









Artículo de investigación

Estudio y medición experimental del coeficiente de arrastre del casco de un dron submarino por medio de un túnel de viento

Study and experimental measurement of the drag coefficient of the hull of an underwater drone by means of a wind tunnel

Jesús Eduardo Rivera López , José Luis Arciniega Martínez , Guadalupe Juliana Gutiérrez Paredes , César Francisco Rodríguez Hibert , Cristian Ariel Martínez Cabrera , Carlos Alfonso Juárez Navarro 

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica unidad Azcapotzalco. Dirección:
Av. de la Granjas 682, Col. Santa Catarina, Delegación Azcapotzalco, CDMX. C.P. 02250.

Autor de correspondencia: Jesús Eduardo Rivera López, Instituto Politécnico Nacional SEPI – ESIME. UP Azcapotzalco, Av. de las Granjas 682, Santa Catarina, Azcapotzalco, 02550 Ciudad de México, México, jrivaler@ipn.mx, ORCID: 0000-0003-3988-9305.

Recibido: 18 de Octubre del 2024

Aceptado: 17 de Diciembre del 2024

Publicado: 13 de Enero del 2025

Resumen. – *El presente trabajo tiene como objetivo realizar el estudio, diseño y caracterización del casco de un dron submarino por medio de la medición experimental en un túnel de viento. Para ello, se realizó el diseño de concepto, el cual se construyó por medio de la manufactura aditiva. Las corridas experimentales se realizaron para dos tipos de superficies, plana y cilíndrica en la cabeza del casco del dron. Utilizando el Re se determinó las velocidades de la prueba en aire de 8, 10, 12, 14 y 16 m/s, de las corridas experimentales se midió la fuerza de arrastre F_D ; del ajuste de F_D se estimó que el error de sesgo es menor al 6 %, por lo que se puede decir que el error en las mediciones es aceptable y se puede realizar el escalamiento de los resultados. Los resultados del coeficiente de arrastre mostraron la reducción por crecimiento de capa límite $C_{D,\delta T}$ y de la comparación de las geometrías plana y cilíndrica en la cabeza del casco del dron mostraron que el $C_{D,p}$ de la superficie cilíndrica es 33.14 y 10.71 % más grande en comparación del $C_{D,p}$ de la superficie plana. Para validar de una mejor manera los resultados obtenidos, se compararon con otros diseños de geometrías de casco de drones submarinos, mostrando que las geometrías curvilíneas tienen un menor $C_{D,p}$, aproximadamente de 63.33 %, por lo cual este diseño no presenta el mejor resultado en arrastre en comparación con estas superficies. En la comparación con drones que no tienen casco y son geometrías de sección rectangular frontal, se tiene un 97.48 % menor arrastre, por lo cual, se puede indicar que este diseño tiene un mejor rendimiento en comparación con estas geometrías. Finalmente, se puede concluir que la geometría propuesta en este estudio tiene la longitud necesaria para disminuir el arrastre por crecimiento de capa límite y en la cabeza se debe diseñar con una superficie plana para tener un rendimiento mejorado al de los drones que no tienen casco.*

Palabras clave: Coeficiente de arrastre; Casco dron submarino; Túnel de viento; Similitud completa.

Abstract. - *The present work aims to study, design and characterize the hull of a submarine drone by means of experimental measurement in a wind tunnel. For this purpose, the concept design of the prototype was carried out, which was built using additive manufacturing. The experimental runs were performed for two types of surfaces, flat and cylindrical, on the drone hull head. Using the Re determined the test velocities in air were 8, 10, 12, 14 and 16 m/s. From the experimental runs, the drag force, F_D , was measured, and from the F_D adjustment, it was estimated that the bias error is less than 6%, so it can be said that the error in the measurements is acceptable, and the scaling of the results can be performed. The results of the drag coefficient showed the reduction by boundary layer growth $C_{D,\delta T}$ and from the comparison of the planar and cylindrical geometries on the drone hull head showed that the $C_{D,p}$ of the cylindrical surface is 33.14 and 10.71% larger compared to the $C_{D,p}$ of the planar surface. To validate in a better way the obtained results were compared with other designs of hull geometries have a lower $C_{D,p}$, approximately 63.33%, therefore this design does not present the best result in drag comparison with these surfaces, in the comparison with drones that do not have hull and are geometries of rectangular section, 97.48% less drag, therefore it can be indicated that this design has a better performance in comparison with these geometries. Finally, it can be concluded that the geometry proposed in this study has the necessary length to reduce drag due to a boundary layer with a flat surface to have improved performance compared to drones that do not have hull.*

Keywords: Drag coefficient; Underwater drone hull; Wind tunnel; Complete similarity.





1. Introducción

El uso de vehículos autónomos submarinos, AUVs, por sus siglas en inglés, ha ido cobrando relevancia en el área de la robótica [1]. Estos robots son ampliamente utilizados en la industria del gas y petróleo en aguas profundas y en general por la comunidad científica [2] en el monitoreo oceanográfico de los recursos, el medio ambiente y la ecología del océano circundante a las costas [3].

Otro uso importante se encuentra en la arqueología submarina, utilizándolos en la grabación y excavación, así como en la recuperación de objetos arqueológicos [4].

Estos robots pueden portar diversos dispositivos, como son cámaras para inspección visual, lámparas de iluminación, sensores para detectar contaminantes e incluso tener herramientas para realizar trabajos de mantenimiento, reparación de equipo, construcción de estructuras, etc. Las formas y geometrías utilizadas en los cascos de los AUVs son diversas y complejas, ya que muchos de los diseños propuestos tratan por medio de la biomimética de copiar, imitar o replicar las capacidades de un sistema biológico [5].

Algunos ejemplos de geometrías utilizadas son el de Abhra [5], quien realizó un estudio enfocado en el mecanismo de propulsión de un pez aplicado a un robot; otro ejemplo es el trabajo de Promode [6], quien realizó un estudio de la maniobrabilidad de los peces para ser aplicada a los cuerpos rígidos de los robots. Los parámetros más importantes en la caracterización hidrodinámica de las geometrías de los AUVs las menciona Jyoti [7], los cuales son el coeficiente de arrastre C_d , coeficiente de sustentación C_l y el coeficiente de presión C_p , también indica las instalaciones más importantes en la caracterización hidrodinámica de los AUVs,

como son el canal de arrastre, túnel de agua y el túnel de viento. La caracterización experimental del comportamiento hidrodinámico y cinemático de las geometrías de los cascos es amplia; por ejemplo, N. M. Nouri [8] realizó experimentos en un túnel de agua con el fin de estimar derivadas hidrodinámicas debidas a la aceleración y velocidad del casco del AUV con forma cilíndrica alargada.

Los experimentos se realizaron produciendo movimiento oscilatorio armónico con un mecanismo instalado corriente abajo del AUV y con dos tipos de movimiento: traslación ascendente (heave motion) y cabeceo (pitch motion). La máxima velocidad de la prueba fue de 5 m/s.

Sh. Mansoorzadeh [9] estudió los efectos de la superficie libre sobre el coeficiente de arrastre y de sustentación en el casco de un AUV con forma de cilindro alargado de dimensiones de $L = 145$ cm y $D = 23$ cm, para ello, realizó simulaciones numéricas y experimentales en un tanque de arrastre a diferentes profundidades en un intervalo de 0.87 a 5.22 veces el diámetro del AUV y en dos regímenes de flujo, Re , de 1.9×10^6 y 3.17×10^6 , los resultados obtenidos mostraron que el coeficiente de arrastre es una función de la velocidad y de la profundidad cuando el AUV se mueve a altas velocidades cerca de la superficie, y el arrastre es mayor cuando se mueve a mayor profundidad, las velocidades de la prueba estuvieron en el intervalo de 1.5 a 2.5 m/s.

P. Jagadeesh [10] realizó pruebas en un tanque de arrastre sobre un casco de un AUV de forma cilíndrica alargada con dimensiones de $L = 140$ cm y $D = 14$ cm, en un rango de velocidad de prueba de 0.4 a 1.4 m/s con ángulos de ataque de 0 a 15°, los resultados obtenidos fueron utilizados para estudiar la variación del coeficiente de la fuerza axial, normal, arrastre, sustentación y momento del ángulo de ataque en



función del número de Reynolds, los resultados muestran que los coeficientes de arrastre, sustentación y momento debido al ángulo de ataque aumentan 90, 182 y 297% respectivamente sobre la geometría del casco del AUV a 15° y Re de 3.65×10^5 .

Abdollah Sakaki [11] realizó estudios numéricos y experimentales para seis escalas de la geometría de un casco cilíndrico alargado de un AUV. Las simulaciones se realizaron utilizando la ecuación de Reynolds Average Navier-Stokes con un ángulo de ataque de 20° para diferentes relaciones de longitud-diámetro del AUV. Los resultados de esta investigación mostraron que no existe relación lineal entre las fuerzas y el momento con la velocidad lateral del AUV. El experimento se realizó a la velocidad de 2 m/s.

Faheem [12] investigó un sistema semi-empírico para obtener los coeficientes hidrodinámicos de un sistema complejo de dos AUV con casco de estructura tubular. Los resultados que obtuvo para el movimiento de elevación y balanceo (sway motion) concuerdan con los resultados de CFD, en donde el modelo de turbulencia que utilizó fue el de Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS). Así también, las condiciones de frontera utilizadas fueron de velocidad de entrada y presión de salida, sin embargo, para el movimiento de traslación (surge motion), los resultados que obtuvo no fueron satisfactorios debido a que no se consideró el efecto de la estela.

Lin Hong [13] realizó un estudio numérico sobre la estimación de los coeficientes hidrodinámicos de un AUV con forma de torpedo cilíndrico con dimensiones de 761.5, 435 y 220 mm de largo, ancho y alto respectivamente. Los experimentos se realizaron para los movimientos de surge, heave y yaw motion. Para las simulaciones utilizó el modelo RANS en estado estacionario y transitorio, los resultados de las simulaciones se

validaron experimentalmente en un canal de arrastre, teniendo un error máximo de 3.63 %.

Mehmet Zeki [14] enfocó su trabajo en los efectos de la forma geométrica de la cabeza del casco de un AUV en la resistencia, el rendimiento y las características de flujo. Para ello, utilizó las ecuaciones Myring para el diseño del perfil del casco del AUV, realizó simulaciones CFD; los experimentos numéricos los realizó para las velocidades de 0.3 a 1.4 m/s, en donde encontró que la cabeza del casco tiene una influencia importante sobre la presión y fricción de arrastre. También encontró que la forma de la cabeza permite extender una distancia significativa la capa límite hacia la cola antes de la separación.

Xuecheng Li [15] analizó el comportamiento hidrodinámico de un AUV de geometría compleja basada en una estructura rectangular utilizando CFD. La simulación muestra que la metodología de diseño utilizada reduce el arrastre en un 18%, donde el modelo de turbulencia utilizado fue el de SST $k-\omega$. Jian Liu [16] optimizó el proceso de diseño hidrodinámico empleando un modelo multisustituto para diseñar progresivamente la forma de un vehículo autónomo operado a distancia. La estructura del casco fue propuesta inicialmente con curvas elípticas para la cabeza, la cola y el cuerpo fue conectado por una curva polinómica. También realizó experimentos numéricos y en un túnel de viento para validar el diseño final.

Faheem Ahmed [17] reporta un estudio numérico para estimar el arrastre y sustentación de un AUV con forma de torpedo con alas de proa. El objetivo de este trabajo se enfocó en predecir el efecto de las alas de proa por medio de la dinámica de los fluidos computacionales bajo diferentes estilos de maniobrabilidad. El modelo de turbulencia utilizado fue el $k-e$ modificado, encontrando que las alas de proa demuestran



características mejoradas en sustentación y arrastre en comparación con el AUV sin las alas de proa.

Lin Hong [18] desarrolló una revisión exhaustiva de los prototipos de los AUVs existentes, en donde presentó los aspectos más relevantes del diseño hidrodinámico en los diferentes tipos de geometrías de los cascos, velocidades de prueba, modelos de turbulencia más utilizados en la simulación numérica, ventajas y desventajas de los modelos, etc; utilizando esta información, desarrolló un estudio numérico de una geometría de un AUV, encontrando que el error en la simulación del modelo DARPA SUBOFF fue más significativo en comparación con los de la simulación estacionaria, y que puede atribuirse a la complejidad e incertidumbre inherentes asociadas con el método de malla deslizante utilizado en simulaciones no estacionarias.

Harsh Vardhan [19] utilizó los recientes avances en optimización de CFD e inteligencia artificial para comparar estos dos enfoques en el diseño de un AUV. Por medio de la IA, desarrolló un modelo sustituto basado en redes neuronales profundas para aproximar las fuerzas de arrastre, encontrando que este modelo predice la fuerza de arrastre en estricta concordancia con las simulaciones CFD, con un error de 1.85%. Hongyi Du [20] realizó un estudio numérico de los efectos de la rugosidad del casco de un AUV sobre la resistencia al avance. Para ello, definió varios tipos de rugosidad superficial del casco desde 0.8 hasta 100 μm con velocidades de avance desde 1 hasta 2.5 m/s, encontrando que cuando la velocidad es de 1.5 m/s y la rugosidad es menor a 27.5 μm , la resistencia al avance es baja. También encontró que la resistencia total se agrava con el aumento de la velocidad de avance.

Finalmente, para las velocidades de avance de 1, 2 y 2.5 m/s, encontró los valores óptimos de la rugosidad de 39, 21.5 y 17 μm , respectivamente, la geometría de estudio fue la de un torpedo.

De la revisión bibliográfica se observan tres geometrías principales en la construcción de los cascos de los AUVs. La primera es en forma de torpedo, la segunda es un casco estructural formado por una estructura tubular y la última y menos común es la currentilínea, formada por elipses. Estos diseños geométricos han demostrado su eficiencia hidrodinámica en los diversos estudios numéricos y experimentales realizados, sin embargo, otro tipo de geometrías no han sido abordadas. Otro aspecto relevante de mencionar es el uso de canales hidrodinámicos y de arrastre como instalaciones en la caracterización de los drones.

Este trabajo utiliza como herramienta experimental un túnel de viento, ya que los flujos que desarrolla esta instalación se acoplan a las necesidades de este trabajo, además de que las velocidades de prueba no presentarán problemas de compresibilidad en el flujo, ya que el $Ma \ll 0.3$ y por lo tanto se tendrá similitud completa en las mediciones experimentales.

En conclusión, este trabajo tiene por objetivo estudiar geometrías no curvilíneas para el diseño de cascos de AUV y obtener su eficiencia hidrodinámica por medio de la caracterización experimental del coeficiente de arrastre en un túnel de viento.

2. Metodología de diseño y Resistencia al movimiento

2.1 Diseño de concepto y manufactura aditiva del prototipo

La propuesta geométrica se muestra en la figura 1, en donde se observan las dimensiones principales del casco del dron.

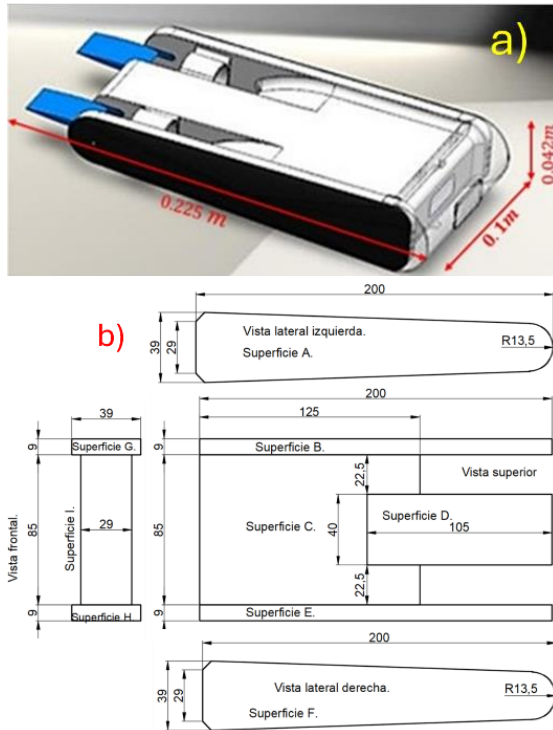


Figura 1. a) Modelo CAD y b) Vistas del modelo.

El concepto geométrico utilizado en el diseño de este casco de dron es por medio de secciones rectangulares con bordes redondeados, el cual está constituido por una proa con forma elíptica para reducir la resistencia; un cuerpo principal de dimensiones suficientes para permitir la adecuada instalación dentro del casco de dispositivos tales como es la instrumentación, electrónica, fuente de poder y fuente de energía; una popa con forma parabólica para reducir la generación de vórtices.



Figura 2. Prototipo fabricado.

La Figura 2 muestra el dron submarino, el cual fue fabricado por medio de manufactura aditiva con el uso de una impresora 3D modelo X2, Artillery, en material PLA Basic AMAZON[®], con una resistencia a la flexión de 55,3 MPa, resistencia a la tracción de 57,8 MPa y un módulo de elasticidad de 3,3 GPa. La manufactura se realizó en dos fases, la primera fase fue la tapa frontal y la segunda, el cuerpo principal.

2.2 Resistencia al movimiento en un medio viscoso

El movimiento del dron, en específico, la geometría del casco moviéndose en un medio viscoso como es el agua, ejercerá resistencia al movimiento. La fuerza total sobre el casco del dron que actúa paralela a la trayectoria del desplazamiento se conoce como fuerza de arrastre F_D . La fuerza total de arrastre sobre la geometría de estudio es la suma de los efectos de la distribución de la presión que actúa sobre la superficie frontal del dron, más la fuerza de arrastre debida a los esfuerzos de corte, τ , debidos al crecimiento de la capa límite, δ , sobre la superficie longitudinal del dron [23,24 y 25]; ver ecuación (1).

$$F_D = F_{D,p} + F_{D,\delta} \quad (1)$$

Donde:

F_D es la fuerza de arrastre total en (N).

$F_{D,p}$ es la fuerza de arrastre debida a la distribución de presión sobre el área frontal del Dron en (N).

$F_{D,\delta}$ es la fuerza de arrastre debida al crecimiento de la capa límite en (N).

El uso de coeficientes de arrastre hace práctico el cálculo, análisis y comparación de los resultados de los casos de estudio, por lo que, del análisis dimensional, se tiene que el coeficiente de arrastre por presión, $C_{D,p}$, es, ver ecuación (2).



$$C_{D,p} = \frac{F_{D,p}}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_f} \quad (2)$$

De igual manera, el coeficiente de arrastre por longitud debido al crecimiento de la capa límite, $C_{D,\delta}$, es, ver ecuación (3).

$$C_{D,\delta} = \frac{F_{D,\delta}}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_\delta} \quad (3)$$

Donde:

ρ es la densidad del fluido en (kg/m³)

U es la velocidad del flujo en (m/s)

A_f es el área frontal del prototipo en (m²)

A_δ es el área paralela al flujo donde se desarrolla la capa límite en (m²)

Cuando la superficie es perpendicular al flujo, el esfuerzo de corte, τ , es cero y la fuerza total de arrastre solo depende de $F_{D,p}$, por el contrario, cuando la superficie es paralela al flujo, el esfuerzo de corte, τ , es máximo y la fuerza total de arrastre solo depende de $F_{D,\delta}$. Para este diseño se tienen diversas superficies planas en el casco del dron, que son paralelas al flujo. Estas superficies se tratan como placas planas paralelas al flujo [23,24 y 25], por lo cual las ecuaciones que estiman el coeficiente de arrastre son:

$$C_\delta = \frac{1.33}{Re_L^{1/2}}, \quad Re_x < 5 \cdot 10^5 \quad (4)$$

$$C_\delta = \frac{0.074}{Re_L^{1/5}}, \quad 5 \cdot 10^5 \leq Re \leq 10^7 \quad (5)$$

Las ecuaciones (4) y (5) son para flujo laminar y turbulento, respectivamente.

3. Desarrollo experimental y similitud completa.

3.1 Instalación experimental

Fabricado el prototipo con las dimensiones propuestas, se procede a realizar el experimento en un túnel de viento subsónico de la marca Arfield®, ver figura 3. El túnel tiene un área de prueba de 30.5 x 30.5 cm, una campana con panel direccionador de flujo, un motor eléctrico de 2.0 Hp de corriente directa, el cual le permite el control de la velocidad por medio de un reóstato; la velocidad máxima que puede desarrollar es de 26 m/s.

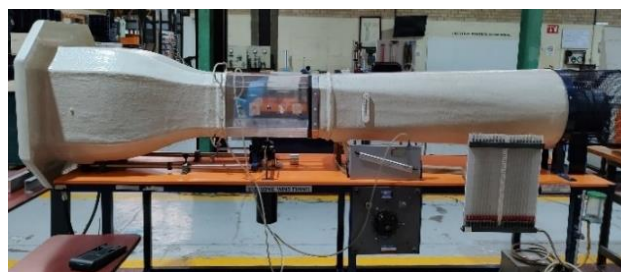


Figura 3. Túnel de viento subsónico.

Para medir la fuerza de arrastre y sustentación durante las corridas experimentales, el túnel de viento tiene instalada en el área de pruebas una balanza dinamométrica, ver figura 4, las balanzas tienen un rango de 0 a 2 N con una resolución de 0.01 N. Como se observa en la figura 4 el área de pruebas es lo suficientemente grande respecto al prototipo para que las paredes de la sección de pruebas no produzcan perturbación sobre el desarrollo del flujo sobre el prototipo, por lo cual, se puede considerar un área infinita, así también, el prototipo es fijado a la balanza por medio de una varilla de acero inoxidable de diámetro de 4.05 mm, esta varilla es lo suficientemente esbelta para despreciar los efectos de arrastre sobre las mediciones finales.

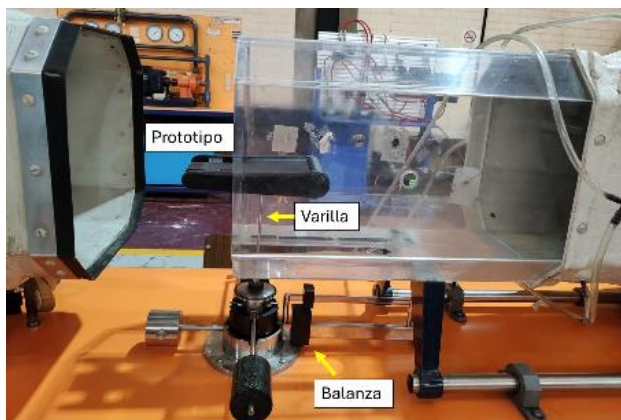


Figura 4. Prototipo instalado en el área de pruebas sobre la balanza dinamométrica.

La medición de la velocidad y temperatura se realizó por medio de un anemómetro de hilo caliente unidimensional de la marca AMPROBE[®]. Para velocidad tiene un rango de 0.1 a 30 m/s con una resolución de 0.01 m/s y para la temperatura tiene un rango de -10 a 60 °C con una resolución de 0.1 °C.

3.2 Similitud de la prueba

Este vehículo se mueve en agua, la temperatura estimada es de 21 °C, ya que este dron se tiene proyectado utilizar en la exploración topográfica y arqueológica de cenotes [26]. La literatura [18] proporciona el intervalo de velocidad de operación de los drones, el cual oscila entre 0.052 m/s hasta los 4 m/s. Tomando en consideración este intervalo de velocidad, se estima que este dron se mueve con las velocidades en agua de 0.54, 0.67, 0.81, 0.94 y 1.08 m/s.

El experimento se realizó en aire; por lo tanto, se necesita tener similitud completa [23, 24 y 25]. Para lograr la similitud, el prototipo y el modelo son el mismo; no cambio la escala, por lo cual se cumple con la primera similitud, geométrica. La similitud cinemática y dinámica se podrán conseguir con el número de Reynolds, ecuación (6).

$$Re = \frac{\bar{V}L}{\nu} \quad (6)$$

Donde:

\bar{V} es la velocidad promedio en (m/s)

L es la longitud característica del prototipo en (m)

ν es la viscosidad cinemática del fluido en (m²/s)

La similitud completa se logra igualando el número de Reynolds de agua y aire, ecuación (7).

$$Re_{H2O} = Re_{Aire}$$

$$\left(\frac{\bar{V}L}{\nu}\right)_{H2O} = \left(\frac{\bar{V}L}{\nu}\right)_{Aire} \quad (7)$$

Al ser la geometría del prototipo y modelo iguales, la velocidad de la prueba en el túnel de viento quedará de la siguiente forma, ecuación (8).

$$\bar{V}_{Aire} = \bar{V}_{H2O} \left(\frac{\nu_{Aire}}{\nu_{H2O}}\right) \quad (8)$$

Con la ecuación (8) se determinan las velocidades de la prueba en aire, las cuales son de 8, 10, 12, 14 y 16 m/s, para los valores de $\nu_{agua} = 1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y $\nu_{aire} = 1.488 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ para las temperaturas de 21 y 18 °C respectivamente.

3.3 Corridas experimentales

El prototipo se instaló en el área de pruebas sobre la balanza dinamométrica, ver figura 5 (a), la balanza se calibró a cero para la medición de la fuerza de arrastre y sustentación; el casco se alineó paralelo al flujo, ya que el caso que se estudió se realizó para translación (surge motion), ver figura 5 (b). Instalada la geometría, se procedió a realizar las corridas experimentales



a las velocidades de la prueba. Es importante señalar que se hicieron dos pruebas; la primera prueba se realizó con una geometría cilíndrica en la parte frontal y la segunda prueba se realizó con una geometría plana con bordes redondeados, ver figura 5 (c).

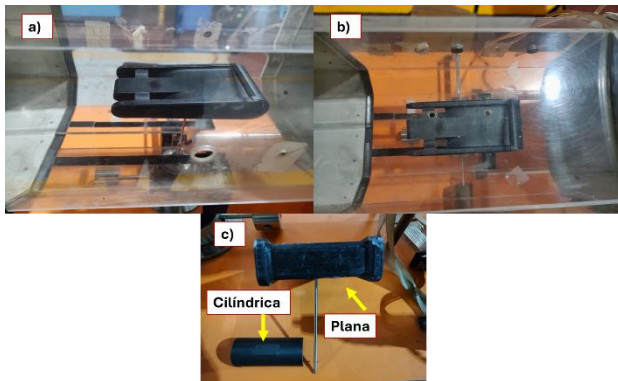


Figura 5. Montaje del casco en el área de pruebas, a) instalación sobre la balanza y b) alineación en la dirección del flujo, c) superficies cilíndrica y plana.

El objetivo de estas pruebas es el tener un mejor entendimiento de la afectación de la geometría frontal del casco sobre el desarrollo de las fuerzas de arrastre por presión; los resultados de la prueba se muestran en la figura 6.

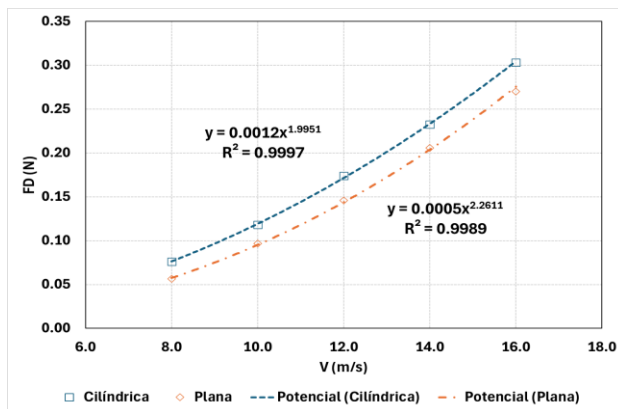


Figura 6. Medición de F_D , para los dos casos de estudio.

De la figura 6 se puede observar el incremento de la fuerza de arrastre para cada aumento de la velocidad del flujo. La superficie cilíndrica en la cabeza del dron genera una mayor fuerza de

arrastre en comparación con la superficie plana para iguales condiciones de flujo. La tendencia de los datos es potencial con pendiente positiva; de los datos experimentales obtenidos se realizó el ajuste de los datos.

Del ajuste se obtuvieron las ecuaciones (9) y (10); en la figura 6 se muestra el factor de calidad del ajuste, el cual indica la buena calidad del ajuste, ya que $R^2 \approx 1$. Comparando los resultados de esta prueba con los realizados por Jian Liu [16] en un túnel de viento, se puede observar una tendencia de datos similar a los obtenidos por este trabajo, a pesar de que las pruebas se realizaron a flujos diferentes y con geometrías diferentes. Otro aspecto importante, es que la geometría con cabeza cilíndrica propuesta por este trabajo tiene un 45.45 % menor resistencia al arrastre comparada con [16].

Esta última comparación se realizó entre las geometrías que generan la mayor resistencia al arrastre en el punto de máxima velocidad, por lo que se puede concluir que las pruebas realizadas y las geometrías propuestas por este trabajo presentan buenos resultados.

$$F_D = 0.0005V^{2.2611} \quad (9)$$

$$F_D = 0.0012V^{1.9951} \quad (10)$$

Las ecuaciones (9) y (10) son las ecuaciones potenciales de la fuerza de arrastre del dron para los casos de las secciones plana y cilíndrica, respectivamente. El error máximo estimado es de 5.54 y 1.99 % y el error mínimo estimado es de 2.22 y 0.09 % para las secciones plana y cilíndrica, respectivamente; ver tabla 1. De forma general, el error de sesgo experimental es sumamente bajo, esto se puede atribuir a un estricto rigor experimental, por lo que se puede decir que el error en las mediciones es aceptable y se puede realizar el escalamiento de los resultados.



Tabla 1. Comparación de la fuerza de arrastre experimental, F_{Dexp} , con la fuerza teórica, F_{Dteo} , y el error de la prueba.

Cilíndrica			Plana		
F_{Dexp} (N)	F_{Dteo} (N)	% e	F_{Dexp} (N)	F_{Dteo} (N)	% e
0.076	0.076	0.41	0.057	0.055	2.52
0.118	0.119	0.27	0.097	0.091	5.64
0.174	0.171	1.99	0.146	0.138	5.54
0.233	0.232	0.14	0.206	0.195	5.17
0.303	0.303	0.09	0.270	0.264	2.22

3.4 Estimación del Arrastre

Con los resultados obtenidos de la medición experimental en el túnel de viento, se procede ahora a escalar la fuerza de arrastre en aire a la fuerza de arrastre en agua, para ello, se utiliza el coeficiente de arrastre, C_D , donde se iguala el coeficiente de arrastre de la prueba en aire con el coeficiente de arrastre en agua, ecuación (11).

$$C_{Daire} = C_{Dagua} \quad (11)$$

Donde el C_D es igual a:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \bar{V}^2 A \rho} \quad (12)$$

Sustituyendo ecuación (12) en (11), se tiene:

$$\left(\frac{F_D}{\frac{1}{2} \bar{V}^2 A \rho} \right)_{aire} = \left(\frac{F_D}{\frac{1}{2} \bar{V}^2 A \rho} \right)_{agua} \quad (13)$$

Donde el área permanece constante, ya que el prototipo y el modelo tienen la misma escala, por lo que la fuerza de arrastre para agua queda:

$$F_{Dagua} = F_{Daire} \left(\frac{\bar{V}_{agua}}{\bar{V}_{aire}} \right)^2 \left(\frac{\rho_{agua}}{\rho_{aire}} \right) \quad (14)$$

Con la ecuación (14) se tiene la similitud completa y se pueden escalar los resultados de la prueba de aire a agua; los resultados se muestran en la figura 7, los resultados se ajustan y se obtienen las ecuaciones (15) y (16), sección plana y cilíndrica respectivamente. Se muestra también el factor de calidad del ajuste, el cual es aproximadamente uno, $R^2 \approx 1$. Las propiedades de la sustancia son, $\rho_{agua} = 998.08 \text{ kg/m}^3$ y $\rho_{aire} = 1.2124 \text{ kg/m}^3$ para una temperatura de 21 (prueba) y 18 (de operación) °C, respectivamente.

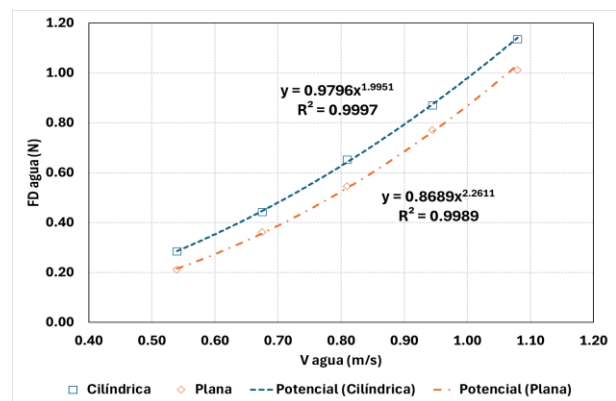


Figura 7. Resultados del escalamiento de F_D , para los dos casos de estudio.

$$F_D = 0.8686V^{2.2611} \quad (15)$$

$$F_D = 0.9796V^{1.9951} \quad (16)$$

La figura 7 muestra la estimación de la fuerza de arrastre para el caso de traslación rectilínea en agua, a una profundidad suficiente para que no sea perturbado por efectos de superficie [7-20]. Las ecuaciones (15) y (16) son los modelos empíricos de F_D para el caso de superficie plana y cilíndrica, respectivamente. A continuación, se estimará el coeficiente de arrastre, C_D , de cada una de las superficies que conforman el casco del dron; para ello, se identifican las superficies y la



manera como interactúan con el flujo, ver figura 1. Las superficies A hasta F son superficies paralelas al flujo, por lo cual se estiman utilizando las ecuaciones (4) y (5), y las superficies G, H e I son las superficies perpendiculares al flujo, y se estiman con la ecuación (2). El área frontal de la superficie cilíndrica es la mitad de un cilindro con longitud $L = 0.1$ m y diámetro $D = 0.041$ m.

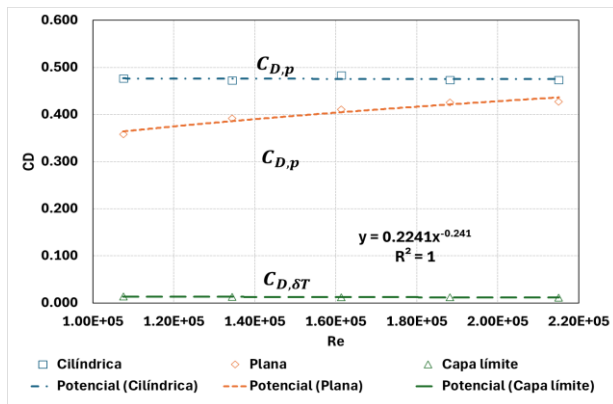


Figura 8. Variación del coeficiente de arrastre $C_{D,p}$ y $C_{D,\delta T}$ en función de Re .

4. Resultados y validación

La figura 8 muestra valores de arrastre muy bajos para el caso por crecimiento de capa límite, como se observa para la velocidad inicial de la prueba se tiene un $Re = 1.08 \times 10^5$ con un $C_{D,\delta T} = 0.014$ y para la velocidad máxima de la prueba se tiene un $Re = 2.15 \times 10^5$ con un $C_{D,\delta T} = 0.012$ por lo que se distingue una disminución del arrastre del 14.3 % por reducción de crecimiento de la capa límite para el aumento del régimen de flujo sobre la superficie longitudinal del casco del dron, por lo que se puede concluir que la extensión del casco del dron es suficiente para que el flujo se desarrolle y alcance el flujo turbulento, y por consiguiente, la longitud propuesta para este diseño es adecuada.

A la dispersión de los datos se le realiza un ajuste y se obtiene la ecuación (17); para este ajuste, el

factor de calidad fue igual a uno, $R^2 = 1$. Este modelo empírico es una propuesta para poder estimar el arrastre sobre la superficie longitudinal del casco de cualquier dron submarino. Cabe señalar que se necesitan realizar pruebas para fundamentar este modelo; esta propuesta es válida para el rango de flujo de $1.08 \times 10^5 \leq Re \leq 2.15 \times 10^5$.

$$C_{D,\delta T} = \frac{1.1203}{Re^{0.241}} \quad (17)$$

La figura 8 igualmente muestra la estimación del coeficiente de arrastre por presión, $C_{D,p}$, para el caso de la superficie plana y cilíndrica en la cabeza del casco del dron. Los resultados muestran, para el caso de la superficie plana, un ligero incremento del arrastre, ya que la curva tiene pendiente positiva.

Para el Re inicial se tiene un valor de $C_{D,p} = 0.36$ y para el régimen de flujo final de la prueba se tiene un $C_{D,p} = 0.43$, por lo que se tiene un incremento del arrastre para esta superficie de 16.66 % con el aumento del régimen de flujo. En el caso de la superficie cilíndrica, el $C_{D,p}$ es más grande en comparación con el caso de la superficie plana, 33.14 y 10.71 %, y se mantiene constante el arrastre para cada incremento del régimen de flujo, $C_{D,p} = 0.48$. Por lo cual, se muestra que la superficie cilíndrica genera condiciones de flujo adversas y, derivado de esto, el arrastre es mayor, y, por tanto, se debe optar por diseñar el dron con la superficie plana en la cabeza del casco.

Para validar de mejor manera el diseño propuesto de la geometría del dron, los resultados obtenidos de la fuerza y coeficiente de arrastre son comparados con las geometrías propuestas por otros trabajos. Para ello, se utiliza la ecuación (15), la cual se sustituirá en la ecuación (1), y se obtiene la ecuación (18).



$$C_{D,p} = \frac{0.8686V^{2.2611}}{\frac{1}{2}V^2A\rho} \quad (18)$$

La ecuación (18) tiene por objetivo el cálculo del $C_{D,p}$ de las referencias consultadas, ya que estos trabajos no muestran este cálculo. Los datos geométricos y de velocidad necesarios para el cálculo del $C_{D,p}$ se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Datos geométricos y velocidad de las referencias consultadas.

Referencia	Forma	Geometría (m)	Velocidad (m/s)
[13]	Cilindro	D = 0.235, L = 0.7615	0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6
[14]	Torpedo	D = 0.28, L = 1.521	0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3.
[16]	Elipsoide	D = 0.15, L = 0.5	3.08, 5.14, 6.17, 7.20, 8.23.
[20]	Torpedo	D = 0.234, L = 1.742	0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25
[21]	Torpedo	D = 0.28, L = 0.737	0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3.

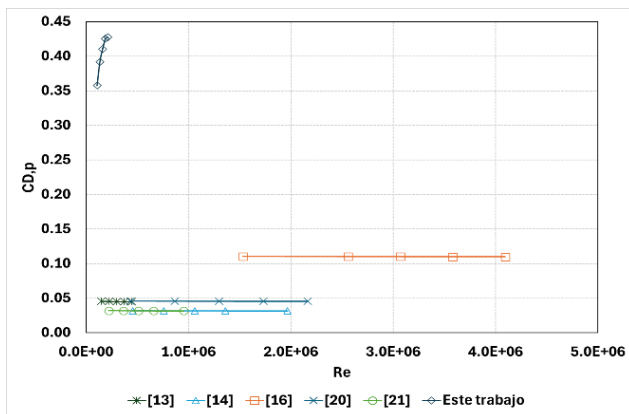


Figura 9. Comparación del $C_{D,p}$ con otros trabajos.

En la figura 9 se muestra el comportamiento del $C_{D,p}$ de las geometrías estudiadas por las referencias [13, 14, 16, 20 y 21], así como la comparación del coeficiente de arrastre de cada geometría con los resultados obtenidos por este trabajo. De la gráfica se observa que las geometrías curvilíneas tienen un menor $C_{D,p}$; el resultado más cercano es de 63.33 % respecto al trabajo de [16], el cual tiene una forma curva más pronunciada respecto a las geometrías de torpedo y cilíndrica [13, 14, 20 y 21]. Como se advierte, el arrastre menor se tendrá con estas dos últimas geometrías.

De estos resultados se observa que el diseño propuesto en este trabajo no presenta el mejor resultado en arrastre en comparación con las superficies curvilíneas, esto es debido a que el área frontal propuesta provoca un arrastre altamente desfavorable, por lo cual, en el proceso de rediseño, se optimiza el área superficial del casco para disminuir el arrastre. Finalmente, en la figura 10 se compara la fuerza de arrastre reportada por [15] y [22] con la de este trabajo. La importancia de comparar los resultados obtenidos con los diseños estudiados por [15] y [22] radica en que no utilizan superficies curvilíneas y no tienen casco, por lo cual, las superficies frontales de estos drones no ayudan a la reducción de la fuerza de arrastre.

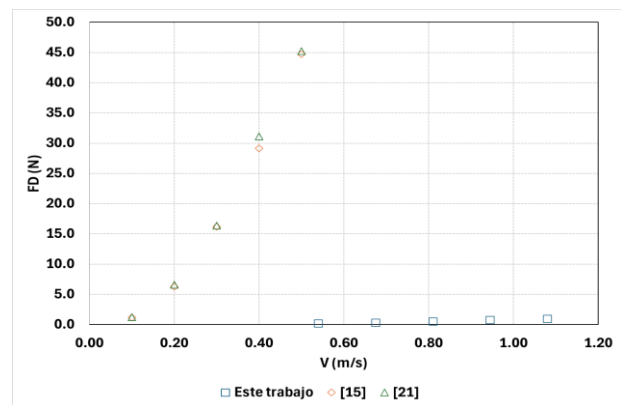


Figura 10. Comparación de F_D con otros trabajos.



Como se observa en la figura 10, la fuerza de arrastre es menor para este diseño en comparación con las referencias citadas; en el punto de mayor diferencia se tiene 97.48 % menor arrastre, por lo cual se puede indicar que este diseño tiene un mejor rendimiento en comparación con estas geometrías.

La figura 10 muestra, para el caso de los prototipos de las referencias [15] y [22], un incremento considerable de la fuerza de arrastre: 44.04 N desde la velocidad de 0.1 hasta 0.5 m/s. Por el contrario, en el diseño propuesto por este trabajo, la fuerza de arrastre solo aumenta 0.92 N desde la velocidad de 0.54 hasta 1.08 m/s. Por lo que se puede observar, para la condición en donde la velocidad fue más alta, el incremento de la fuerza de arrastre es menor y constante para cada aumento de la velocidad, por lo que se puede concluir que este prototipo tiene un mejor desempeño hidrodinámico en comparación a los prototipos que no tienen casco.

5. Conclusiones

De los resultados obtenidos se puede concluir que:

1. El rigor en el procedimiento experimental fue correcto, ya que el máximo error de sesgo fue menor al 6 %, por lo cual los resultados son válidos para ser utilizados en el cálculo del coeficiente de arrastre.
2. Los resultados del coeficiente de arrastre mostraron la reducción por crecimiento de capa límite $C_{D,\delta T}$ para cada aumento del régimen de flujo sobre la superficie del casco del dron. También se observa que la longitud del casco es suficiente para que el flujo se desarrolle y alcance el flujo turbulento y, por consiguiente, el arrastre sobre la superficie sea bajo y disminuya para cada aumento de la velocidad, por lo cual se puede concluir

que la longitud propuesta para este diseño es adecuada.

3. Los resultados muestran, para el caso de la superficie plana, el incremento del $C_{D,p}$ para cada aumento del régimen de flujo, para el caso de la superficie cilíndrica, el $C_{D,p}$ es más grande en comparación con el caso de la superficie plana y se mantiene constante para los incrementos del régimen de flujo. Para las velocidades de 0.54 y 1.08 m/s, el $C_{D,p}$ de la superficie cilíndrica es 33.14 y 10.71 % más grande en comparación del $C_{D,p}$ de la superficie plana, por lo cual se evidencia que esta superficie curvilínea genera condiciones de flujo adversas y, por consiguiente, un aumento en el arrastre. Por tanto, se debe optar por diseñar el dron con la superficie plana en la cabeza del casco.
4. Los resultados obtenidos se compararon con otras geometrías; los resultados mostraron que las geometrías curvilíneas tienen un menor $C_{D,p}$; el resultado más cercano es de 63.33 % respecto al trabajo de [16], el cual tiene una forma curva más pronunciada respecto a las geometrías de torpedo y cilíndrica [13, 14, 20 y 21]. De estos resultados se distingue que el diseño propuesto en este trabajo no presenta el mejor resultado en arrastre en comparación con las superficies curvilíneas, esto debido a que el área frontal proyectada provoca un arrastre altamente desfavorable, por lo cual, en el proceso de rediseño, se optimizará esta área superficial del casco para disminuir el arrastre. Finalmente, se comparó la fuerza de arrastre reportada por [15] y [22] con la de este trabajo, encontrando que la fuerza de arrastre es menor para este diseño en comparación con las referencias citadas. En el punto de mayor diferencia se tiene 97.48 % menor arrastre, por lo cual se puede indicar que



este diseño tiene un mejor rendimiento en comparación con estas geometrías.

5. Finalmente, este trabajo, por medio de los resultados obtenidos muestra cómo las geometrías no curvilíneas pueden ser utilizadas en el diseño geométrico de cascos de drones submarinos, debido al buen desempeño hidrodinámico mostrado. Así también se destaca el uso del túnel de viento como una alternativa en la caracterización de dispositivos submarinos, ya que el costo y tamaño de los canales hidrodinámicos y de arrastre los hace una opción poco frecuente en las universidades y centros de investigación.

6. Reconocimiento a autores

Jesus Eduardo Rivera López: Administración de proyecto de investigación SIP20241368, Estudio experimental de la reducción del arrastre para el diseño óptimo de la geometría hidrodinámica del casco de un dron submarino para el uso eficiente de la movilidad. *José Luis Arciniega Martínez:* Análisis formal numérico y experimental. *Guadalupe Juliana Gutiérrez Paredes:* Borrador Original. *Carlos Alfonso Juárez Navarro:* Revisión y edición de versión final. *César Francisco Rodríguez Hibert:* Análisis de datos numéricos y experimentales. *Cristian Ariel Martínez Cabrera:* Escritura del artículo.

Referencias

- [1] S. S. d C. Botelho, P. L. J. Drews Junior, M. da S. Figueiredo, C. H. D. Rocha, y G. L. Oliveira, “Appearance-based odometry and mapping with feature descriptors for underwater robots”, *Journal of the Brazilian Computer Society*, vol.15, pp.47–54, Sep. 2009. <https://doi.org/10.1007/BF03194505>
- [2] E. Kelasidi, P. Liljebäck, K. Y. Pettersen, y J. T. Gravdahl, “Experimental investigation of efficient locomotion of underwater snake robots for lateral undulation and eel-like motion patterns”, *Robotics and Biomimetics.*, vol. 2, pp. 1-27, Dec. 2015. <https://doi.org/10.1186/s40638-015-0029-4>
- [3] Y.-C. Lin y D.N. Zhang, “Experimental and numerical investigations on undulatory motion of a soft-fin-based underwater robot”, *Journal of Mechanics*, vol. 38, pp. 273–283, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1093/jom/ufac021>
- [4] S. Hotta, Y. Mitsui, M. Suka, N. Sakagami, y S. Kawamura, “Lightweight underwater robot developed for archaeological surveys and excavations”, *ROBOMECH Journal*, vol. 10, pp. 1-14, Jan. 2023. <https://doi.org/10.1186/s40648-023-00240-4>
- [5] A. R. Chowdhury, V. Kumar, B. Prasad, R. Kumar, y S. K. Panda, “Kinematic study and implementation of a bio-inspired robotic fish underwater vehicle in a Lighthill mathematical framework”, *Robotics and Biomimetics*, vol. 1, pp. 1-16, Nov. 2014. <https://doi.org/10.1186/s40638-014-0015-2>
- [6] P. R. Bandyopadhyay, “Maneuvering hydrodynamics of fish and small underwater vehicles”, *Integrative and Comparative Biology*, vol. 42, pp. 102–117, Feb. 2002. <https://doi.org/10.1093/icb/42.1.102>
- [7] J. Panda, A. Mitra, y H. Warrior, “A review on the hydrodynamic characteristics of autonomous underwater vehicles”, *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, vol. 235, pp. 15–29, Jan. 2020. <https://doi.org/10.1177/1475090220936896>



- [8] N. M. Nouri, K. Mostafapour, y R. Bahadori, “An apparatus to estimate the hydrodynamic coefficients of autonomous underwater vehicles using water tunnel testing”, *Review of Scientific Instruments*, vol. 87, Jun. 2016. <https://doi.org/10.1063/1.4950899>
- [9] S. Mansoorzadeh y E. Javanmard, “An investigation of free surface effects on drag and lift coefficients of an autonomous underwater vehicle (AUV) using computational and experimental fluid dynamics methods”, *Journal of Fluids and Structures*, vol. 51, pp. 161–171, Nov. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2014.09.001>
- [10] P. Jagadeesh, K. Murali, y V. G. Idichandy, “Experimental investigation of hydrodynamic force coefficients over AUV hull form”, *Ocean Engineering*, vol. 36, pp. 113–118, Jan. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.11.008>
- [11] A. Sakaki, y M. Kerdaadi, “Experimental and numerical determination of the hydrodynamic coefficients of an autonomous underwater vehicle”, *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, Vol. 62, pp 124-135, Jun. 2020. <https://doi.org/10.17402/427>
- [12] F. U. Rehman, L. Huang, E. Anderlini, y G. Thomas, “Hydrodynamic modelling for a transportation system of two Unmanned Underwater Vehicles: Semi-empirical, numerical and experimental analyses”, *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, pp. 500, May. 2021. <https://doi.org/10.3390/jmse9050500>
- [13] L. Hong, X. Wang, D. Zhang, y H. Xu, “Numerical study on hydrodynamic coefficient estimation of an underactuated underwater vehicle”, *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, pp. 1049, Jul. 2022. <https://doi.org/10.3390/jmse10081049>
- [14] M. Z. Sener y E. Aksu, “The effects of head form on resistance performance and flow characteristics for a streamlined AUV hull design”, *Ocean Engineering*, vol. 257, pp. 1-13, Aug. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111630>
- [15] X. Li, D. Zhang, M. Zhao, X. Wang, y Y. Shen, “Hydrodynamic analysis and drag-reduction design of an Unmanned Underwater Vehicle based on Computational Fluid Dynamics”, *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, pp. 1-26, Aug. 2024. <https://doi.org/10.3390/jmse12081388>
- [16] J. Liu, Q. Yue, S. Wu y X. Yue., “Hydrodynamic shape optimization of an autonomous and remotely operated vehicle via a multi-surrogate model”, *Brodogradnja*, vol. 75, pp. 1–19, Mar. 2024. <https://doi.org/10.21278/brod75301>
- [17] F. Ahmed, X. Xiang, H. Wang, G. Xiang, y S. Yang, “CFD-based lift and drag estimations of a novel flight-style AUV with bow-wings: Insights from drag polar curves and thrust estimations”, *Journal of Marine Science and Application*, vol. 23, pp. 352–365, May. 2024. <https://doi.org/10.1007/s11804-024-00420-7>
- [18] L. Hong, X. Wang, y D.-S. Zhang, “CFD-based hydrodynamic performance investigation of autonomous underwater vehicles: A survey”, *Ocean Engineering*, vol. 305, pp. 1-22, Aug. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117911>
- [19] H. Vardhan, D. Hyde, U. Timalisina, P. Volgyesi, y J. Sztipanovits, “Sample-efficient and surrogate-based design optimization of



underwater vehicle hulls”, *Ocean Engineering*, vol. 311, pp. 1-14, Jul. 2024.

<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118777>

[20] H. Du, T. Yan, T. Sun, S. Liu, B. He, y X. Wei, “Study of CFD prediction and surface roughness effect on AUV hull resistance performance”, *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 29, pp. 747-765, Aug. 2024.
<https://doi.org/10.1007/s00773-024-01011-5>

[21] T. Gao, Y. Wang, Y. Pang, y J. Cao, “Hull shape optimization for autonomous underwater vehicles using CFD”, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 10, pp. 599–607, Sep. 2016.

<https://doi.org/10.1080/19942060.2016.1224735>

[22] Q. Li, Y. Cao, B. Li, D. M. Ingram, y A. Kiprakis, “Numerical modelling and experimental testing of the hydrodynamic characteristics for an open-frame remotely operated vehicle”, *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, pp. 688, Sep. 2020.
<https://doi.org/10.3390/jmse8090688>

[23] F. White, *Mecánica de fluidos*, España, Interamericana de España: McGraw-Hill, 2004.

[24] R. Fox y A. McDonald, *Introducción a la mecánica de fluidos*, México, Interamericana de México: McGraw-Hill, 1995.

[25] Y. Cengel y J. Cimbala, *Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones*, México, Interamericana de México: McGraw-Hill, 2006.

[26] A. Mallios, P. Ridao, D. Rivas, M. Carreras y R. Carmilli, “Toward Autonomous Exploration in Confined Underwater Environments”, *Journal of field robotics*, vol.33, pp.994-1012, Nov. 2015. <https://doi.org/10.1002/rob.21640>

Derechos de Autor (c) 2025 Jesús Eduardo Rivera López, César Francisco Rodríguez Hibert, Guadalupe Juliana Gutiérrez Paredes, José Luis Arciniega Martínez, Cristian Ariel Martínez Cabrera, Carlos Alfonso Juárez Navarro



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)