

## OPTIMIZACIÓN DE HÉLICES MARINAS: UNA METODOLOGÍA DE DOS ETAPAS CON ALGORITMOS DE REGIÓN DE CONFIANZA Y MÉTODO NELDER-MEAD CON OPENFOAM

### MARINE PROPELLER OPTIMIZATION: A TWO-STAGE METHODOLOGY WITH TRUST-REGION ALGORITHMS AND NELDER-MEAD METHOD WITH OPENFOAM

Nicolás A. Antonelli<sup>a,b,c</sup>, Gustavo E. Carr<sup>b,c</sup> y Santiago A. Urquiza<sup>a,c</sup>

<sup>a</sup>Grupo HidroSim, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mar del Plata, Buque Pesquero Dorrego N° 281, Mar del Plata, Argentina, [email:hidrodinamica@mdp.utn.edu.ar](mailto:hidrodinamica@mdp.utn.edu.ar)

<sup>b</sup>CONICET - Mar del Plata, Argentina, <http://mardelplata-conicet.gov.ar/>

<sup>c</sup>Grupo de Ingeniería Asistida por Computadora (GIAC), Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ingeniería, Juan B. Justo N° 4302, Mar del Plata, Argentina, [email:ingenier@fi.mdp.edu.ar](mailto:ingenier@fi.mdp.edu.ar)

**Palabras clave:** Hidrodinámica Naval, Fluidodinámica Computacional, Optimización de formas..

#### Resumen.

Las hélices son fundamentales en las embarcaciones, ya que transforman la energía del motor en empuje, afectando su operación y eficiencia. Una selección incorrecta puede generar problemas de velocidad, maniobrabilidad y alto consumo de combustible. Es crucial desarrollar metodologías con herramientas de CFD para realizar estimaciones preliminares en el diseño y asegurar eficiencia y seguridad. Este trabajo propone un enfoque de optimización en dos etapas: primero, usando un algoritmo multivariable de región de confianza, y luego un método Nelder-Mead combinado con restricciones aplicadas mediante Newton-Raphson en OpenFoam. Se estudian variaciones geométricas en hélices de la serie B, obteniendo mejoras en su rendimiento bajo condiciones operativas específicas.

**Keywords:** Marine hydrodynamics, Computational Fluid Dynamics, Shape optimization.

#### Abstract.

Propellers are essential in vessels as they convert engine energy into thrust, influencing their operation and efficiency. An incorrect selection can lead to issues with speed, maneuverability, and high fuel consumption. It is crucial to develop methodologies using CFD tools to make preliminary design estimations and ensure efficiency and safety. This work proposes a two-stage optimization approach: first, using a multivariable trust-region algorithm, followed by the Nelder-Mead method combined with constraints applied via Newton-Raphson in OpenFoam. Geometric variations in B-series propellers are studied, yielding performance improvements under specific operational conditions.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las hélices marinas han sido cruciales para la propulsión de barcos durante los últimos 150 años. Su uso comenzó a popularizarse a principios del siglo XIX, aunque los primeros diseños y experimentaciones con hélices fueron más bien rudimentarios y basados en conceptos como el tornillo de Arquímedes. Con el tiempo, el diseño de hélices pasó de ser un pasatiempo experimental a una disciplina más rigurosa. A inicios del siglo XX, el ensayo de propulsor aislado en aguas libres, que simula el flujo de agua alrededor de una hélice, permitió a los ingenieros evaluar mejor las características de torque y empuje, así como el fenómeno de la cavitación (Yeo y Hau, 2014; Carlton, 2007).

Esto condujo al desarrollo de hélices de serie, configuraciones no dimensionales que podían escalarse y adaptarse a diversas embarcaciones, lo que redujo significativamente los costos y permitió un diseño más eficiente. La serie B de Wageningen se convirtió en una de las más importantes, estableciendo un estándar en la industria del diseño de hélices (Kuiper, 1992; Adam et al., 2020).

El proceso de optimización necesita primeramente resolver el flujo, para lo cual se utilizan diversas técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD) que van desde los métodos de flujo potencial hasta los métodos basados en RANS. La mayoría de los códigos de panel utilizados para hélices siguen un enfoque numérico directo que resuelve directamente el flujo potencial y determina las velocidades por diferenciación numérica. Sin embargo, su principal desventaja es que tratan con flujo incompresible (ideal) y deben incluir modelos de corrección para los efectos viscosos (Lee et al., 2014).

El enfoque RANS en el contexto de las predicciones de rendimiento de hélices ha sido ampliamente evaluado durante la última década, siendo el modelo de turbulencia de dos ecuaciones  $k-\omega$  uno de los más utilizados (Bhattacharyya et al., 2016). La importancia de los efectos de escala es fundamental en la evaluación precisa del rendimiento hidrodinámico de hélices, ya que influyen en cómo se extrapolan los resultados obtenidos a partir de modelos a escala a las condiciones reales. En (Krasilnikov et al., 2009) se analizan los métodos de ITTC para predecir el impacto del número de Reynolds en condiciones a escala real, señalando que dichos efectos dependen de la geometría de la pala y la carga de la hélice. Se ha demostrado que el efecto de la rugosidad de la superficie se puede simular con precisión (Demirel et al., 2014). Por otra parte, recientemente, se han utilizado técnicas avanzadas como LES y DES, pero de manera limitada debido a su alto costo y complejidad en el análisis (Verma et al., 2011).

Los algoritmos de optimización implementarse de distintas maneras, empleando variados algoritmos y enfoques, estableciendo una o múltiples restricciones, y adoptando estrategias de objetivos únicos o múltiples. Además, estos procesos pueden ser costosos en términos computacionales y requerir mucho tiempo, por lo que es crucial seleccionar cuidadosamente un sistema que garantice robustez y eficiencia. En Nouri et al. (2018) se implementa una metodología de optimización para hélices marinas contra-rotativas (CRP) que combina RANS, un algoritmo genético y el método de Kriging. El proceso iterativo integra resultados de simulaciones previas para reducir el número de simulaciones, demostrando así una eficacia aceptable en la optimización de hélices. Gaggero et al. (2017) desarrollaron una metodología para hélices de buques de alta velocidad con un enfoque multiobjetivo que combina BEM, RANSE, y algoritmos genéticos. Se trabajará sobre la base de las series sistemáticas serie B del canal de Wageningen. Se propone un abordaje en dos etapas, en primer lugar la selección de la hélice óptima mediante un algoritmo de región de confianza donde los parámetros de entrada son las condiciones de navegación. Por tanto, se parte de geometrías ya optimizadas para condiciones de funcionamiento

específicas mediante una metodología de optimización multivariable con restricciones, centrado en maximizar el rendimiento de la hélice y abordar restricciones como el tiro necesario y el efecto de cavitación. Luego, se implementa un algoritmo que combina el método de Nelder-Mead con restricciones impuestas mediante el método de Newton-Raphson y resuelve el flujo mediante el método de volúmenes finitos utilizando el paquete OpenFoam. El enfoque se centra en modificar parámetros geométricos para mejorar el rendimiento de la hélice en ensayos de propulsor aislado bajo condiciones específicas.

## 2. MÉTODO

### 2.1. Definición de la Geometría

La definición de la geometría de la hélice comienza con la creación de la superficie utilizando parámetros de entrada tales como el diámetro, el paso de las palas y el perfil en cada posición radial, además de la distribución de espesores, la distancia de skew correspondiente a cada radio, entre otros. Se emplea el algoritmo descrito por Carr et al. (2018), que utiliza códigos para automatizar la generación geométrica mediante GNU Salome y Python. Este enfoque proporciona una parametrización eficiente para diversas series de hélices, facilitando la generación precisa de geometrías.

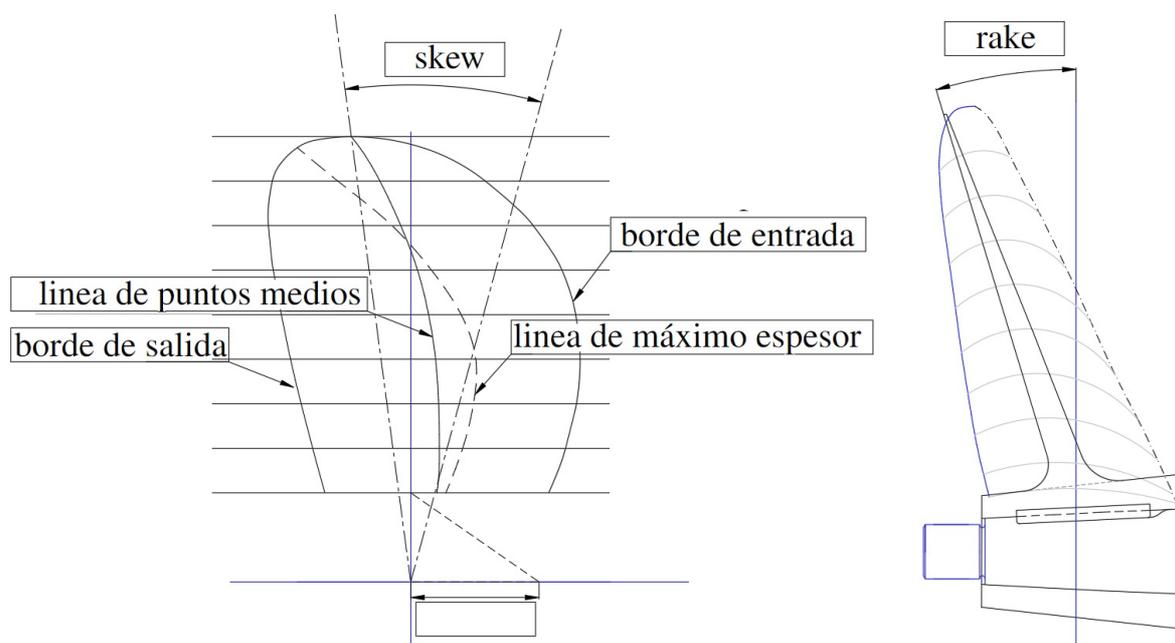


Figura 1: Geometría Serie B.

Los parámetros geométricos que definen la geometría de las hélices serie B son: diámetro, número de palas, paso y relación de áreas ( $f_a/F$ ). Se añaden dos nuevos parámetros, correspondientes a modificaciones del skew y rake. El skew determina la curvatura transversal de la pala, mientras que el rake determina la inclinación hacia atrás, vista de perfil 1. Esto amplía la descripción original de Wageningen y el trabajo previo desarrollado en Carr et al. (2018).

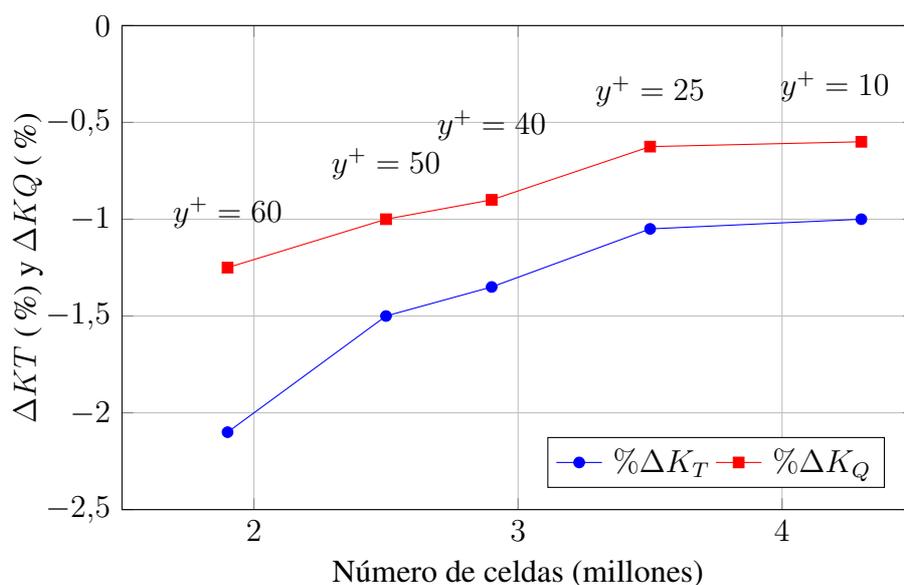


Figura 2: Sensibilidad de malla: Variación de  $\Delta K_T$  y  $\Delta K_Q$  porcentual

## 2.2. Mallado

Posteriormente, la malla es generada con la herramienta `blockMesh` del paquete OpenFOAM. Se crean dos cilindros para delimitar volúmenes donde se aplican refinamientos vía `snappyHexMesh` según se muestra en la figura 3. Se realiza un estudio de convergencia de la malla en función de la variación de  $K_t$  y  $K_q$ , ilustrado en la figura 2, donde además se indica el valor de  $y^+$  para cada caso.

Característica	Valor
Elementos hexaédricos	3,98 M
Elementos prismáticos	11,20 K
Elementos poliédricos	0,30 M
Máximo skewness	2,15
No-ortogonalidad máxima	62,58
No-ortogonalidad media	7,58
Máxima relación de aspecto	4,64

Tabla 1: Características y calidad de la malla final. Caso 1 optimizado.

La malla cuenta con una superficie representada por un cilindro interno alrededor de la hélice comúnmente denominada AMI (por sus siglas en inglés, "arbitrary mesh interface") para delimitar dos subdominios: el interno, con la hélice en su interior, que gira, y el externo que queda estático.

$$J = \frac{Va}{nD} \quad (1)$$

$$K_t = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho n^2 D^4} \quad (2)$$

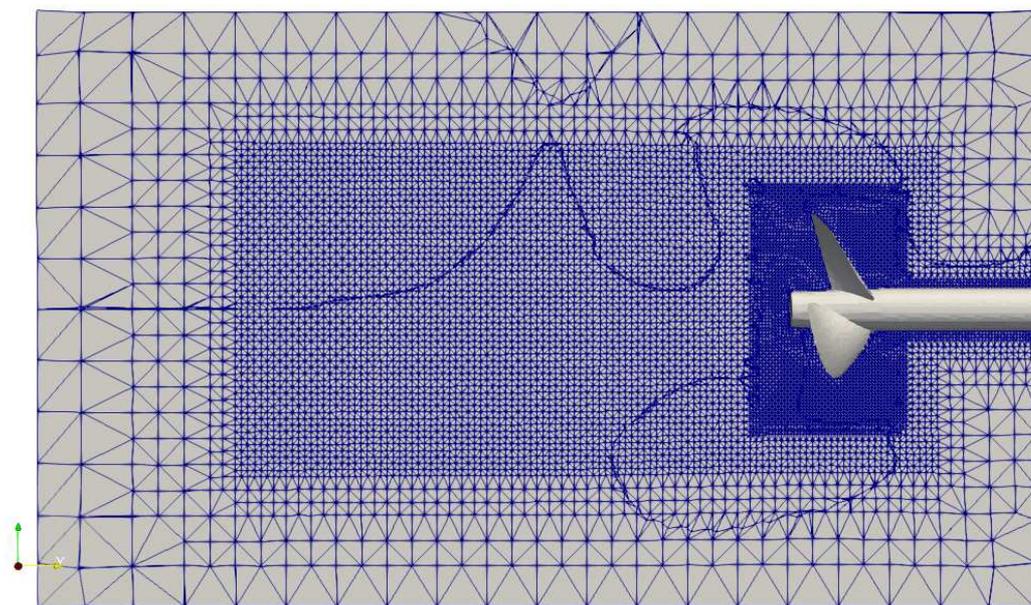


Figura 3: Malla utilizada caso 1.

$$K_q = \frac{Q}{\frac{1}{2}\rho n^2 D^5} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{K_t J}{K_q 2\pi} \quad (4)$$

### 2.3. Ecuaciones de gobierno y estudio CFD

Se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes promedio por Reynolds (RANS) utilizando el Método de Volúmenes Finitos y el solucionador `pimpleFoam` del paquete OpenFOAM. El modelo de turbulencia k- SST es utilizado para representar el comportamiento turbulento del flujo. El método del Marco de Referencia Móvil (MRF) se aplica para simular el giro de la hélice (Wilhelm, 2015). La elección de estos modelos se basa en su capacidad para ofrecer resultados precisos en simulaciones de hélices y se ha validado previamente (Antonelli et al., 2023).

El tamaño del dominio de cálculo debe definirse de manera que se garantice un flujo de entrada uniforme aguas arriba del propulsor y se eviten reflexiones aguas abajo del propulsor. Basándose en las recomendaciones del ITTC (Tu, 2019), el dominio de cálculo para este ensayo es cilíndrico y cuyas dimensiones se expresan como múltiplos del diámetro del propulsor  $D$  en la Figura 4. Las condiciones de contorno son velocidad a la entrada, presión nula a la salida, simetría en el cilindro de contorno y no-deslizamiento sobre la hélice y el eje. El dominio y las condiciones de contorno seleccionados para la simulación se ilustran en la Figura 4.

### 2.4. Algoritmo de optimización

En este trabajo se empleará un enfoque de optimización en dos etapas para mejorar la geometría de hélices marinas. En la primera etapa, se utiliza un algoritmo basado en un modelo de optimización multivariable con restricciones tipo región de confianza. Este algoritmo busca maximizar el rendimiento de la hélice mientras se consideran limitaciones relacionadas con

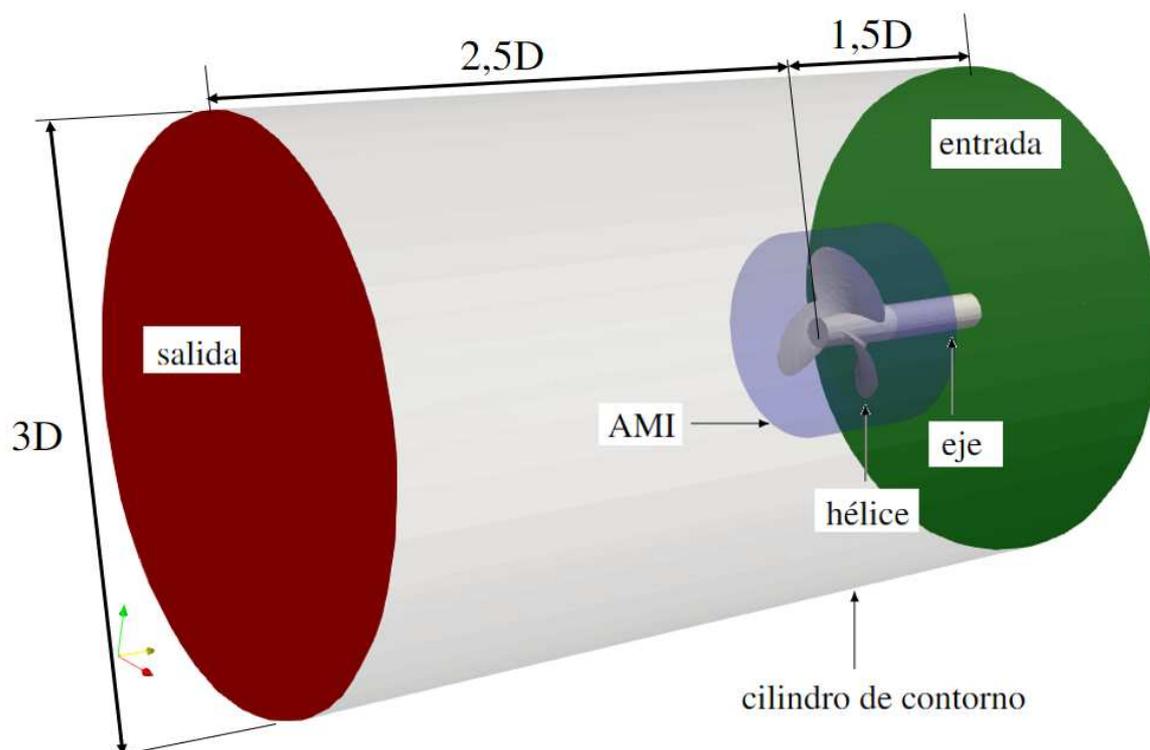


Figura 4: Dominio y condiciones de borde.

el suministro del tiro necesario para la navegación y el efecto de cavitación del propulsor. Se implementa el algoritmo “trust constrain” (Conn et al., 2000) del paquete SciPy, diseñado para optimización con restricciones (Antonelli et al., 2024). En esta etapa se determina como función objetivo a maximizar el rendimiento de la hélice y se fija el tiro necesario para la condición de navegación deseada, obteniendo como resultado la potencia y velocidad de rotación de la hélice óptimas.

En la segunda etapa, la metodología consiste en la aplicación del método de Nelder-Mead (Nelder y Mead, 1965) con restricciones impuestas mediante el método de Newton-Raphson. En la primera etapa los parámetros que se modifican son los originales de la serie sistemática, mientras que en la segunda etapa se modifican 2 (dos) coeficientes asociados a los parámetros geométricos skew y rake, mencionados anteriormente. El esquema permite la restricción de parámetros de la hélice, tales como diámetro, paso, relación de área ( $f_a/F$ ), número de palas y velocidad de rotación. Estos parámetros se fijan dentro del script de generación geométrica para establecer las restricciones especificadas. Además, el coeficiente de empuje puede fijarse mediante el esquema de Newton-Raphson, y la velocidad de rotación de la hélice se ajusta en OpenFOAM.

La evaluación del rendimiento se realiza mediante el análisis de los coeficientes adimensionales  $K_t$  y  $K_q$  para el empuje y el par motor, respectivamente, y se mide la eficiencia de la hélice  $\eta$  (Ecuaciones 1 a 4).

Se realizó un análisis de sensibilidad del rendimiento frente a variaciones de los parámetros, independientemente, tal cual se reflejan en la figura 5; esto indica que la metodología permite capturar correctamente las variaciones en la función objetivo.

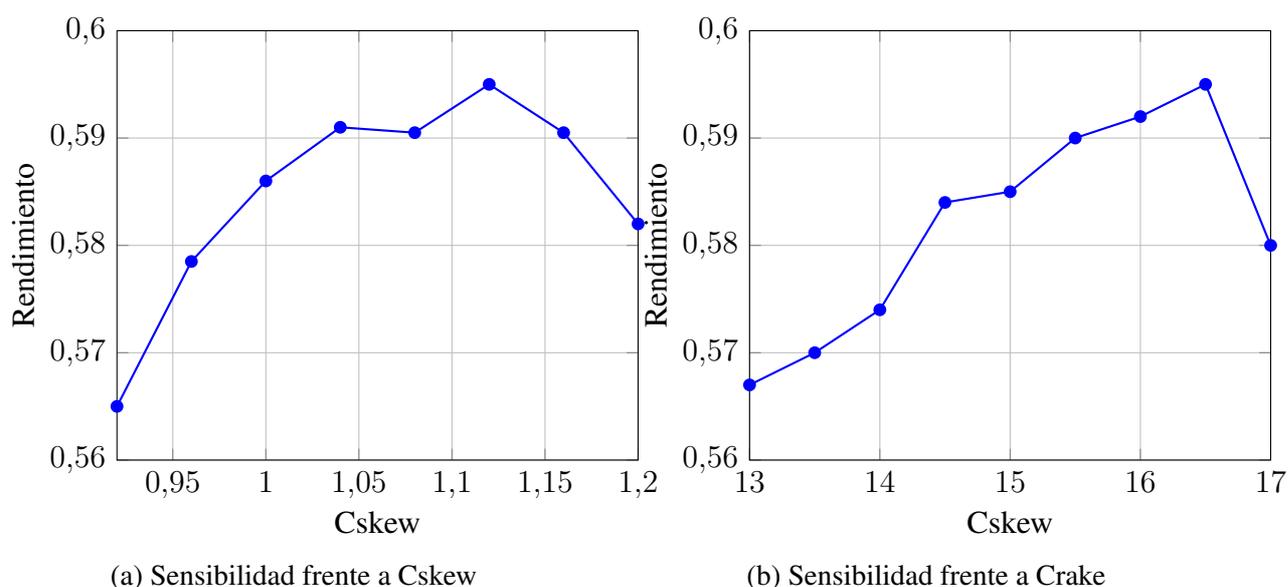


Figura 5: Sensibilidad del rendimiento.

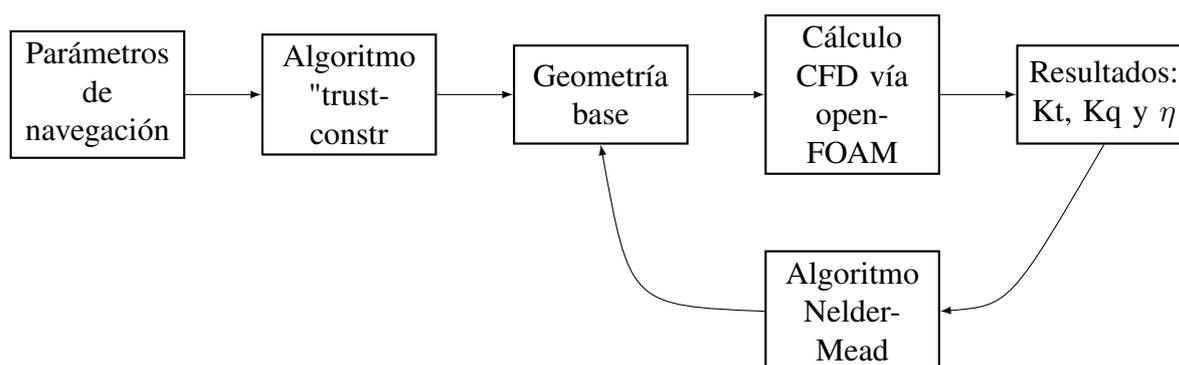


Figura 6: Esquema de optimización

### 3. CASOS DE ESTUDIO

A partir de los parámetros de entrada establecidos, esto es, condiciones de navegación tales como velocidad de servicio  $V_s$ , presión hidrostática en el eje  $p_0$ , deducción de empuje  $t$ , resistencia al avance  $Ra$  y factor de estela  $w$ , se implementan dos casos de análisis, cuyos resultados se muestran en la tabla 2. Estos resultados incluyen, por un lado, las características geométricas y propulsivas de la hélice con el máximo rendimiento, y por otro lado, la potencia necesaria (BHP, potencia al freno del motor propulsor). Además, al determinar la velocidad de rotación de la hélice, se define la caja reductora de velocidades en función de las revoluciones del motor. Cabe recordar que los resultados del primer algoritmo son el punto de partida del segundo algoritmo de optimización.

### 4. RESULTADOS

Los resultados del estudio son presentados en la tabla 3. Se observa una mejora en el rendimiento en ambos casos optimizados, con un incremento del 2,5 % para el Caso 1 y del 3,7 % para el Caso 2. Estos resultados indican una optimización efectiva de la eficiencia. Se fija tanto el coeficiente de tiro (Kt) como el coeficiente de avance (J), por tanto el aumento de rendimiento

	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Descripción</b>
<b>Parámetros de "navegación"</b>			
$p_0$ (N/m <sup>2</sup> )	115303	135715	Presión hidrostática en el eje
$t$	0,185	0,163	Deducción de empuje
$V_s$ (m/s)	6,687	7,716	Velocidad de servicio
$R_a$ (N)	60292	478655	Resistencia al avance
$w$	0,246	0,18	Factor de estela
<b>Parámetros de la hélice</b>			
$J$	0,506	0,503	Coefficiente de avance
$Z$	4	4	Número de palas
$F_a/F$	0,689	0,714	Relación de áreas
$P/D$	0,863	0,851	Paso / Diámetro
<b>Características propulsivas de la hélice</b>			
$\eta$	0,5870	0,5890	Rendimiento
$K_t$	0,2121	0,2082	Coefficiente de tiro
$K_q$	0,0291	0,0283	Coefficiente de cupla
$n$ (rpm)	322,9	259,9	Número de vueltas
BHP (HP)	911,5	4361	Potencia al freno del motor

Tabla 2: Casos de estudio

	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 1 Opt.</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 2 Opt.</b>
<b>Parámetros</b>				
CSkew	1,00	1,12	1,00	0,95
CRake	15,00	16,11	15,00	15,36
<b>Resultados</b>				
$\eta$	0,5870	0,6020	0,5890	0,6109
$K_t$	0,2121	0,2121	0,2082	0,2082
$K_q$	0,0291	0,0284	0,0283	0,0273

Tabla 3: Casos de estudio con optimización, nuevos rendimientos y parámetros adicionales

se debe a la reducción del coeficiente de cupla ( $K_q$ ). La figura 7 muestra la distribución de presiones para la cara de presión tanto para el caso 1 original como optimizado. Las distribuciones resultan muy similares dado que la variación de los parámetros con respecto al original mínima como también muestra la figura 8.

## 5. CONCLUSIONES

Este trabajo utilizó un enfoque de optimización en dos etapas para mejorar la geometría de hélices marinas. En la primera etapa, se empleó un algoritmo de región de confianza multivariable con restricciones para maximizar el rendimiento de la hélice bajo condiciones realistas de navegación. En la segunda etapa, se aplicó el método Nelder-Mead combinado con restricciones impuestas mediante Newton-Raphson y se resolvió el flujo utilizando el método de volúmenes finitos con OpenFOAM. Se realizaron dos casos de estudio, donde se buscó maximizar el rendimiento de la hélice en la primera etapa, fijando el tiro necesario para la condición de navegación deseada y obteniendo la potencia y velocidad de rotación óptimas. En la segunda etapa, se esta-

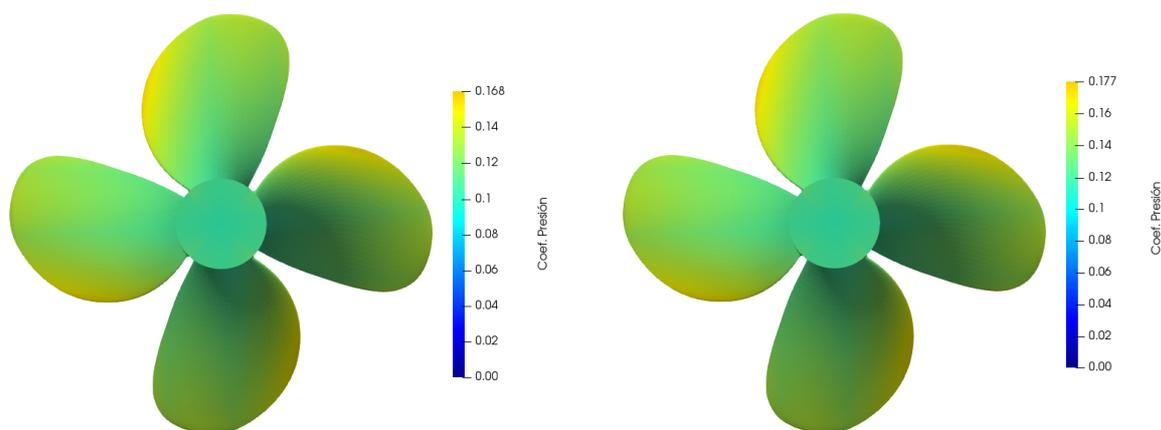


Figura 7: Distribución de presiones Caso 1 Original (izquierda) y Optimizado (derecha).

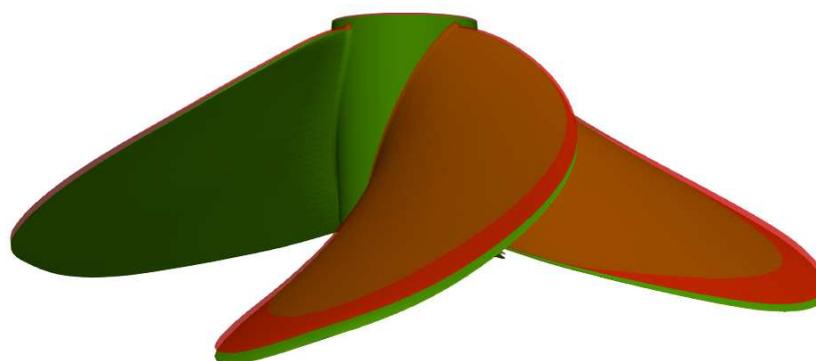


Figura 8: Comparación geometría original (roja) y optimizada (verde). Vista de perfil.

blecieron restricciones a parámetros como el diámetro, el paso, la relación de área, el número de palas y la velocidad de rotación. Además, se implementaron los parámetros de skew y rake como variables de diseño. El coeficiente de tiro se fijó mediante el esquema de Newton-Raphson y la velocidad de rotación se ajustó como un valor fijo de entrada en OpenFOAM.

Los resultados muestran un aumento en el parámetro de rake en todos los casos analizados. Este incremento en el rake, que se refiere al ángulo de inclinación de las palas de la hélice, sugiere que los ajustes realizados en el diseño de las hélices han optimizado su capacidad para generar un mayor empuje y mejorar el rendimiento propulsivo. Un mayor rake puede resultar en una mejor distribución de la carga sobre las palas y en una mayor eficiencia en la conversión de la potencia del motor en empuje. Por otro lado se observa que el parámetro de skew muestra variaciones en lugar de un patrón consistente, lo que indica que su influencia en el rendimiento hidrodinámico puede ser más compleja. El skew se puede entender como un ángulo de giro de las palas de la hélice (curvatura), y su efecto en el flujo es menos predecible que el rake.

Como trabajo futuro, se espera evaluar el desempeño de otras técnicas de optimización tales como algoritmos genéticos, lo que podría permitir una búsqueda más exhaustiva en el espacio de soluciones. También sería beneficioso incluir restricciones adicionales relacionadas con la cavitación dentro de la segunda etapa de optimización, considerando incluso implementar modelos multifase.

**REFERENCIAS**

- Adam N., Fitriadhy A., Chong Jin Q., y Haryanto T. Computational analysis on b-series propeller performance in open water. *Marine Systems Ocean Technology*, 15:1–9, 2020. doi: 10.1007/s40868-020-00087-z.
- Antonelli N., Carr G., y Urquiza S. Optimización de propulsores navales para el proceso de potenciación de buques., 2024. III Jornadas de Ciencia y Tecnología - III Encuentro de investigadores en formación. En prensa.
- Antonelli N., Carr G.E., y Urquiza S. Optimización de formas de propulsores navales utilizando openfoam. (artículo completo) *Mecánica Computacional. Industrial Applications*, XL(36):1277–1283, 2023. ISSN 2591-3522.
- Bhattacharyya A., Krasilnikov V., y Steen S. A cfd-based scaling approach for ducted propellers. *Ocean Engineering*, 123:116–130, 2016. ISSN 0029-8018. doi:https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.06.011.
- Carlton J. 1 - the early development of the screw propeller. En J. Carlton, editor, *Marine Propellers and Propulsion (Second Edition)*, páginas 2–10. Butterworth-Heinemann, Oxford, second edition edición, 2007. ISBN 978-0-7506-8150-6. doi:https://doi.org/10.1016/B978-075068150-6/50003-6.
- Carr G.E., Vaccari A., Giménez J.A., Sanchez Y., Biocca Nicolás Antonelli N.A., Martínez J.F., y Urquiza S. Automatización de generación de mallas para la optimización de propulsores navales. (artículo completo) *Mecánica Computacional. Industrial Applications*, XXXVI(12):499–510, 2018. ISSN 2591-3522.
- Conn A.R., Gould N.I.M., y Toint P.L. *Trust Region Methods*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2000. ISBN 9780898719857. doi:10.1137/1.9780898719857.
- Demirel Y.K., Khorasanchi M., Turan O., Incecik A., y Schultz M.P. A cfd model for the frictional resistance prediction of antifouling coatings. *Ocean Engineering*, 89:21–31, 2014. ISSN 0029-8018. doi:https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.07.017.
- Gaggero S., Tani G., Villa D., Viviani M., Ausonio P., Travi P., Bizzarri G., y Serra F. Efficient and multi-objective cavitating propeller optimization: An application to a high-speed craft. *Applied Ocean Research*, 64:31–57, 2017. doi:10.1016/j.apor.2017.01.018.
- Krasilnikov V.I., Sun J., y Halse K.H. Cfd investigation in scale effect on propellers with different magnitude of skew in turbulent flow. 2009.
- Kuiper G. *The Wageningen Propeller Series*. MARIN publication. Maritime Research Institute Netherlands, 1992. ISBN 9789090072470.
- Lee H., Song M.C., Suh J.C., y Chang B.J. Hydro-elastic analysis of marine propellers based on a bem-fem coupled fsi algorithm. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6(3):562–577, 2014. ISSN 2092-6782. doi:10.2478/ijnaoe-2013-0198.
- Nelder J. y Mead R. A simplex method for function minimization. *Computer Journal*, 7:308, 1965. doi:http://dx.doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308.
- Nouri N.M., Mohammadi S., y Zarezadeh M. Optimization of a marine contra-rotating propellers set. *Ocean Engineering*, 167:397–404, 2018. ISSN 0029-8018. doi:https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.05.067.
- Tu T.N. Numerical simulation of propeller open water characteristics using ranse method. *Alexandria Engineering Journal*, 58(2):531–537, 2019.
- Verma A., Jang H., y Mahesh K. Investigating the effect of hull on marine propeller in crashback using les. páginas 12003–, 2011.
- Wilhelm D. Rotating flow simulations with openfoam. *International Journal of Aeronautical*

*Science Aerospace Research*, páginas 1–7, 2015.  
Yeo K.B. y Hau W.Y. Fundamentals of marine propeller analysis. *J. Appl. Sci. (Faisalabad)*, 14(10):1078–1082, 2014.