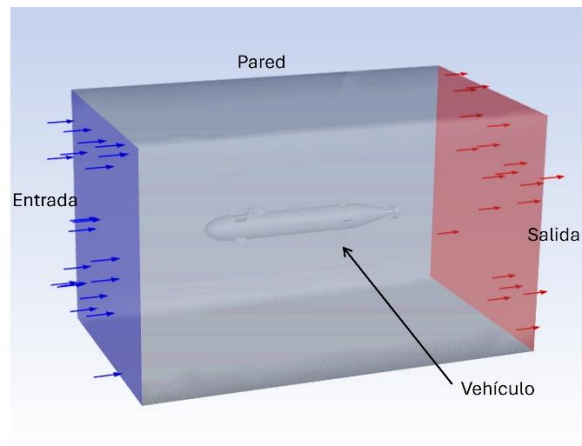


Fig. 2. Dominio computacional para el análisis numérico del fluido.

Para el análisis de distintos ángulos de ataque, se generó una función para evaluar los componentes de las coordenadas en función del ángulo.

La discretización del dominio se realizó mediante una malla no estructurada híbrida, con refinamiento local en las regiones cercanas a la superficie del vehículo y en la estela. Se emplearon capas prismáticas en la vecindad de la pared para capturar adecuadamente el gradiente de velocidad en la capa límite, controlando el valor adimensional de pared dentro del rango recomendado para el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST, ver figura 3.

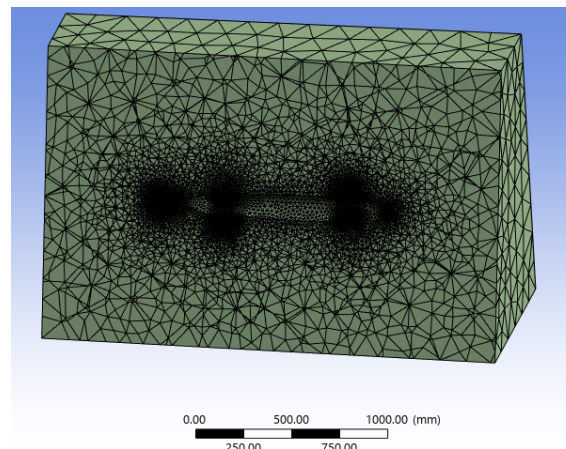


Fig. 3. Discretización del dominio computacional del vehículo sumergible.

El modelo incluye 1,245,487 celdas y 227,255 nodos. Para garantizar que los resultados numéricos no dependan de la resolución de la malla, se llevó a cabo un estudio de independencia de malla.

Las simulaciones se realizaron bajo un esquema de estado estacionario para la estimación de los coeficientes promedio de arrastre y sustentación. Se empleó un solucionador basado en volúmenes finitos, con discretización de segundo orden para los términos convectivos y de difusión. El acoplamiento presión-velocidad se resolvió mediante un algoritmo del tipo acoplado, así mismo, se utilizó discretización espacial de segundo orden para las ecuaciones de momento y de turbulencia.

Los criterios de convergencia se definieron tanto en términos de residuales numéricos (por debajo de 10^{-5} para continuidad y momento) como en la estabilización de los valores integrales de fuerza hidrodinámica.

Se realizó un barrido paramétrico en el ángulo de ataque del vehículo dentro de un rango representativo de condiciones operativas en misiones de inspección subacuática. Para cada ángulo de ataque, se ejecutó una simulación independiente, extrayendo los valores de C_D y C_L una vez alcanzado el estado estacionario.

Los resultados obtenidos se organizaron para su análisis comparativo, lo que permitió construir las curvas $C_D(\alpha)$ y $C_L(\alpha)$, así como identificar tendencias hidrodinámicas relevantes. Este enfoque facilita la reutilización de los datos en procesos posteriores de validación, optimización geométrica o integración en modelos dinámicos del vehículo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 4 presenta el campo de magnitud de la velocidad del flujo alrededor del vehículo sumergible para una condición representativa de operación en régimen estacionario. Los contornos de velocidad permiten identificar claramente las regiones de aceleración y desaceleración del flujo inducidas por la geometría del fuselaje, así como el desarrollo de la estela en la región posterior del vehículo.

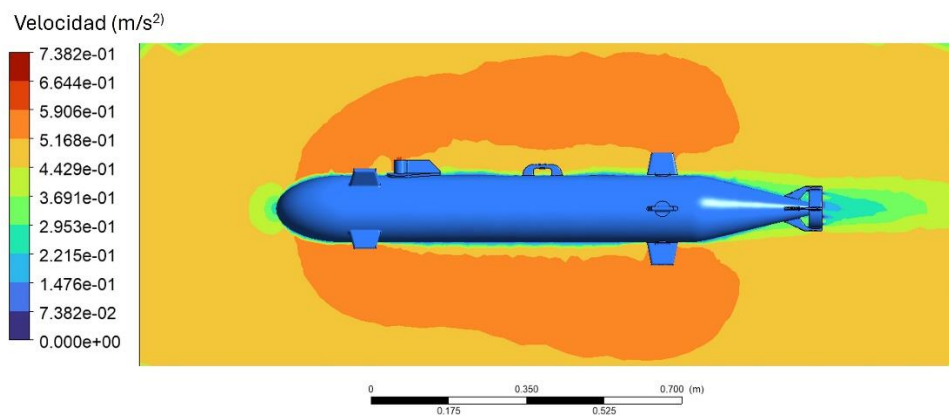


Fig. 4. Contornos de magnitud de la velocidad del flujo alrededor del vehículo sumergible obtenidos mediante CFD para una condición de operación representativa.

En la zona de proa se observa una región de baja velocidad asociada al punto de estancamiento, seguida de una aceleración progresiva del flujo a lo largo de la superficie del fuselaje. Este comportamiento es característico de cuerpos fuselados con perfiles suavizados, donde el gradiente de presión favorable contribuye a mantener la capa límite adherida durante la mayor parte del recorrido longitudinal. En las regiones laterales del vehículo, el flujo alcanza mayores magnitudes de velocidad, lo cual se refleja en los contornos de color más intensos alrededor del cuerpo principal.

Hacia la sección posterior, en la transición entre el fuselaje y el carenado del sistema de propulsión, se aprecia una región de desaceleración del flujo acompañada del inicio de la estela. Esta zona es crítica desde el punto de vista hidrodinámico, ya que concentra los principales mecanismos de generación de arrastre por presión. La estela generada muestra una recuperación gradual de la velocidad, con indicios de vórtices que contribuyen a las pérdidas energéticas del sistema.

Adicionalmente, se identifican perturbaciones locales del campo de velocidad en las cercanías de los elementos externos (soportes y carenados laterales), las cuales inducen pequeñas zonas de separación y recirculación. Aunque estas regiones no dominan el comportamiento global del flujo, su contribución acumulada impacta el coeficiente de arrastre total del vehículo, sugiriendo que una optimización geométrica de estos componentes podría reducir las pérdidas hidrodinámicas.

La figura 5 muestra la distribución de presión dinámica sobre la superficie del vehículo sumergible para la misma condición de operación analizada en la sección anterior. Este campo escalar permite identificar las regiones donde la energía cinética del flujo se transforma en cargas hidrodinámicas significativas sobre el cuerpo del vehículo, aportando información directa sobre los mecanismos locales de generación de arrastre por presión.

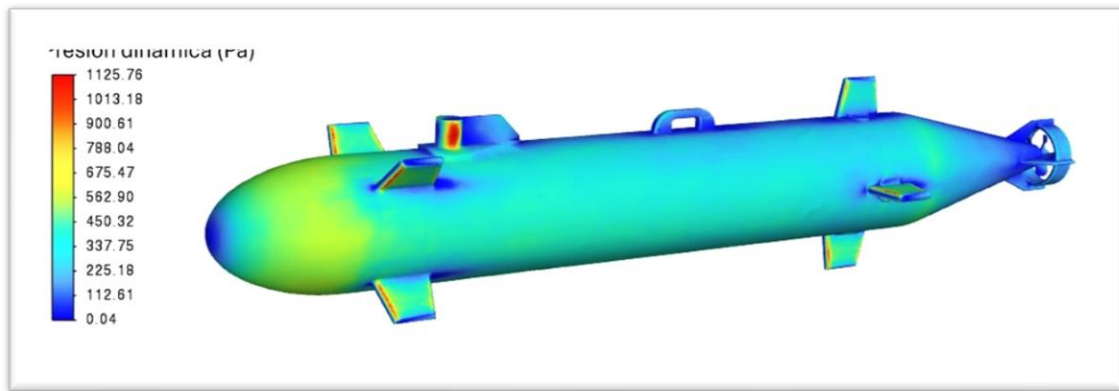


Fig. 5. Contornos de magnitud de la presión dinámica del flujo alrededor del vehículo sumergible obtenidos mediante CFD.

En la región de proa se observa un incremento notable de la presión dinámica, asociado al punto de estancamiento del flujo. Esta zona concentra los máximos esfuerzos hidrodinámicos normales al fuselaje y constituye una contribución relevante al arrastre total del vehículo. A lo largo del cuerpo principal, la presión dinámica disminuye gradualmente conforme el flujo se acelera y se redistribuye alrededor del fuselaje, reflejando un gradiente de presión favorable que favorece la adherencia de la capa límite.

Se identifican concentraciones locales de presión dinámica elevada en las aristas de los elementos sobresalientes (soportes, carenados y apéndices laterales), lo que indica la presencia de gradientes de presión adversos y potenciales puntos de separación del flujo. Estas regiones actúan como fuentes de pérdidas energéticas localizadas y contribuyen al incremento del arrastre total. En particular, los apéndices ubicados en la sección media del fuselaje muestran picos de presión asociados a la interacción directa con el flujo incidente, lo cual sugiere que su perfilado aerodinámico/hidrodinámico podría optimizarse para reducir las cargas locales.

La figura 6 muestra la variación del coeficiente de arrastre C_D en función del ángulo de ataque del vehículo sumergible. Se observa un incremento monótonico y no lineal de C_D conforme aumenta el ángulo de ataque, lo cual es consistente con el comportamiento hidrodinámico esperado en cuerpos fuselados sometidos a mayores inclinaciones respecto al flujo incidente.

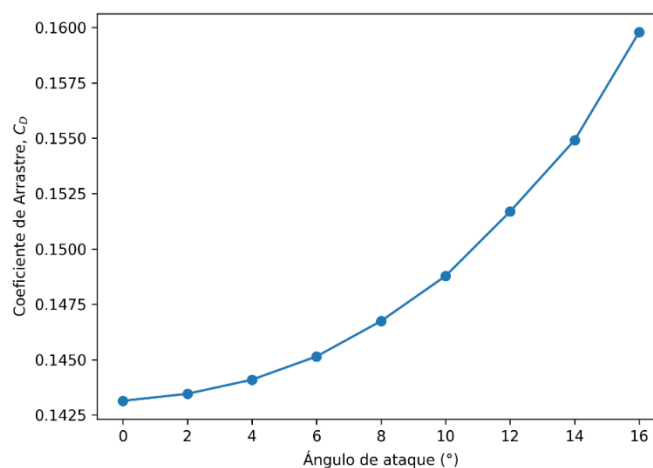


Fig. 6. Gráfico de coeficientes de arrastre vs ángulo de ataque del vehículo sumergible obtenidos mediante CFD.

Para ángulos pequeños (0° – 4°), el incremento de C_D es moderado, lo que sugiere que el flujo permanece mayormente adherido al fuselaje, con gradientes de presión relativamente suaves y pérdidas energéticas

dominadas por fricción viscosa. En este régimen, el arrastre está principalmente asociado al arrastre por fricción, y la contribución del arrastre por presión es limitada debido a la ausencia de separación significativa del flujo.

A partir de ángulos intermedios ($\approx 6^\circ$ – 10°), el crecimiento de C_D se vuelve más pronunciado, lo que indica la intensificación de gradientes de presión adversos y el inicio de regiones localizadas de separación del flujo, particularmente en la transición entre el fuselaje y la sección posterior del vehículo. Este comportamiento es coherente con los patrones observados en los contornos de velocidad y presión dinámica (figuras 6 y 7), donde se identificaron zonas de desaceleración del flujo y el desarrollo de la estela.

Para ángulos mayores ($\geq 12^\circ$), el incremento acelerado de C_D sugiere una expansión de las regiones de separación y una mayor contribución del arrastre por presión. En este rango, pequeñas variaciones en el ángulo de ataque producen aumentos relativamente grandes en el arrastre, lo que implica una penalización energética significativa para el vehículo durante maniobras pronunciadas o condiciones de operación no alineadas con el flujo incidente.

Desde el punto de vista del diseño y la operación del UUV, estos resultados indican que el vehículo presenta un desempeño hidrodinámico óptimo en un rango de ángulos de ataque bajos, donde el arrastre se mantiene relativamente reducido. En consecuencia, para misiones de inspección y desplazamiento en aguas someras, se recomienda operar el vehículo con ángulos de ataque pequeños y evitar inclinaciones prolongadas que incrementen el consumo energético. Asimismo, la tendencia no lineal de $C_D(\alpha)$ sugiere que una optimización geométrica de la sección posterior del fuselaje y del carenado del sistema de propulsión podría mitigar la rápida penalización de arrastre observada a ángulos elevados.

La tendencia no lineal del coeficiente de arrastre C_D con el ángulo de ataque es consistente con resultados experimentales reportados en la literatura, donde se demuestra que la geometría del casco y, en particular, la configuración de la sección posterior y de los apéndices externos, domina el comportamiento del arrastre hidrodinámico. Estudios experimentales han mostrado que transiciones posteriores suavizadas y el uso de perfiles adecuados en la popa pueden reducir el arrastre hasta en $\sim 13\%$, al mitigar la separación de la capa límite y la generación de vórtices.²

La figura 7 presenta la variación del coeficiente de sustentación C_L en función del ángulo de ataque del vehículo sumergible. En el rango de ángulos analizado se observa una tendencia aproximadamente lineal de C_L para pequeños ángulos de ataque, lo cual es característico del comportamiento hidrodinámico de cuerpos fuselados en régimen subcrítico. Esta relación casi lineal sugiere que el vehículo presenta una respuesta predecible de las fuerzas laterales ante pequeñas perturbaciones angulares, lo que es deseable desde el punto de vista de la estabilidad hidrodinámica y el control.

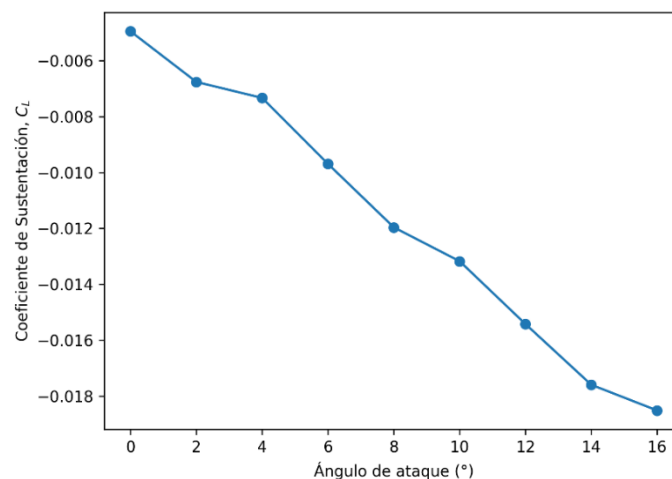


Fig. 7. Gráfico de coeficientes de sustentación vs ángulo de ataque del vehículo sumergible obtenidos mediante CFD.

Para ángulos bajos (0° – 6°), la magnitud de C_L se incrementa de manera gradual, indicando que el flujo permanece mayormente adherido a la superficie del fuselaje y que las diferencias de presión entre las regiones superior e inferior del cuerpo son moderadas. En este régimen, la fuerza de sustentación generada es pequeña, lo cual contribuye a una trayectoria estable y a una menor demanda de correcciones de control durante el desplazamiento rectilíneo del vehículo.

A medida que el ángulo de ataque aumenta ($\approx 8^\circ$ – 12°), se observa una desviación progresiva de la linealidad en la curva de C_L , lo que puede asociarse con el inicio de fenómenos de separación del flujo en la región posterior y en las cercanías de los apéndices externos. Estos efectos inducen cambios en la distribución de presión alrededor del fuselaje, modificando la resultante de la fuerza lateral. La correlación con los contornos de velocidad y presión dinámica presentados previamente respalda esta interpretación, ya que en dichos campos se identificaron regiones de recirculación que influyen directamente en la generación de fuerzas normales al eje longitudinal.

Para ángulos mayores, la pendiente efectiva de la curva de C_L tiende a disminuir, lo que sugiere una pérdida de eficiencia hidrodinámica en la generación de fuerza lateral útil, acompañada de un incremento significativo del arrastre. Este comportamiento implica que, desde el punto de vista operativo, las maniobras a grandes ángulos de ataque no solo penalizan el consumo energético (como se discutió para C_D), sino que además reducen la efectividad de la fuerza de sustentación para el control direccional del vehículo.

En términos de diseño, los resultados de $C_L(\alpha)$ indican que la configuración geométrica actual del UUV proporciona una respuesta estable y predecible en el régimen de ángulos pequeños, adecuado para misiones de inspección con trayectorias cuasi rectilíneas. No obstante, la pérdida de linealidad a ángulos mayores sugiere que una optimización del perfil del fuselaje y de la integración de los apéndices externos podría mejorar la distribución de presión y ampliar el rango operativo de ángulos de ataque con comportamiento hidrodinámico favorable.

La figura 8 presenta la variación del coeficiente de momento C_M en función del ángulo de ataque del vehículo sumergible. En el rango de ángulos analizado se observa una tendencia aproximadamente lineal de C_M , lo que indica una respuesta estable del momento de cabeceo ante pequeñas perturbaciones angulares. Este comportamiento sugiere que la configuración geométrica del fuselaje y la distribución de volúmenes del vehículo generan un momento restaurador favorable para la estabilidad longitudinal en condiciones de operación nominal.

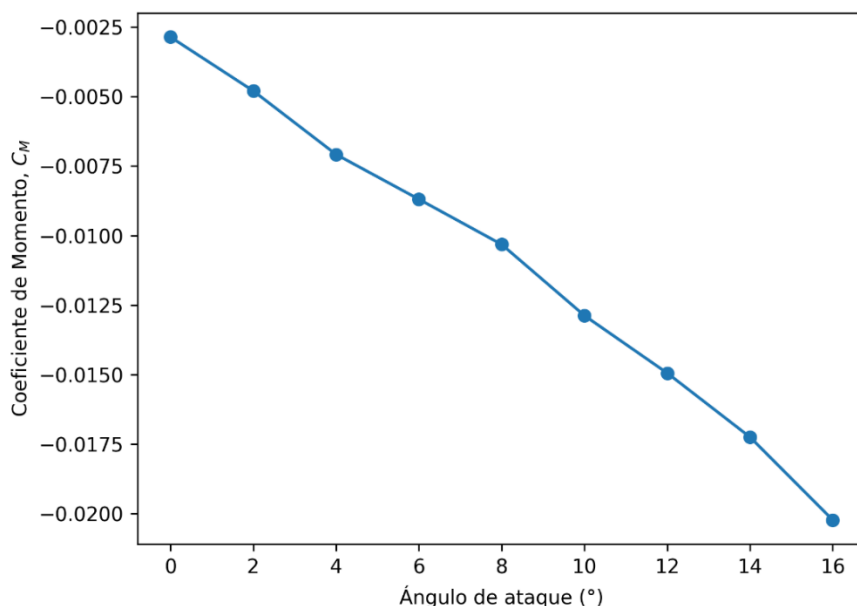


Fig. 8. Gráfico de variación de coeficiente de momento vs ángulo de ataque del vehículo sumergible obtenidos mediante CFD.

A medida que el ángulo de ataque aumenta, la magnitud de C_M se incrementa de forma progresiva, lo cual puede asociarse con la redistribución de presiones alrededor del fuselaje y, en particular, con los gradientes de presión generados en la región posterior y en el carenado del sistema de propulsión.

Estos resultados coinciden con estudios previos de vehículos tipo torpedo ⁹, donde la correlación de los coeficientes sugiere que la configuración estructural seleccionada del vehículo presenta características hidrodinámicas estables, las cuales pueden emplearse en estudios posteriores de las ecuaciones de movimiento y en el desarrollo de sistemas de control, donde la relación $C_M(\alpha)$ obtenida proporciona información valiosa para el diseño y para la sintonización de controladores en el eje de cabeceo. En particular, una pendiente aproximadamente constante de la curva en el régimen de ángulos pequeños es indicativa de una dinámica predecible, lo que facilita la implementación de estrategias de control robustas para maniobras suaves durante misiones de inspección en aguas someras.

IMPPLICACIONES OPERATIVAS DEL VEHÍCULO SUMERGIBLE

El análisis conjunto de los campos de velocidad y presión dinámica, junto con las curvas de los coeficientes hidrodinámicos $C_D(\alpha)$ y $C_L(\alpha)$, permite establecer una relación directa entre los fenómenos de flujo observados y el desempeño global del vehículo. El incremento no lineal del coeficiente de arrastre con el ángulo de ataque se asocia con la intensificación de gradientes de presión adversos y la expansión de regiones de separación del flujo en la sección posterior del fuselaje y alrededor del carenado del sistema de propulsión. Paralelamente, el comportamiento aproximadamente lineal del coeficiente de sustentación para ángulos pequeños indica una respuesta hidrodinámica estable y predecible, adecuada para misiones de desplazamiento rectilíneo y maniobras suaves.

Desde una perspectiva de diseño, estos resultados evidencian que la geometría posterior del vehículo y la integración de los apéndices externos constituyen las principales fuentes de penalización hidrodinámica, particularmente a ángulos de ataque elevados. En consecuencia, el suavizado de transiciones geométricas, la reducción de protuberancias externas y la optimización del carenado del propulsor emergen como estrategias prioritarias para disminuir el arrastre por presión y mejorar la eficiencia energética. En términos operativos, se recomienda mantener el vehículo dentro de un rango de ángulos de ataque bajos durante la navegación en régimen de crucero, con el fin de minimizar el consumo energético y preservar la estabilidad direccional. En conjunto, los resultados obtenidos proporcionan lineamientos prácticos para el rediseño hidrodinámico del UUV y sientan las bases para estudios futuros orientados a la optimización de forma y al acoplamiento con modelos dinámicos de control del vehículo.

CONCLUSIÓN

En este trabajo se presentó el modelado geométrico y la caracterización hidrodinámica mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de un vehículo sumergible no tripulado de pequeña escala orientado a misiones de inspección y exploración en aguas someras. A partir del análisis de los campos de velocidad y presión dinámica, así como de la evaluación de los coeficientes hidrodinámicos C_D y C_L en función del ángulo de ataque, se logró identificar las principales regiones responsables de las pérdidas hidrodinámicas y del comportamiento dinámico del vehículo.

Los resultados muestran que el coeficiente de arrastre presenta un incremento no lineal conforme aumenta el ángulo de ataque, asociado principalmente al desarrollo de la estela y a la separación del flujo en la sección posterior del fuselaje y alrededor del carenado del sistema de propulsión. Por su parte, el coeficiente de sustentación exhibe un comportamiento aproximadamente lineal para ángulos pequeños, lo que indica una respuesta hidrodinámica estable y predecible en el régimen de operación nominal del vehículo. Estas tendencias son consistentes con los patrones observados en los campos de velocidad y presión, lo que respalda la validez del modelo CFD implementado.

Desde el punto de vista del diseño, se identificó que la geometría posterior del fuselaje y la integración de los apéndices externos constituyen los principales factores que limitan la eficiencia hidrodinámica del vehículo. En consecuencia, se proponen como líneas de mejora el suavizado de transiciones geométricas, la optimización del carenado del sistema de propulsión y la reducción de protuberancias externas, con el objetivo de disminuir el arrastre por presión y mejorar el desempeño energético global del UUV.

Finalmente, el enfoque metodológico presentado en este trabajo proporciona una base sólida para la evaluación hidrodinámica preliminar de vehículos subacuáticos y puede emplearse como herramienta de apoyo al diseño en etapas tempranas del desarrollo. Como trabajo futuro, se plantea la incorporación de modelos de propulsión más realistas, el acoplamiento con modelos dinámicos de seis grados de libertad (6-DOF) y la validación experimental en canal de agua o tanque de arrastre, con el fin de fortalecer la confiabilidad de las predicciones numéricas y ampliar el alcance de aplicación del modelo propuesto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) por el apoyo institucional brindado para el desarrollo de este trabajo, así como por las facilidades de infraestructura y recursos académicos proporcionados. Asimismo, se reconoce a la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN por el apoyo para la realización de este trabajo de investigación cuyo apoyo fue fundamental para la realización de las actividades de investigación y análisis presentadas en este estudio.

REFERENCIAS

1. Vázquez-Tzompantzi, M., Salgado-Jiménez, T., & Silva-Morales, B. Y. (2024). Diseño y validación de un UUV con sistema de visión computacional integrado. *Pädi*, 12(Especial 2), 122–128. <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial2.12346>.
2. Rodríguez Hibert, C. F. Rivera López J.E., Rivera López J.L., Martínez Cabrera C.A. (2024). *Efecto del diseño de geometría de un dron submarino sobre la fuerza de arrastre experimental*. En *Congreso Estudiantil de Inteligencia Artificial Aplicada a la Ingeniería y Tecnología*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Estado de México, México.
3. Li, X., Zhang, D., Zhao, M., Wang, X., & Shen, Y. (2024). Hydrodynamic analysis and drag-reduction design of an unmanned underwater vehicle based on computational fluid dynamics. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(8), 1388. <https://doi.org/10.3390/jmse12081388>.
4. Ray, A., Singh, S., & Seshadri, V. (2009). Evaluation of linear and nonlinear hydrodynamic coefficients of underwater vehicles using CFD. En *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (Vol. 43444, pp. 257–265). Honolulu, HI, United States. <https://doi.org/10.1115/OMAE2009-79374>.
5. Javanmard, E., & Mansoorzadeh, S. (2019). A computational fluid dynamics investigation on the drag coefficient measurement of an AUV in a towing tank. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 12(3), 947–959. <https://doi.org/10.29252/jafm.12.03.29525>.
6. Robles Carrasco, G. (2015). *Diseño y estudio hidrodinámico de un submarino autónomo no tripulado (AUV)* [Trabajo Fin de Grado, Universidad Politécnica de Cartagena, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial]. Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/10317/4406>.
7. Le, T.-L., & Hong, D.-T. (2021). Computational fluid dynamics study of the hydrodynamic characteristics of a torpedo-shaped underwater glider. *Fluids*, 6(7), 252. <https://doi.org/10.3390/fluids6070252>.
8. Dantas, J., & de Barros, E. (2013). Numerical analysis of control surface effects on AUV manoeuvrability. *Applied Ocean Research*, 42, 168–181. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2013.06.002>.
9. Gurynenko, S. (2023). Simulation, CFD calculation and estimation of hydrodynamics coefficients of an autonomous unmanned underwater vehicle. *Problems of Control and Informatics*, 67(6), 5–13. <https://doi.org/10.34229/1028-0979-2022-6-1>.