



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Determinación de las curvas de rendimiento del propulsor T200
con técnicas CFD*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Mercedes de Fátima Gamboa Navarro

DIRECTOR: Antonio Eirís Barca

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Determinación de las curvas de rendimiento del propulsor T200
con técnicas CFD*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

La capacidad de predecir con precisión el comportamiento de los sistemas de propulsión es un factor crítico en el desarrollo de vehículos submarinos no tripulados operados remotamente (ROV). Sin embargo, propulsores comerciales ampliamente utilizados, como el T200 de Blue Robotics, proporcionan información de rendimiento principalmente en condiciones estáticas, es decir, para empuje a velocidad de avance nula, en función de variables operativas como el voltaje o señal de control. Este enfoque, aunque adecuado desde el punto de vista práctico, dificulta su integración en modelos hidrodinámicos clásicos y en el análisis detallado del comportamiento de la hélice en régimen de avance.

Para completar los datos técnicos de este propulsor, el presente trabajo aborda la caracterización completa del propulsor mediante una combinación de ingeniería inversa y simulación numérica CFD. A partir de escaneado 3D de la hélice y su reconstrucción en entorno CAD, se ha desarrollado un modelo computacional en ANSYS Fluent que permite determinar el empuje, el par y el rendimiento en función de la relación de avance, tanto en modo directo como inverso.

Los resultados obtenidos muestran una buena concordancia con los datos del fabricante en condiciones estáticas y permiten identificar el comportamiento característico del propulsor, destacando una mayor eficiencia y un rango de operación más amplio en modo directo. Asimismo, el estudio pone de manifiesto la influencia del mallado en la precisión de los resultados, mostrando la importancia del uso de técnicas de refinamiento local para asegurar la convergencia de malla.

En conjunto, este trabajo no sólo proporciona una caracterización hidrodinámica detallada del T200, sino que demuestra el potencial de la simulación CFD como herramienta fiable para el análisis y diseño de sistemas de propulsión marina, contribuyendo a su aplicación en entornos donde la precisión y el control son esenciales.

PALABRAS CLAVE

Escaneado 3D, Hélice carenada, CFD, Coeficiente de avance, Curva de rendimiento

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría expresar mi agradecimiento a mi tutor del proyecto por su completa disponibilidad y entrega a lo largo de todo el proceso. Gracias por contagiarme ilusión y motivación por el trabajo, por su constancia y por orientar siempre el camino, que no corto ni fácil, pero siempre el más enriquecedor en términos de aprendizajes y superación personal.

La realización de este trabajo y su entrega significa el cierre de una etapa de mi vida, el paso por la Escuela Naval Militar. Una etapa intensa de crecimiento personal y profesional. Estos cinco años han estado marcados por la exigencia, la lucha constante, la capacidad de superación y el esfuerzo diario, aunque también ha habido momentos bonitos que recordaré siempre de la mano de mis compañeros de promoción.

Me gustaría agradecer a mis amigos de la adoración y en especial al Padre Alberto, el cariño que me han dado y por acercarme cada día más a Dios.

También, mi agradecimiento más especial a mi familia, por confiar en mí siempre, por transmitirme e inculcarme los valores que me han guiado hasta aquí, por ser mi apoyo a pesar de la distancia, por darme ánimo cuando lo necesitaba y por ayudarme a nunca perder la sonrisa.

Y, por último, gracias a Pablo, por ser un pilar fundamental en mi vida y mi motivación en todo momento.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Antecedentes	7
1.2 Motivación	8
1.3 Objetivos	8
1.4 Estructura del trabajo	8
2 Estado del arte	10
2.1 Propulsión en vehículos submarinos no tripulados.....	10
2.1.1 Propulsión eléctrica en ROV	10
2.1.2 Configuración de propulsores en ROV.....	11
2.1.3 Hélices carenadas en aplicaciones submarinas.....	12
2.1.4 Definición del sentido de giro en hélices: criterio naval vs aeronáutico	14
2.1.5 Necesidad de caracterización hidrodinámica.....	15
2.2 Teoría de hélices marinas.....	16
2.2.1 Coeficientes adimensionales.....	16
2.2.2 Curvas de rendimiento	17
2.3 Métodos de análisis y simulación en propulsión marina	19
2.3.1 Ensayos experimentales.....	19
2.3.2 Simulación CFD aplicada a hélices	20
3 Desarrollo del TFG.....	22
3.1 Descripción del apartado.....	22
3.2 Estudio previo	22
3.3 Escaneado 3D.....	23
3.3.1 Estrategia de escaneado	23
3.4 Reconstrucción CAD de la hélice	26
3.4.1 Importación y preparación de la nube de puntos	26
3.4.2 Análisis comparativo inicial	26
3.4.3 Generación de secciones del álabe	28
3.4.4 Validación geométrica y selección del modelo	29
3.4.5 Modelado simplificado del cubo	30
3.4.6 Ensamblaje final	30
3.5 Configuración del modelo CFD	33

3.5.1 Definición del dominio computacional	33
3.5.1 Generación y configuración de la malla	35
3.5.2 Condiciones de contorno y parámetros de simulación	36
3.6 Validación del modelo CFD	37
3.6.1 Importación y preparación de la geometría	38
3.6.2 Definición de superficies y jerarquía del modelo	38
3.6.3 Generación de la malla	39
3.6.4 Obtención y análisis de resultados.....	41
3.7 Simulación CFD de la hélice T200	43
3.7.1 Importación y preparación de la geometría	43
3.7.2 Generación de la malla	45
3.7.3 Simulación CFD del propulsor T200.....	53
4 Resultados	58
4.1 Descripción del apartado.....	58
4.2 Comparación del empuje CFD-Fabricante	58
4.3 Curvas de rendimiento del propulsor T200 ($n = 3000 \text{ rpm}$)	60
5 Conclusiones y líneas futuras	64
5.1 Conclusión de los objetivos iniciales	64
5.1.1 Modelado tridimensional de la hélice.....	64
5.1.2 Ensamblaje completo del propulsor.....	64
5.1.3 Elaboración de la malla y simulación CFD	64
5.1.4 Obtención y análisis de las curvas de rendimiento	64
5.2 Objetivos adicionales	65
5.2.1 Análisis de la influencia del mallado.....	65
5.3 Conclusión final	65
5.4 Líneas futuras.....	65
5.4.1 Corto plazo: Mejora del modelo CFD y estudio de independencia de malla	65
5.4.2 Medio plazo: Estudio del impacto de elementos de protección en la hélice	66
5.4.3 Medio plazo: Modelado simplificado de propulsores en ROV	66
5.4.4 Largo plazo: Aplicación en sistemas ROV para la Armada	66
6 Bibliografía.....	67
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	69
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	70
Anexo III: Demostración de la expresión del rendimiento del propulsor	71
Anexo IV: Definición de superficies y condiciones de contorno en el modelo CFD	72

Anexo V: Documentación técnica del propulsor t200 proporcionada por el fabricante	76
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Aplicación de ROV en tareas de mantenimiento [4]	10
Figura 2-2 BlueROV2 [5].....	11
Figura 2-3 Configuración de propulsión BlueROV2 [6].....	12
Figura 2-4 Hélice carenada Blue Robotics T200 [4].....	13
Figura 2-5 Configuración de hélices en sistema de doble eje vista desde popa.....	14
Figura 2-6 Configuración de hélices en dron multirrotor vista superior (CW/CCW).....	15
Figura 2-7 Ejemplo curva de rendimiento para hélices carenadas [7]	18
Figura 2-8 Ejemplo curva de rendimiento en función del coeficiente de avance [7].....	19
Figura 2-9 Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo [8].....	20
Figura 3-1 Diagrama de las fases del proyecto (elaboración propia).....	22
Figura 3-2 Hélice inicial.....	23
Figura 3-3 Impresión 3D	24
Figura 3-4 Aplicación del spray de escaneado	24
Figura 3-5 Fusión inicial de los dos primeros escaneos de la pala en Artec Studio	25
Figura 3-6 Fusión final de los tres escaneos independientes y mapa de error	26
Figura 3-7 Comparación entre la geometría escaneada y la proporcionada por el fabricante, alineadas en la misma posición para su validación.....	27
Figura 3-8 Comparación entre el álabe real y el obtenido mediante escaneado, destacando la similitud en las superficies y las limitaciones en la definición del espesor	28
Figura 3-9 Comparación de secciones del álabe obtenidas a partir del escaneado y de la geometría del fabricante.....	29
Figura 3-10 Restricción por coincidencia de ejes	31
Figura 3-11 Aplicación de restricciones geométricas de coincidencia de caras en el ensamblaje del propulsor	31
Figura 3-12 Conjunto final ensamblado del propulsor carenado	32
Figura 3-13 Vista explosionada del ensamblaje del propulsor T200	32
Figura 3-14 Cilindro envolvente que contiene la hélice antes de la operación de sustracción	33
Figura 3-15 Dominio fluido simplificado inicial	34
Figura 3-16 Sección longitudinal del dominio computacional con separación de región rotatoria (interior) y región estacionaria (exterior)	35
Figura 3-17 Configuración de mallado en ANSYS.....	36
Figura 3-18 Definición de las condiciones de contorno del dominio computacional en el entorno de mallado de ANSYS.....	37
Figura 3-19 Geometría de la hélice importada en el entorno CFD y comprobación de integridad	38
Figura 3-20 Definición de superficies	39

Figura 3-21 Detalle de la malla generada en el entorno CFD	40
Figura 3-22 Malla final generada para el dominio computacional del modelo CFD.....	40
Figura 3-23 Comparación entre los coeficientes de empuje obtenidos experimentalmente y los resultados obtenidos mediante simulación CFD.....	43
Figura 3-24 Vista general del dominio computacional con la identificación de las principales superficies y regiones del modelo.....	44
Figura 3-25 Conexión entre los módulos de geometría y simulación en ANSYS Workbench [13].....	45
Figura 3-26 Geometría importada en ANSYS Fluent con corte según el eje Z para visualización del interior del dominio.....	46
Figura 3-27 Configuración de la opción Add Local Sizing sin aplicación de refinamientos locales en el dominio	47
Figura 3-28 Configuración del rango de tamaños de elemento para la generación de la malla superficial en ANSYS.....	48
Figura 3-29 Describe Geometry	49
Figura 3-30 Update Boundaries	50
Figura 3-31 Create Regions.....	51
Figura 3-32 Update Regions.....	52
Figura 3-33 Add Boundary Layers.....	52
Figura 3-34 Generate Volume Mesh.....	53
Figura 3-35 Esquema del modo directo. Elaboración propia.....	54
Figura 3-36 Campo de velocidades del flujo en modo directo obtenido mediante simulación CFD	55
Figura 3-37 Esquema del modo inverso. Elaboración propia.	56
Figura 3-38 Campo de velocidades del flujo en modo inverso obtenido mediante simulación CFD	56
Figura 4-1 Fuerza de empuje en modo directo/inverso.....	59
Figura 4-2 Fuerza de empuje en modo directo/inverso con BOI	60
Figura 4-3 Curva de rendimiento FD	61
Figura 4-4 Curva de rendimiento RD.....	62
Figura 0-1 Curva de empuje en función de la potencia eléctrica [4]	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Resumen evolutivo de los métodos de análisis (elaboración propia contrastando fuentes) [9] [13]	21
Tabla 3-1 Datos experimentales obtenidos en los ensayos realizados en SVA Potsdam [21]	41
Tabla 3-2 Coeficientes hidrodinámicos obtenidos a partir de los datos experimentales [20]	41
Tabla 3-3 Datos experimentales obtenidos mediante CFD	42
Tabla 3-4 Coeficientes hidrodinámicos obtenidos mediante simulación CFD	42
Tabla 0-1 Relación de superficies y condiciones de contorno	75
Tabla 0-1 Empuje máximo del propulsor T200 según tensión de alimentación [14]	76
Tabla 0-2 Conversión del empuje a unidades del Sistema Internacional (Conversión realizada considerando 1 kgf = 9.81 N)	77
Tabla 0-3 Parámetros geométricos relevantes del propulsor [4]	77

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Antecedentes

Los vehículos operados remotamente (ROV) han estado estrechamente ligados a la evolución tecnológica de la industria naval, offshore y de defensa. Sus primeras aplicaciones tuvieron lugar a mediados del siglo XX, estos sistemas surgieron como una solución a la necesidad de realizar operaciones submarinas en entornos hostiles o de difícil acceso humano, tales como inspecciones estructurales, trabajos de mantenimiento, recuperación de objetos o misiones de reconocimiento.

Inicialmente, los ROV presentaban arquitecturas simples y capacidades limitadas, tanto en términos de maniobrabilidad como de autonomía y precisión. Sin embargo, el avance progresivo en campos como la electrónica de potencia, los motores eléctricos, los sistemas de control, los sensores submarinos y los materiales resistentes a la corrosión ha permitido una evolución significativa de estos vehículos. En la actualidad, los ROV constituyen plataformas altamente versátiles, capaces de ejecutar misiones complejas con elevados niveles de fiabilidad y seguridad operativa [1].

En el ámbito de la defensa naval, la incorporación de sistemas no tripulados ha adquirido una relevancia estratégica creciente. La integración progresiva de estos vehículos submarinos no tripulados ha desarrollado misiones clave de contramedidas de minas, vigilancia portuaria, reconocimiento del fondo marino y protección de infraestructuras críticas. En este contexto, la reducción del riesgo para el personal y el aumento de la eficiencia operativa han impulsado una clara apuesta por este tipo de tecnologías.

Dentro del marco nacional, la Armada Española ha seguido la misma tendencia. Este proceso se encuentra alineado con las directrices de modernización tecnológica y adaptación a nuevos escenarios estratégicos, donde la robótica submarina desempeña un papel fundamental. La planificación, adquisición y evaluación de estos sistemas se realiza en estrecha coordinación con la Dirección General de Armamento y Material (DGAM), organización responsable de la gestión de los programas de armamento y material del Ministerio de Defensa [2].

El presente trabajo se enmarca en esta evolución tecnológica, abordando el análisis del sistema de propulsión como uno de los elementos clave en el diseño y operación de los ROV, al ser determinante en aspectos como la maniobrabilidad, el consumo energético y la capacidad de posicionamiento del vehículo. En este contexto, la progresiva adopción de propulsores eléctricos compactos basados en motores sin escobillas y hélices carenadas ha permitido mejorar el compromiso entre empuje, eficiencia y robustez mecánica en vehículos de pequeño y mediano tamaño; sin embargo, la información proporcionada por los fabricantes suele limitarse a datos globales de funcionamiento, sin incluir geometría detallada ni curvas de rendimiento hidrodinámico completas, lo que dificulta su integración precisa en modelos de simulación. A través de este trabajo se caracterizará rigurosamente el rendimiento

de un propulsor empleado en ROV mediante técnicas de ingeniería inversa y simulación CFD, constituyendo a mejorar su modelado y su aplicación en el diseño y análisis de vehículos en el ámbito de la industria naval y de defensa.

1.2 Motivación

El interés por el estudio y el creciente uso de vehículos submarinos no tripulados en aplicaciones navales industriales y de defensa ha puesto en manifiesto la necesidad de disponer de modelos de simulación cada vez más precisos que permitan predecir su comportamiento hidrodinámico y optimizar su diseño, desempeñando un papel fundamental los sistemas de propulsión.

La ausencia de geometría detallada y de curvas de rendimiento hidrodinámico obliga a recurrir a modelos simplificados o a hipótesis que pueden producir errores significativos en el análisis del comportamiento del vehículo, especialmente en aplicaciones donde se requieren elevados niveles de fiabilidad y precisión.

Desde el punto de vista de la ingeniería Mecánica, esta situación representa una oportunidad para aplicar técnicas de ingeniería inversa y simulación numérica CFD con el objetivo de caracterizar de forma rigurosa el rendimiento de los sistemas de propulsión empleados en ROV.

La motivación de este Trabajo Fin de Grado radica, por tanto, en contribuir a reducir la brecha existente entre el uso práctico de propulsores comerciales y su modelado teórico, proporcionando herramientas y resultados que faciliten su integración en el diseño y análisis de vehículos submarinos.

1.3 Objetivos

El presente Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo determinar las curvas de rendimiento del propulsor T200 desarrollado por Blue Robotics, para distintos regímenes de giro tanto en modo directo como en modo inverso. Para lograr este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Modelado tridimensional de la hélice: utilizar escáner laser 3D para la obtención de una nube de puntos y representar con precisión la geometría en el software de diseño asistido por ordenador (CAD). El objetivo es reconstruir con exactitud la hélice empleada por el propulsor.
- Ensamblaje completo del propulsor: generar el modelo CAD del conjunto hélice-carenado para su posterior análisis numérico.
- Elaborar malla tridimensional y simulaciones CFD: determinar los coeficientes adimensionales de par, empuje y rendimiento frente al coeficiente de avance.
- Obtener y representar las curvas de rendimiento: según su funcionamiento de giro, directo e inverso. Analizar comparativamente el comportamiento del propulsor, evaluando su eficiencia y limitaciones.

Además de estos objetivos, se ha alcanzado uno adicional, fruto del desarrollo del trabajo, consistente en el análisis de la influencia del mallado en los resultados CFD, evaluando el impacto del refinamiento local en la precisión de la simulación.

1.4 Estructura del trabajo

La estructura de este trabajo seguirá los siguientes puntos:

- 1) Introducción. En este apartado se presentan los antecedentes y el contexto en el que se enmarca el estudio, centrado en el análisis del comportamiento hidrodinámico de propulsores marinos mediante simulación CFD. Asimismo, se definen los objetivos y la motivación que ha impulsado su desarrollo.
- 2) Estado del arte. En este apartado se recopila y analiza la literatura existente relacionada con la propulsión marina, el estudio de hélices y el uso de herramientas de dinámica de fluidos

computacional (CFD). Se establecen los fundamentos teóricos necesarios para el desarrollo del trabajo, incluyendo los coeficientes hidrodinámicos y las curvas de rendimiento.

- 3) Desarrollo del TFG. En este apartado se describe la metodología seguida para la realización del trabajo. Se detallan las herramientas empleadas, el proceso de reconstrucción geométrica de la hélice, la configuración del modelo CFD, la generación de la malla y la validación del modelo mediante comparación con datos experimentales. También se expone el procedimiento seguido para la simulación del propulsor T200 en diferentes condiciones de funcionamiento.
- 4) Resultados. En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones CFD. Se incluye la comparación del empuje con los datos proporcionados por el fabricante, junto con el cálculo de los coeficientes hidrodinámicos y la obtención de las curvas de rendimiento del propulsor.
- 5) Conclusiones y líneas futuras. En este apartado se resume los principales resultados obtenidos, evaluando el grado de cumplimiento de los objetivos planteados. Además, se discuten las posibles mejoras de modelo y se proponen líneas de trabajo futuras orientadas a ampliar el estudio realizado.
- 6) Bibliografía. En este apartado se recopilan y citan todas las fuentes utilizadas durante el desarrollo del trabajo, siguiendo el formato establecido.
- 7) Anexos. En este apartado se incluye material complementario relevante para la comprensión del trabajo, como la nomenclatura de superficies, configuraciones del modelo CFD, tablas de datos y otros elementos que apoyan el desarrollo del estudio.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Propulsión en vehículos submarinos no tripulados

La propulsión constituye uno de los subsistemas fundamentales en los vehículos submarinos no tripulados, ya que condiciona de manera directa su desplazamiento, maniobrabilidad y estabilidad en entornos marinos que requieren movimientos precisos y controlados. A diferencia de los buques tripulados, los vehículos operados remotamente (ROV) suelen operar a bajas velocidades debido a la necesidad de mantener una conexión física con el operador, lo que incrementa la importancia de disponer de sistemas de propulsión altamente controlables y eficientes.

En este contexto, parámetros como la capacidad de maniobra, la estabilidad, el posicionamiento y el consumo energético están estrechamente ligados al diseño del sistema propulsivo y resultan determinantes para el cumplimiento de la misión. Un diseño adecuado del sistema de propulsión permite optimizar la eficiencia global del ROV, facilitando tareas en aplicaciones en defensa y seguridad, tales como inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR), guerra contra minas (MCM), guerra antisubmarina (ASW), estrategias anti-acceso y negación de área (A2/AD), inspección e identificación como se aprecia en la Figura 2-1, oceanografía, apoyo logístico. Del mismo modo, estos vehículos desempeñan un papel relevante en aplicaciones civiles, incluyendo la industria petrolífera, inspección en la industria nuclear o recuperación de pecios [3].

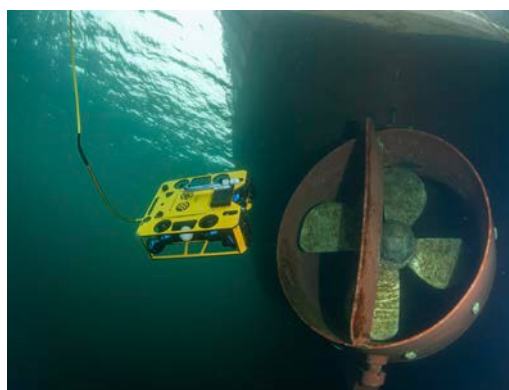


Figura 2-1 Aplicación de ROV en tareas de mantenimiento [4]

2.1.1 Propulsión eléctrica en ROV

Los propulsores sumergibles empleados en vehículos marinos no tripulados pueden clasificarse, de forma general, en eléctricos e hidráulicos, siendo los primeros los más utilizados en plataformas tipo ROV de pequeño y mediano tamaño debido a su simplicidad, eficiencia y facilidad de control. Por este

motivo, el presente apartado se centra en la propulsión eléctrica, ampliamente implantada en aplicaciones submarinas modernas.

Desde el punto de vista del principio de funcionamiento, los motores eléctricos empleados en sistemas de propulsión operan mayoritariamente bajo fenómenos electromagnéticos. En el caso de los ROV, donde se requiere un control preciso y continuamente variable de la velocidad y del sentido de giro, se emplean habitualmente sistemas basados en la corriente continua, ya sea de forma directa o mediante el uso de electrónica de potencia que convierte la corriente alterna en corriente continua controlada. Esta configuración permite una regulación más eficiente del par y de la velocidad, aspectos críticos para la maniobrabilidad del vehículo.

Entre los distintos tipos de motores eléctricos, los motores de imanes permanentes (PM) destacan por su alta eficiencia, elevada densidad de potencia y menos pérdidas energéticas, lo que los convierte en una opción especialmente adecuada para aplicaciones submarinas donde la disponibilidad energética es limitada. En este contexto, los motores sin escobillas de corriente continua (BLDC) se han consolidado como la mejor solución predominante en ROV.

En particular, la configuración “outrunner” resulta especialmente apropiada para propulsores sumergibles, ya que permite obtener altos valores de par a bajas velocidades de giro, reduciendo la necesidad de sistemas de transmisión adicionales. Además, este tipo de motores presenta una elevada fiabilidad y una mayor vida útil al eliminar elementos sujetos a desgaste mecánico, características fundamentales en entornos submarinos de difícil acceso. Como resultado, los motores BLDC outrunner ofrecen una combinación óptima de eficiencia energética, robustez y control, lo que justifica su amplia utilización en sistemas de propulsión para ROV.

En este contexto de propulsión eléctrica se sitúa el propulsor T200 desarrollado por Blue Robotics ampliamente utilizado en vehículos ROV de pequeño y mediano tamaño [4]. Este propulsor integra un motor BLDC en configuración “outrunner” acoplado a una hélice carenada, dando lugar a un sistema compacto, robusto y optimizado para su funcionamiento en entornos submarinos. La combinación de un alto par a bajas velocidades, un control preciso del régimen de giro y una geometría de hélice diseñada para maximizar el empuje a bajo coeficiente de avance convierte al T200 en un ejemplo representativo de los sistemas de propulsión actualmente empleados en vehículos marinos no tripulados, justificando su elección como objeto de estudio en el presente Trabajo Fin de Grado.



Figura 2-2 BlueROV2 [5]

2.1.2 Configuración de propulsores en ROV

La configuración de los propulsores en un vehículo operado remotamente desempeña un papel fundamental en su capacidad de maniobra, estabilidad y control durante la operación submarina. A diferencia de los buques convencionales, los ROV no requieren únicamente un sistema de propulsión para el avance, sino que deben ser capaces de generar fuerzas y momentos en distintas direcciones para ejecutar movimientos precisos y mantener su posición en entornos complejos.

De forma general, los ROV emplean una propulsión distribuida según su uso y misiones encomendadas. Se colocan varios propulsores de pequeño tamaño de manera estratégica en la estructura

del vehículo. Esta configuración permite desacoplar los movimientos de traslación y rotación, facilitando el control independiente de los distintos grados de libertad. Habitualmente, los propulsores se dividen en horizontales, responsables del avance, retroceso y guiñada, y verticales, encargados del control de profundidad y del balanceo del vehículo.

El número y la disposición de los propulsores dependen de los requisitos de la misión y del nivel de maniobrabilidad requerido. Configuración simple de entre cuatro o cinco propulsores, permiten cubrir las necesidades básicas de navegación y posicionamiento, mientras que configuraciones más complejas, como seis o más propulsores, proporcionan un mayor control sobre los seis grados de libertad del vehículo. Además, la redundancia asociada al uso de múltiples propulsores incrementa la fiabilidad del sistema, permitiendo mantener la operatividad del ROV en caso de fallo de alguno de ellos.

Desde el punto de vista del diseño, la correcta selección y ubicación de los propulsores resulta clave para optimizar el rendimiento global del vehículo. Una configuración adecuada contribuye a mejorar la eficiencia energética, reducir las interacciones hidrodinámicas no deseadas entre propulsores y garantizar una respuesta dinámica estable ante perturbaciones externas, como corrientes marinas. Por este motivo, el estudio de la configuración de propulsores constituye un aspecto esencial en el diseño y análisis de ROV modernos y condiciona de forma directa el comportamiento del sistema de propulsión.

A modo de ejemplo, en la Figura 2-3 se puede apreciar la configuración de propulsión del BlueROV2, que dispone de ocho propulsores distribuidos para permitir el control del movimiento en distintos grados de libertad. Los propulsores indicados en color verde indican la rotación de la hélice en sentido horario, mientras que los señalados en color azul giran en sentido antihorario, lo que permite equilibrar los momentos generados y mejorar la estabilidad y el control del vehículo evitando así interferencias entre ellos.

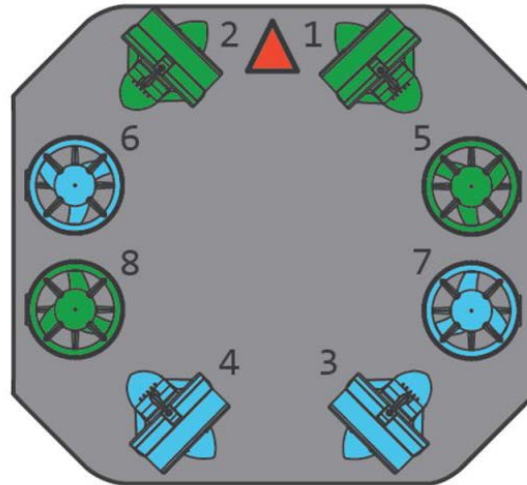


Figura 2-3 Configuración de propulsión BlueROV2 [6]

2.1.3 Hélices carenadas en aplicaciones submarinas

Un sistema de propulsión con tobera consiste en una hélice convencional rodeada por un conducto en forma de tobera a modo de carcasa exterior como se muestra en la siguiente Figura 2-4.



Figura 2-4 Hélice carenada Blue Robotics T200 [4]

Este carenado modifica el campo de velocidades del flujo, permitiendo aumentar el empuje generado a bajas velocidades y mejorando el comportamiento del sistema en condiciones de operación típicas de entornos submarinos.

El principio de funcionamiento de una hélice carenada se basa en la interacción entre el rotor y el conducto que lo rodea. La tobera actúa acelerando el flujo y reduciendo las pérdidas inducidas en los extremos de las palas, lo que se traduce en un incremento del empuje estático y en una mayor eficiencia en regímenes de bajo coeficiente de avance. Estas características implican que este tipo de hélices de un resultado adecuado para aplicaciones en las que no se prioriza la velocidad de avance, sino el control preciso del movimiento y su maniobrabilidad.

Respecto a los vehículos operados remotamente (ROV), las hélices carenadas ofrecen ventajas significativas frente a las hélices abiertas. Entre ellas destacan la mejora de la maniobrabilidad, la capacidad de generar empuje elevado a bajas velocidades y la protección mecánica de la hélice frente a impactos con el entorno. Además, el carenado contribuye a una mayor seguridad operativa y a una mayor robustez del sistema de propulsión.

No obstante, el uso de hélices carenadas también presenta ciertas limitaciones que deben de ser consideradas en el diseño de sistema. A velocidades de avance elevadas, el carenado puede introducir pérdidas adicionales por fricción, reduciendo la eficiencia global en comparación con una hélice abierta [4]. Asimismo, el rendimiento del conjunto de la hélice-carena es altamente dependiente de la geometría del conducto, lo que hace necesario un diseño cuidadoso para evitar fenómenos indeseados como separaciones de flujo o pérdidas de rendimiento.

A pesar de estas limitaciones, las hélices carenadas se han considerado una opción predominante en este tipo de vehículos no tripulados de pequeño y mediano tamaño, especialmente cuando se combina con motores eléctricos sin escobillas que permiten un control preciso del régimen de giro. Su capacidad para operar de forma eficiente tanto en modo directo como inverso las convierte en una opción idónea para vehículos que requieren maniobrabilidad y cambios frecuentes de direcciones [4].

En este contexto, el estudio detallado del comportamiento hidrodinámico de las hélices carenadas resulta fundamental para comprender el rendimiento y optimizar su integración en sistemas de propulsión submarinos. La determinación de las curvas de empuje, par y rendimiento permite evaluar de forma objetiva el comportamiento de estos dispositivos y constituye la base para su análisis mediante herramientas de simulación numérica, como la dinámica de fluidos computacional (CFD), que se abordará en los apartados posteriores del presente trabajo.

Tradicionalmente, la obtención de estas curvas se realizaba mediante ensayos experimentales en canales de cavitación, lo que implicaba elevados costes y una limitada flexibilidad en la evaluación de distintas configuraciones. Sin embargo, en las últimas décadas, el incremento de la capacidad de cálculo de los ordenadores, junto con el desarrollo de herramientas de simulación CFD, ha permitido determinar

estas curvas de forma computacional con un grado de precisión cada vez mayor, facilitando el análisis y diseño de propulsores en entornos virtuales.

2.1.4 Definición del sentido de giro en hélices: criterio naval vs aeronáutico

En relación con la definición del sentido de giro de las hélices, es necesario destacar la diferencia existente entre la nomenclatura empleada por el fabricante Blue Robotics y la utilizada tradicionalmente en ingeniería naval.

Blue Robotics adopta una nomenclatura habitual en el ámbito de los drones, donde el sentido de giro de la hélice se define observando el propulsor desde la parte superior. Bajo este criterio, una hélice se denomina CW (Clockwise) si gira en sentido horario y CCW (Counter-Clockwise) si lo hace en sentido antihorario.

Por el contrario, en el ámbito naval, el sentido de giro de una hélice se define observándola desde popa, es decir, en la dirección de avance del buque. En este caso, una hélice se denomina dextrógira si gira en sentido horario y levógira si lo hace en sentido antihorario.

Como consecuencia de esta diferencia en el sistema de referencia, una hélice identificada como CW según la nomenclatura de Blue Robotics puede corresponder a una hélice levógira en terminología naval, al invertirse el punto de vista desde el cual se observa el giro.

Esta diferencia se ilustra en las figuras siguientes. En la Figura 2-5 se muestra un prototipo de embarcación observado desde popa, donde se aprecia la configuración habitual en sistemas de doble eje: la hélice situada a estribor presenta giro dextrógiro, mientras que la hélice de babor es levógira. Esta disposición permite compensar los efectos de par y mejorar la estabilidad direccional del buque.

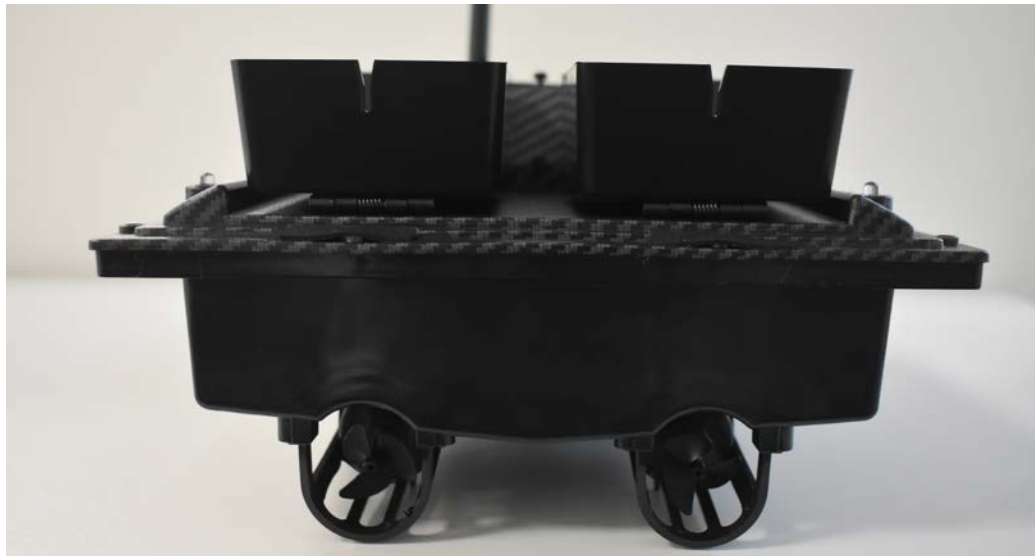


Figura 2-5 Configuración de hélices en sistema de doble eje vista desde popa

Por otro lado, en la Figura 2-6 se presenta la vista superior de un dron multirrotor equipado con cuatro hélices. En este caso, las hélices se disponen en configuración cruzada, con dos de ellas girando en sentido horario (CW) y las otras dos en sentido antihorario (CCW), con el objetivo de equilibrar los momentos generados y garantizar la estabilidad del sistema. Se observa además que, al adoptar como referencia la vista superior, la interpretación del sentido de giro resulta inversa respecto al criterio naval.

Asimismo, en la imagen del dron se precia una diferenciación visual entre los distintos tipos de hélices mediante el color del núcleo, lo que facilita su identificación durante el montaje y operación.



Figura 2-6 Configuración de hélices en dron multirrotor vista superior (CW/CCW)

En definitiva, esta comparación pone en manifiesto la importancia de definir correctamente el sistema de referencia al analizar el sentido de giro de una hélice, ya que una interpretación incorrecta puede dar lugar a errores en la definición de las condiciones de simulación y en el análisis del comportamiento del propulsor.

2.1.5 Necesidad de caracterización hidrodinámica

La correcta caracterización hidrodinámica de los sistemas de propulsión resulta fundamental para comprender y predecir el comportamiento de los vehículos submarinos no tripulados. En el caso de los ROV, cuyo desempeño depende en gran medida de la capacidad de generar empuje controlado a bajas velocidades, el conocimiento detallado del rendimiento de los propulsores permite mejorar tanto el diseño del vehículo como su modelado dinámico y su control.

Tradicionalmente, la caracterización del rendimiento de hélices marinas se ha llevado a cabo mediante ensayos experimentales, en los que se obtienen curvas de empuje, par y rendimiento a partir de pruebas en canal o en bancos de ensayo específicos. En España, un ejemplo representativo de este tipo de instalaciones es el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo, en funcionamiento desde mediados del siglo XX, que ha sido utilizado durante décadas para el estudio experimental de buques, hélices, prototipos y sistemas de propulsión naval [5]. No obstante, estos métodos requieren infraestructuras especializadas y conllevan elevados costes, lo que limita su aplicación en el análisis de propulsores comerciales de pequeño tamaño, como los utilizados en ROV.

Como consecuencia, la información técnica proporcionada por los fabricantes de propulsores comerciales suele limitarse a valores globales de funcionamiento, tales como el empuje máximo o el consumo eléctrico en condiciones determinadas, sin incluir curvas de rendimiento hidrodinámico completas ni detalles geométricos precisos. Esta carencia dificulta la integración de dichos propulsores en modelos de simulación y puede conducir a estimaciones poco precisas del comportamiento dinámico del vehículo.

En este contexto, la dinámica de fluidos computacional (CFD) se presenta como una herramienta eficaz para la caracterización hidrodinámica de hélices y propulsores, permitiendo analizar el flujo alrededor del sistema y obtener parámetros fundamentales como el empuje y el par en distintos

regímenes de operación. El empleo de técnicas CFD facilita además el estudio de configuraciones complejas, como las hélices carenadas, y permite evaluar su comportamiento tanto en modo directo como inverso sin necesidad de realizar ensayos experimentales.

Por todo ello, la caracterización hidrodinámica mediante métodos numéricos constituye una etapa esencial para disponer de modelos de propulsión fiables y reproducibles, especialmente en aplicaciones submarinas donde se requieren elevados niveles de precisión y control. Este enfoque justifica el desarrollo del presente Trabajo de Fin de Grado, centrado en la obtención de las curvas de rendimiento de un propulsor empleado en ROV, como base para su posterior integración en modelos de simulación y análisis de vehículos submarinos no tripulados.

2.2 Teoría de hélices marinas

2.2.1 Coeficientes adimensionales

La hélice marina es el elemento encargado de transformar la potencia mecánica suministrada por el motor en empuje, mediante la interacción con el fluido circundante. Este proceso se produce mediante la interacción entre las palas de la hélice y el agua, generando diferencias de presiones y una aceleración del flujo en la dirección del eje de giro. En aplicaciones submarinas, como los vehículos operados remotamente (ROV), donde la operación se realiza a bajas velocidades y con elevados requisitos de control, resulta fundamental disponer de herramientas que permitan analizar y comparar el comportamiento de la hélice en distintos regímenes de funcionamiento.

Para analizar el comportamiento de una hélice de forma general y permitir la comparación entre distintos tamaños, regímenes de operación y condiciones de flujo, se emplean coeficientes adimensionales. Estos parámetros permiten describir el rendimiento hidrodinámico de la hélice independiente de sus dimensiones absolutas, siendo ampliamente utilizados tanto en ensayos experimentales como en simulaciones numéricas [6].

Uno de los parámetros fundamentales es el coeficiente de avance, definido como:

$$J = \frac{V}{nD}$$

Donde V es la velocidad de avance del fluido incidente, n es la velocidad de rotación de la hélice (en revoluciones por segundo) y D es el diámetro de la hélice. Este coeficiente representa la relación entre la velocidad del fluido a través de la hélice y la velocidad en la punta de ésta. De esta manera permite caracterizar los distintos regímenes de funcionamiento de la hélice, desde empuje estático hasta condiciones de mayor avance.

El coeficiente de empuje se define como:

$$C_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

Donde T es el empuje generado por la hélice y ρ la densidad del fluido. Este coeficiente permite evaluar la capacidad de la hélice para generar empuje en función de su tamaño y velocidad de giro, siendo especialmente relevante en aplicaciones de baja velocidad, como las propias de los ROV.

De forma análoga, el coeficiente de par se expresa como:

$$C_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

Donde Q es el par transmitido por la hélice. Este parámetro está directamente relacionado con la potencia requerida por el sistema de propulsión y resulta fundamental para evaluar la eficiencia energética del conjunto motor-hélice.

A partir de los coeficientes de empuje y par, se define el rendimiento propulsivo de la hélice como:

$$\eta = \frac{C_T J}{2\pi C_Q}$$

La deducción de esta expresión, así como su equivalencia con la definición clásica del rendimiento como relación entre potencia útil y potencia suministrada ($\eta = \frac{Tv}{Qw}$), se desarrolla en el Anexo III.

Este parámetro permite cuantificar la eficiencia con la que la hélice transforma la potencia mecánica suministrada en empuje útil. El análisis del rendimiento en función del coeficiente de avance da lugar a las denominadas curvas de rendimiento, que constituyen una herramienta fundamental para la caracterización hidrodinámica de hélices marinas.

La obtención de las curvas de rendimiento permite identificar el rango de operación óptimo de la hélice y evaluar su comportamiento en distintos regímenes de funcionamiento. En el caso de una hélice de paso fijo, el análisis de la relación de avance en la que se alcanza su máxima eficiencia resulta especialmente relevante, ya que permite determinar si la hélice es adecuada para una aplicación concreta. Una eficiencia máxima a valores bajos del coeficiente de avance indica que la hélice está optimizada para bajas velocidades de avance, siendo especialmente adecuada para condiciones de empuje elevado o funcionamiento cercano al amarre.

Asimismo, el valor del coeficiente de empuje (C_T) correspondiente a la relación de avance en la que se maximiza la eficiencia permite evaluar si la hélice es capaz de generar el empuje necesario para propulsar una embarcación o vehículo determinado con un sistema de propulsión concreto. En el caso de las hélices carenadas empleadas en ROV, el análisis de los coeficientes adimensionales adquiere una relevancia especial, ya que estos sistemas suelen operar en condiciones alejadas de la velocidad de diseño de hélices convencionales, priorizando el empuje y el control frente a la velocidad de avance.

2.2.2 Curvas de rendimiento

Las curvas de rendimiento constituyen una herramienta fundamental para la caracterización hidrodinámica de hélices marinas, ya que permiten describir su comportamiento en distintos regímenes de funcionamiento de forma adimensional. Estas curvas representan habitualmente la variación del coeficiente empuje (C_T), el coeficiente de par (C_Q) y el rendimiento propulsivo (η) en función del coeficiente de avance (J), proporcionando una visión completa del desempeño de la hélice [9].

La curva $C_T(J)$ permite analizar la capacidad de la hélice para generar empuje a medida que varía la relación entre la velocidad de avance y el régimen de giro. En general, el coeficiente de empuje presenta valores elevados a bajos coeficientes de avance, correspondientes a condiciones cercanas al empuje estático, y disminuye progresivamente conforme aumenta J . Por su parte, la curva $C_Q(J)$ describe el par requerido por la hélice para operar en cada régimen, estando directamente relacionada con la potencia demandada al sistema de propulsión [7].

El rendimiento propulsivo η , obtenido a partir de los coeficientes de empuje y par, presenta típicamente un valor máximo para un determinado coeficiente de avance, que define el punto de operación óptimo de la hélice. La posición y el valor de este máximo permiten evaluar la adecuación de una hélice a una aplicación específica, ya que indican el régimen en el que la conversión de potencia mecánica en empuje es más eficiente.

En aplicaciones submarinas, y en particular en los vehículos operados remotamente (ROV), las hélices suelen operar en regímenes de bajo coeficiente de avance, donde el empuje y el control del movimiento resultan prioritarios frente a la eficiencia máxima. En este contexto, las hélices carenadas presentan un comportamiento diferenciado respecto a las hélices abiertas, caracterizándose por valores elevados de empuje a bajos valores de J , lo que las hace especialmente adecuadas para maniobras precisas y mantenimiento de posición [7] [11].

A continuación, en la Figura 2-7 se representa un ejemplo de curva de rendimiento en relación con las hélices carenadas que se ha descrito anteriormente.

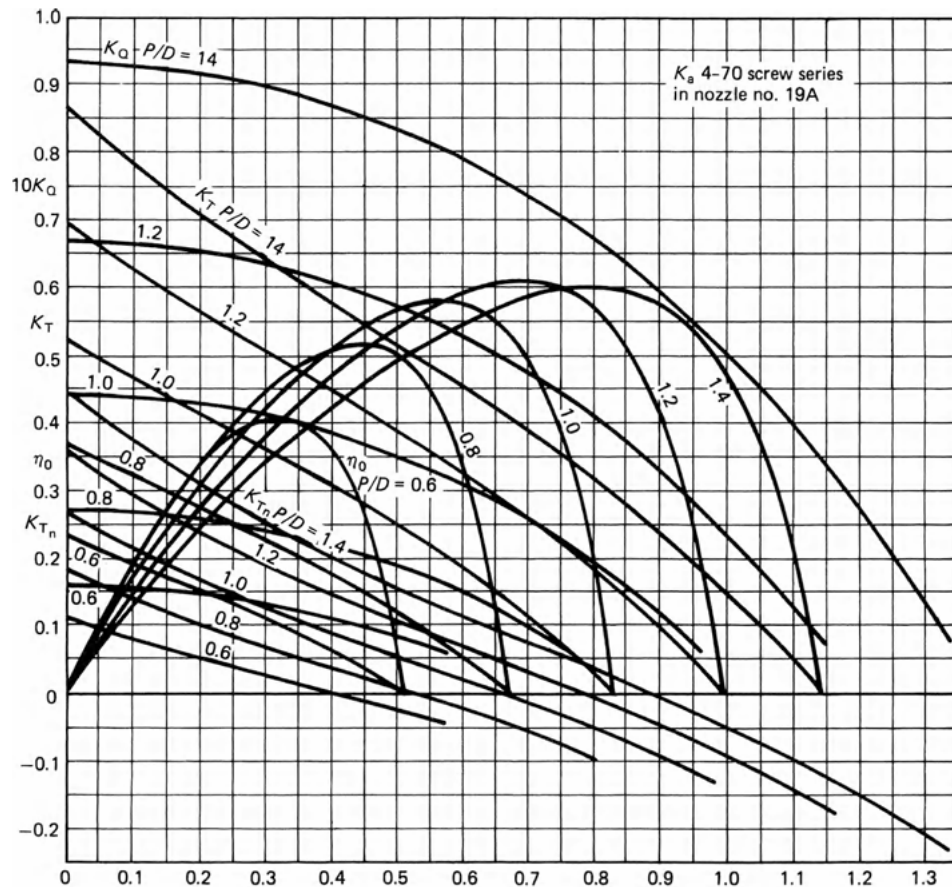


Figura 2-7 Ejemplo curva de rendimiento para hélices carenadas [7]

El análisis de las curvas de rendimiento permite, por tanto, evaluar de forma objetiva el comportamiento hidrodinámico de una hélice y comparar distintas configuraciones de diseño. En el presente Trabajo de Fin de Grado, estas curvas constituyen la base para la caracterización del rendimiento de la hélice del propulsor T200, y su obtención mediante simulación numérica permitirá analizar su comportamiento tanto en modo directo como inverso en distintos regímenes de propulsión.

A modo ilustrativo, en la Figura 2-8 se presenta un ejemplo típico de curvas de rendimiento de una hélice marina, donde se representan los coeficientes de empuje C_T , par C_Q , y rendimiento η en función del coeficiente de avance J . Estas curvas permiten identificar el punto de máxima eficiencia y analizar el comportamiento de la hélice en distintos regímenes de funcionamiento.

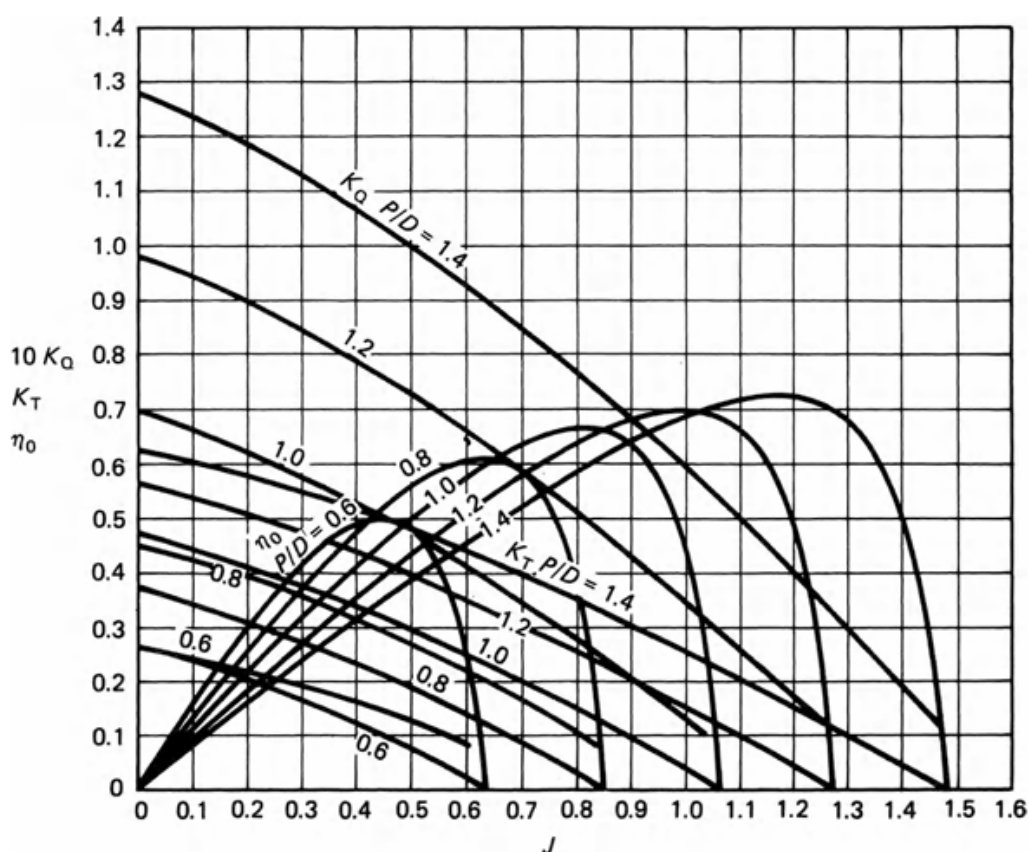


Figura 2-8 Ejemplo curva de rendimiento en función del coeficiente de avance [7]

2.3 Métodos de análisis y simulación en propulsión marina

2.3.1 Ensayos experimentales

La caracterización del rendimiento de hélices marinas se ha realizado tradicionalmente mediante ensayos experimentales, los cuales constituyen la base fundamental del estudio de la propulsión naval. Estos ensayos permiten obtener de forma directa las curvas de empuje, par y rendimiento de una hélice a partir de mediciones controladas en condiciones de flujo bien definidas. Asimismo, mediante estudios experimentales es posible analizar otros aspectos relevantes del comportamiento hidrodinámico, tales como la estabilidad, la resistencia, la maniobrabilidad y la influencia de las condiciones del estado de la mar sobre el rendimiento del sistema propulsivo.

Entre los métodos experimentales más empleados se encuentran los ensayos en canal de experiencias hidrodinámicas y los denominados *open water tests*, en los que la hélice se hace girar en un flujo uniforme y se miden las fuerzas y momentos generados para distintos regímenes de giro y velocidades de avance. A partir de estos ensayos es posible obtener coeficientes adimensionales C_T , C_Q , η , que permiten caracterizar el comportamiento de la hélice de forma independiente de su tamaño y condiciones específicas de operación.

En España, un ejemplo destacado de este tipo de infraestructuras es el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo[6], en funcionamiento desde mediados del siglo XX. Esta instalación ha sido utilizada durante décadas para el estudio experimental de buques, hélices y sistemas de propulsión naval, constituyendo una referencia nacional en el ámbito de la hidrodinámica aplicada. Instalaciones similares existen en otros países, siendo ampliamente utilizadas en el diseño y validación de sistemas de propulsión marinos.



Figura 2-9 Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo [8]

No obstante, la realización de ensayos experimentales presenta una serie de limitaciones, especialmente en el caso de propulsores comerciales de pequeño tamaño, como los empleados en vehículos submarinos no tripulados. Estos ensayos requieren infraestructuras especializadas, instrumentación precisa y elevados costes económicos y operativos, lo que dificulta su aplicación sistemática cuando se pretende analizar múltiples configuraciones o estudiar el comportamiento en distintos regímenes de funcionamiento.

En el caso particular de hélices carenadas, la complejidad geométrica del conjunto hélice-carena añade un grado adicional de dificultad a los ensayos experimentales, ya que resulta necesario considerar las interacciones hidrodinámicas entre ambos elementos. Esta situación ha impulsado el uso de métodos complementarios de análisis, como la simulación numérica, que permiten estudiar el comportamiento del sistema de propulsión con mayor flexibilidad y menor coste, tal y como se abordará en los apartados siguientes.

2.3.2 Simulación CFD aplicada a hélices

El análisis hidrodinámico de hélices ha evolucionado desde métodos experimentales basados en ensayos en canales de cavitación hacia herramientas numéricas avanzadas capaces de resolver el flujo tridimensional. Los primeros enfoques analíticos, como la Teoría del Momento y la Teoría del Elemento de Pala, permitieron estimaciones simplificadas del rendimiento. Sin embargo, el desarrollo de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) supuso un punto de inflexión al posibilitar la resolución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes y el análisis detallado del campo de flujo alrededor de la hélice.

El estudio de hélices ha pasado de depender exclusivamente de ensayos en túneles de cavitación a emplear modelos numéricos capaces de reproducir el flujo tridimensional con gran detalle. Mientras que los métodos analíticos ofrecían estimaciones simplificadas del rendimiento, la aparición del CFD permitió analizar directamente la distribución de presiones y velocidades sobre la pala. Además, la evolución desde modelos estacionarios hacia simulaciones transitorias ha supuesto un avance significativo al permitir capturar la dinámica real de la estela generada por la hélice. Esta evolución se resume de forma comparativa en la Tabla 2-1.

Etapas	Enfoque principal	Capacidad	Limitaciones
Ensayo experimental	Túnel de cavitación	Medición directa de empuje y par	Coste elevado y tiempo de ensayo
Modelos analíticos	Teoría del Momento/Elemento de Pala	Estimación rápida del rendimiento	Flujo simplificado
CFD estacionario	RANS + MRF	Predicción global de magnitudes hidrodinámicas	No captura fenómenos no estacionarios
CFD transitorio	RANS transitorio + Sliding Mesh	Captura evolución temporal de la estela	Mayor coste computacional

Tabla 2-1 Resumen evolutivo de los métodos de análisis (elaboración propia contrastando fuentes) [9] [13]

En este contexto, la dinámica de fluidos computacional (CFD) se ha consolidado en las últimas décadas como una herramienta fundamental para el análisis y diseño de sistemas de propulsión marina, complementado y, en muchos casos, sustituyendo a los ensayos experimentales tradicionales. Mediante la resolución numérica de las ecuaciones que gobiernan el movimiento del fluido, el CFD permite analizar el comportamiento hidrodinámico de hélices marinas en distintos regímenes de funcionamiento y obtener parámetros como el empuje, el par y el rendimiento.

La aplicación del CFD al estudio de hélices presenta importantes ventajas, entre las que destacan la reducción de costes, la posibilidad de analizar múltiples configuraciones geométricas y condiciones de operación, y el acceso a información detallada del campo de flujo, como distribuciones de presión y velocidad. Estas capacidades resultan especialmente útiles en el análisis de hélices carenadas, donde la interacción entre la hélice y el conducto genera fenómenos hidrodinámicos complejos difíciles de caracterizar únicamente mediante ensayos experimentales.

Los estudios numéricos de hélices suelen basarse en modelos de flujo turbulento, empleando formulaciones promediadas de las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS) junto con modelos de turbulencia adecuados. Asimismo, el uso de dominios rotatorios y técnicas como el *sliding mesh* o el *múltiple reference frame* (MRF) permite reproducir el efecto de la rotación de la hélice y evaluar su comportamiento en condiciones estacionarias o transitorias [13].

En el ámbito de los vehículos submarinos no tripulados, el CFD se ha convertido en una herramienta especialmente valiosa para la caracterización de propulsores comerciales, ya que permite obtener las curvas de rendimiento hidrodinámico en ausencia de datos experimentales detallados proporcionados por los fabricantes. De este modo, la simulación numérica facilita la integración de modelos de propulsión más precisos en el análisis dinámico y el diseño de ROV.

No obstante, la fiabilidad de los resultados obtenidos mediante CFD depende en gran medida de la correcta definición del modelo numérico, incluyendo la geometría, el mallado, las condiciones de contorno y el modelo de turbulencia empleado. Por este motivo, la simulación CFD debe ser considerada como una herramienta complementaria a los ensayos experimentales, cuyo uso requiere una validación adecuada y un análisis crítico de los resultados obtenidos. En este sentido, diversos estudios han empleado simulaciones CFD para el análisis de hélices, comparando sus resultados con datos experimentales y obteniendo una buena concordancia, como se recoge en el trabajo de Liu et al [9].

En el presente trabajo, la caracterización hidrodinámica de la hélice se abordará mediante simulación CFD empleando el software ANSYS Fluent, cuya aplicación concreta se describe en el capítulo de metodología [15].

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Descripción del apartado

En el presente apartado se explicará el proceso de elaboración del Trabajo Fin de Grado, que está dividido en tres fases representadas en la Figura 3-1.



Figura 3-1 Diagrama de las fases del proyecto (elaboración propia)

En primer lugar, se comienza con el estudio previo de la hélice y la obtención de su nube de puntos mediante escaneado 3D. A continuación, se lleva a cabo la reconstrucción geométrica precisa de la hélice real en entorno CAD. Finalmente, se obtienen los resultados del rendimiento hidrodinámico mediante simulación CFD.

3.2 Estudio previo

Antes de iniciar el proceso de escaneado y modelado, se realizó un análisis preliminar de la hélice del propulsor T200, con el objetivo de comprender sus características geométricas generales y las condiciones de operación indicadas por el fabricante.

El propulsor T200, desarrollado por Blue Robotics, incorpora una hélice de tres palas de paso fijo, diseñada para operar en entornos submarinos y generar empuje tanto en modo directo como inverso. La hélice se encuentra integrada en un sistema carenado, lo que influye en su comportamiento hidrodinámico y en la distribución del flujo alrededor de las palas.

A partir de la documentación técnica facilitada por el fabricante, se identificaron los principales parámetros geométricos y de operación disponibles, tales como el diámetro nominal, el régimen máximo de giro y los valores de empuje proporcionados para distintas condiciones de funcionamiento. No obstante, dicha información no incluye detalles completos de la geometría de las palas ni curvas hidrodinámicas adimensionales, lo que justifica la necesidad de realizar una caracterización propia mediante técnicas de ingeniería inversa y simulación numérica.

En esta fase preliminar también se llevó a cabo una inspección visual y dimensional de la hélice real, verificando aspectos como el número de palas, la simetría geométrica y la configuración del cubo central.

Este análisis permitió definir la estrategia de escaneado posterior, identificando las zonas de mayor interés geométrico y aquellas susceptibles de ser modeladas mediante medición directa.

3.3 Escaneado 3D

En este apartado se detalla el procedimiento de obtención de la geometría de la hélice mediante escaneado 3D, utilizando el software Artec Studio para la adquisición y procesado de la nube de puntos. Se describe la estrategia adoptada para optimizar el escaneado, así como el tratamiento posterior de los datos obtenidos hasta la generación de una geometría apta para su modelado CAD [16].

3.3.1 Estrategia de escaneado

La hélice analizada está compuesta por tres palas idénticas distribuidas de forma uniforme alrededor del eje de rotación como se puede apreciar en la Figura 3-2. Esta simetría geométrica permitió definir desde el inicio una estrategia de escaneado optimizada, centrada exclusivamente en una única pala. Dado que las tres palas son equivalentes, la geometría completa de la hélice puede reconstruirse posteriormente en el entorno CAD mediante operaciones de patrón circular, evitando así la adquisición redundante de datos.

Esta decisión redujo de manera considerable el tiempo de escaneado y procesado, manteniendo al mismo tiempo la fidelidad geométrica necesaria para el análisis posterior.

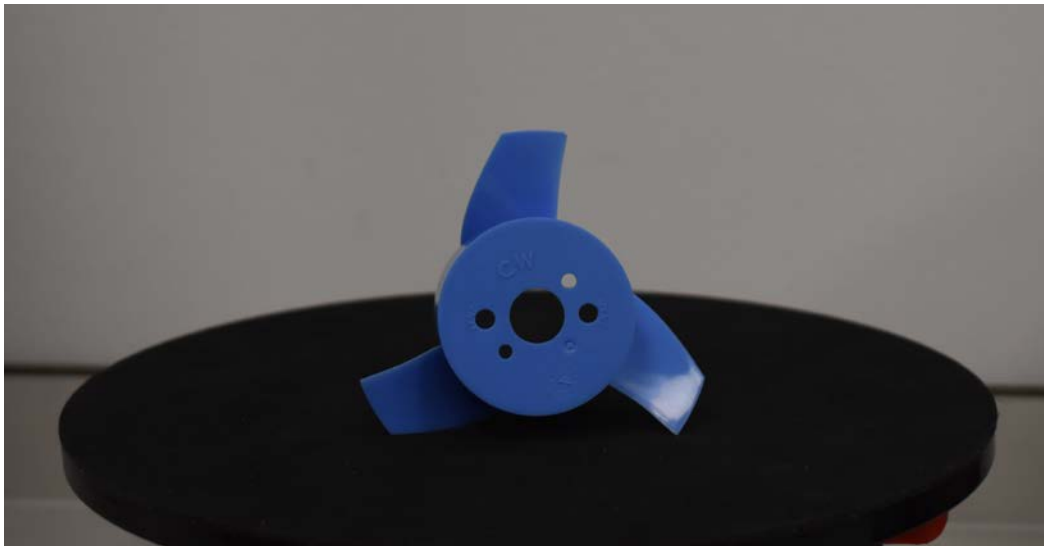


Figura 3-2 Hélice inicial

Durante las primeras pruebas de adquisición se observó que el escáner dedicaba un tiempo significativo a capturar el interior del cubo central hueco, zona que no resulta determinante para el estudio hidrodinámico de las palas. Con el objetivo de optimizar el proceso y centrar la captura en las superficies de interés, se diseñó y fabricó mediante impresión 3D una pieza auxiliar a medida, destinada a rellenar temporalmente dicho volumen interior.

Esta solución permitió reducir interferencias en la adquisición de datos y mejorar la eficiencia del escaneado.

La Figura 3-3 ilustra la solución adoptada, donde puede apreciarse la pieza auxiliar diseñada para cubrir el volumen interior del cubo y facilitar la adquisición de datos en las palas.

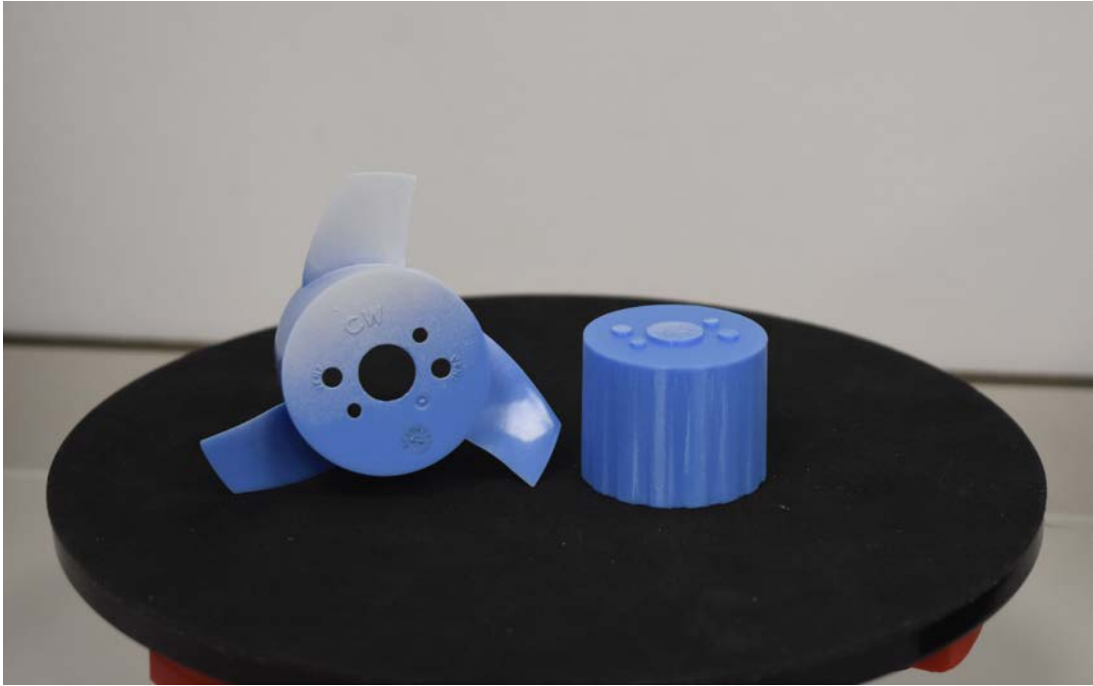


Figura 3-3 Impresión 3D

Adicionalmente, para mejorar la calidad de la captura y minimizar posibles errores derivados de reflejos o variaciones superficiales, se aplicó un spray de escaneado de la marca AESUB, diseñado específicamente para aplicaciones de metrología óptica. Este recubrimiento genera una capa superficial mate que facilita la lectura por parte del escáner, permitiendo obtener una nube de puntos más homogénea y precisa [17].

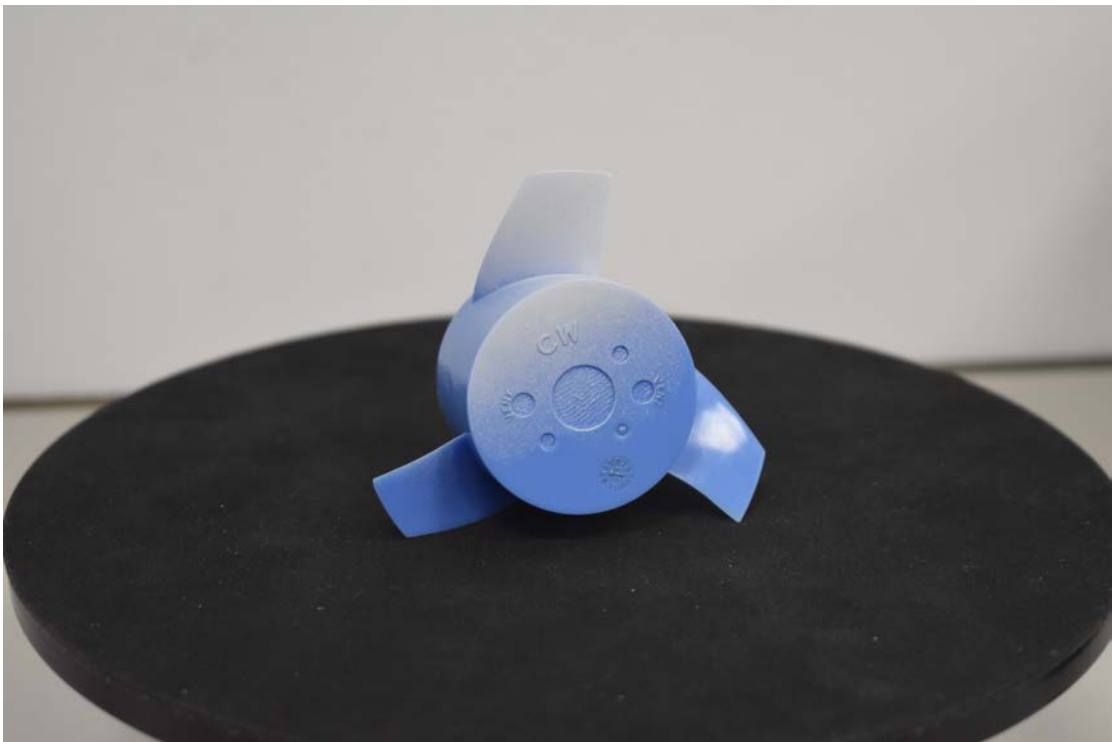


Figura 3-4 Aplicación del spray de escaneado

El proceso de adquisición se inició con la realización de dos escaneos de la pala desde distintas orientaciones. Si bien estos escaneos podían alinearse y fusionarse correctamente en el software, el resultado obtenido no presentaba la calidad geométrica deseada, especialmente en la zona superior del álabe [18]. En determinadas áreas no se apreciaba con suficiente claridad el grosor de la pala, lo que podía comprometer la precisión del modelado posterior en CAD.

En la Figura 3-5 se muestra el resultado de la fusión inicial de los dos primeros escaneos, donde puede apreciarse la falta de definición en determinadas zonas del álabe.

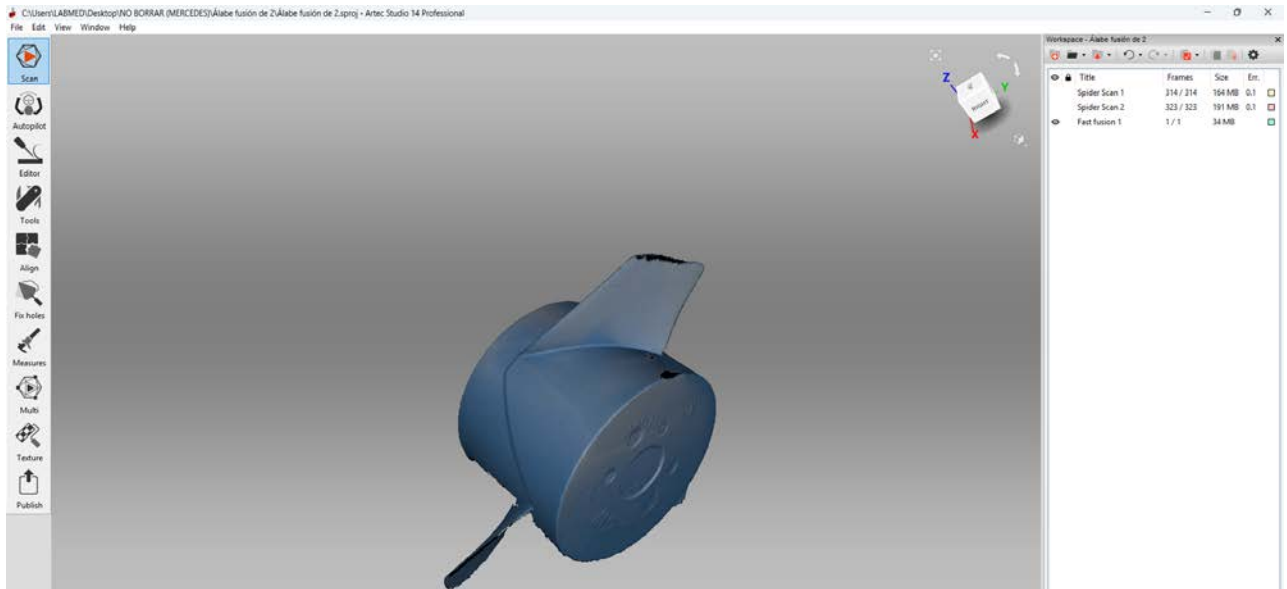


Figura 3-5 Fusión inicial de los dos primeros escaneos de la pala en Artec Studio

Con el objetivo de mejorar la definición de estas zonas críticas, se realizó un tercer escaneo adicional, orientado específicamente a capturar con mayor detalle el espesor del álabe. Este escaneo permitió completar la información geométrica necesaria para definir correctamente ambas caras de la pala.

Finalmente, se procedió a la alineación y fusión de los tres escaneos independientes en el software Artec Studio, generando una nube de puntos final más completa y homogénea, adecuada para su posterior reconstrucción geométrica.

En la Figura 3-6 se muestra el resultado obtenido, donde puede apreciarse la correcta definición del grosor de la pala y la continuidad de la nube de puntos en ambas superficies.

Tras el procesado final, se obtuvo un error medio aproximado de $0,1\text{ mm}$, valor que se considera adecuado para los objetivos del presente trabajo [18], garantizando la precisión geométrica necesaria para la reconstrucción en CAD y la simulación CFD posterior.

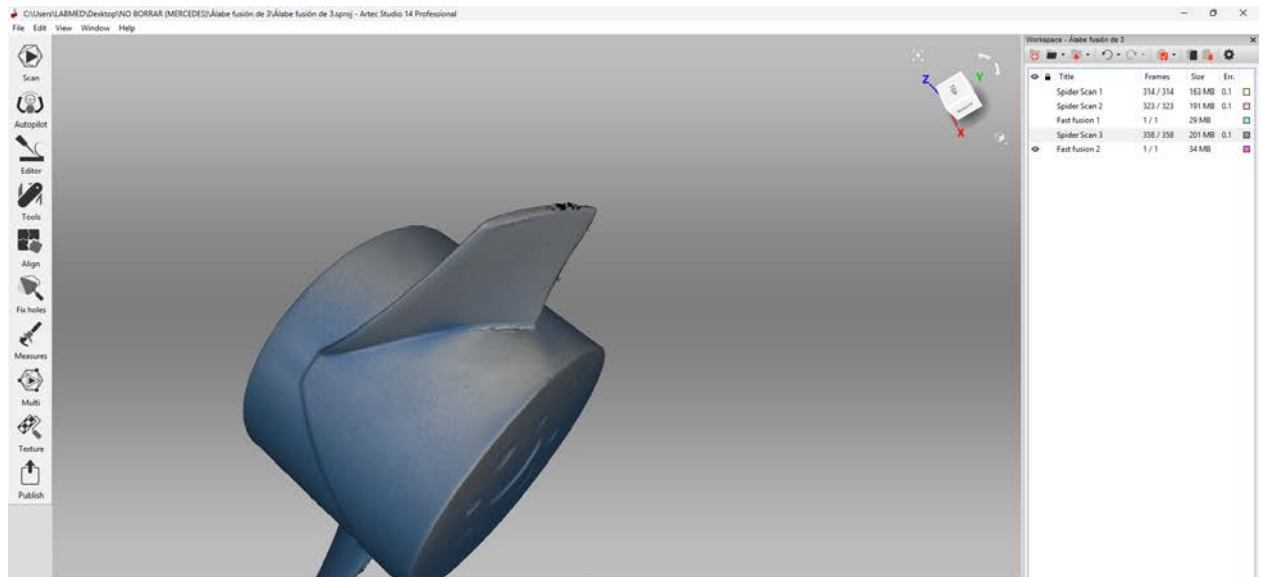


Figura 3-6 Fusión final de los tres escaneos independientes y mapa de error

3.4 Reconstrucción CAD de la hélice

Una vez obtenida la nube de puntos definitiva mediante el escaneado 3D, se procedió a la reconstrucción geométrica de la pala en entorno CAD utilizando Autodesk Inventor [19]. El objetivo de esta fase fue generar un modelo tridimensional sólido, continuo y geoméricamente coherente, apto para su posterior mallado y análisis mediante simulación CFD.

Dado que la nube de puntos no constituye directamente una geometría utilizable en simulación numérica, fue necesario llevar a cabo un proceso de reconstrucción basado en la generación de superficies ajustadas a la forma real del álabe.

El modelado se inició con la reconstrucción de una única pala, aprovechando la simetría geométrica de la hélice para su posterior replicación.

3.4.1 Importación y preparación de la nube de puntos

A partir del proceso de escaneado 3D, se obtuvo una nube de puntos correspondiente a una de las palas de la hélice del propulsor. Esta nube fue importada en el entorno CAD con el objetivo de servir como base para la reconstrucción geométrica del álabe.

En esta fase inicial, se llevó a cabo un proceso de preparación de la nube de puntos, consistente en la eliminación de ruido, la corrección de posibles discontinuidades y la verificación de la coherencia geométrica del modelo obtenido. Este tratamiento previo resulta fundamental para garantizar la calidad de la información de partida en procesos de ingeniería inversa.

No obstante, durante el intento de reconstrucción directa de superficies a partir de la nube de puntos, se comprobó que la generación de una geometría continua, suave y editable presentaba una elevada complejidad. En particular, la naturaleza curva y variable del álabe dificultaba la creación de superficies paramétricas controladas, lo que comprometía su posterior uso en el entorno CAD y, especialmente, en la generación de la malla para simulación CFD.

Debido a estas limitaciones, se consideró necesario adoptar una estrategia alternativa que permitiera obtener una representación geométrica más robusta y manejable.

3.4.2 Análisis comparativo inicial

Con el objetivo de evaluar la fiabilidad de la geometría obtenida mediante escaneado, se procedió a realizar un análisis comparativo con la geometría de la hélice proporcionada por el fabricante. Esta

comparación se llevó a cabo evaluando la similitud entre los perfiles generados a partir del escaneado y las superficies del modelo original.

El análisis permitió comprobar que ambas geometrías presentan una elevada concordancia en términos de forma global, distribución del espesor y curvatura del álabe. Esta similitud confirma la validez del proceso de escaneado y de la estrategia de generación de secciones empleada.

A partir de esta verificación, se concluyó que la geometría proporcionada por el fabricante era representativa del modelo real y podía ser utilizada como base fiable para el desarrollo del estudio, evitando la complejidad y el coste asociado a una reconstrucción completa mediante ingeniería inversa.

Con el fin de reforzar esta comparación, en la Figura 3-7 se muestra la superposición entre la geometría obtenida mediante escaneado y el modelo proporcionado por el fabricante, donde ambas se han alineado en la misma posición para facilitar su análisis.

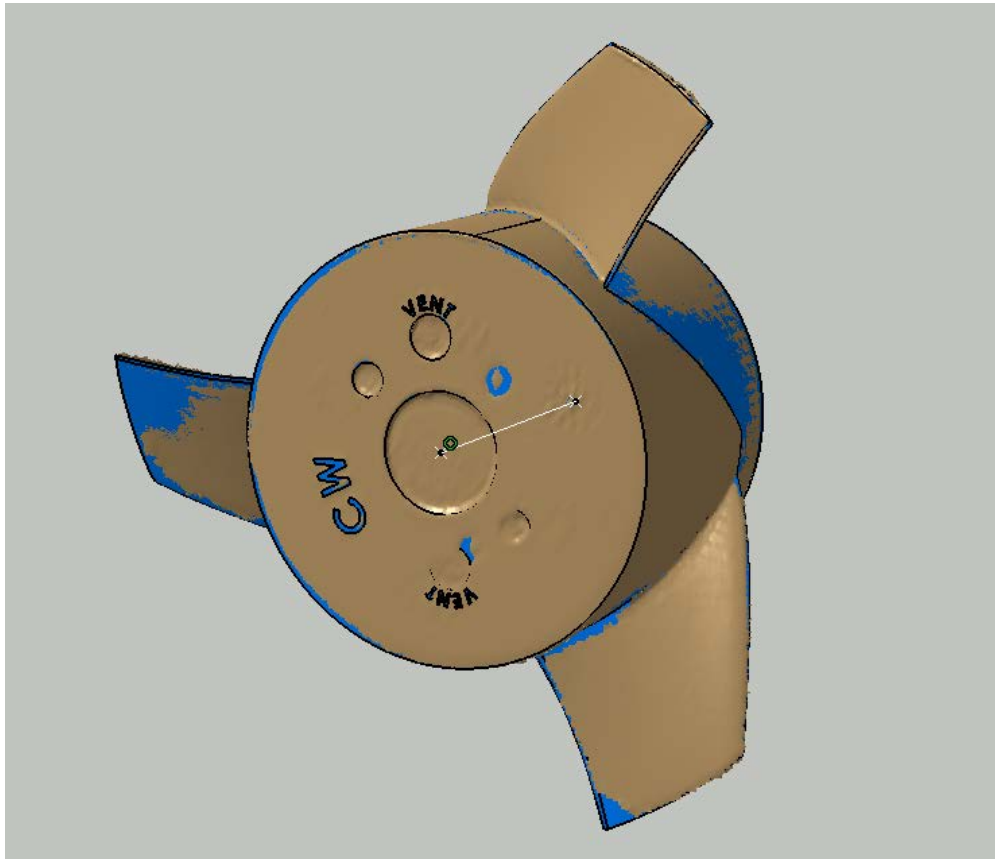


Figura 3-7 Comparación entre la geometría escaneada y la proporcionada por el fabricante, alineadas en la misma posición para su validación

En dicha figura puede apreciarse que ambas geometrías presentan una elevada similitud, observándose una buena correspondencia en la forma de los álabes, su orientación y su distribución espacial. Esta concordancia valida tanto la precisión del proceso de escaneado como la representatividad de la geometría proporcionada por el fabricante.

Con el objetivo de realizar un análisis más detallado, en la Figura 3-8 se muestra la comparación directa entre el álabe real y el obtenido mediante escaneado, centrando la atención en una única pala.

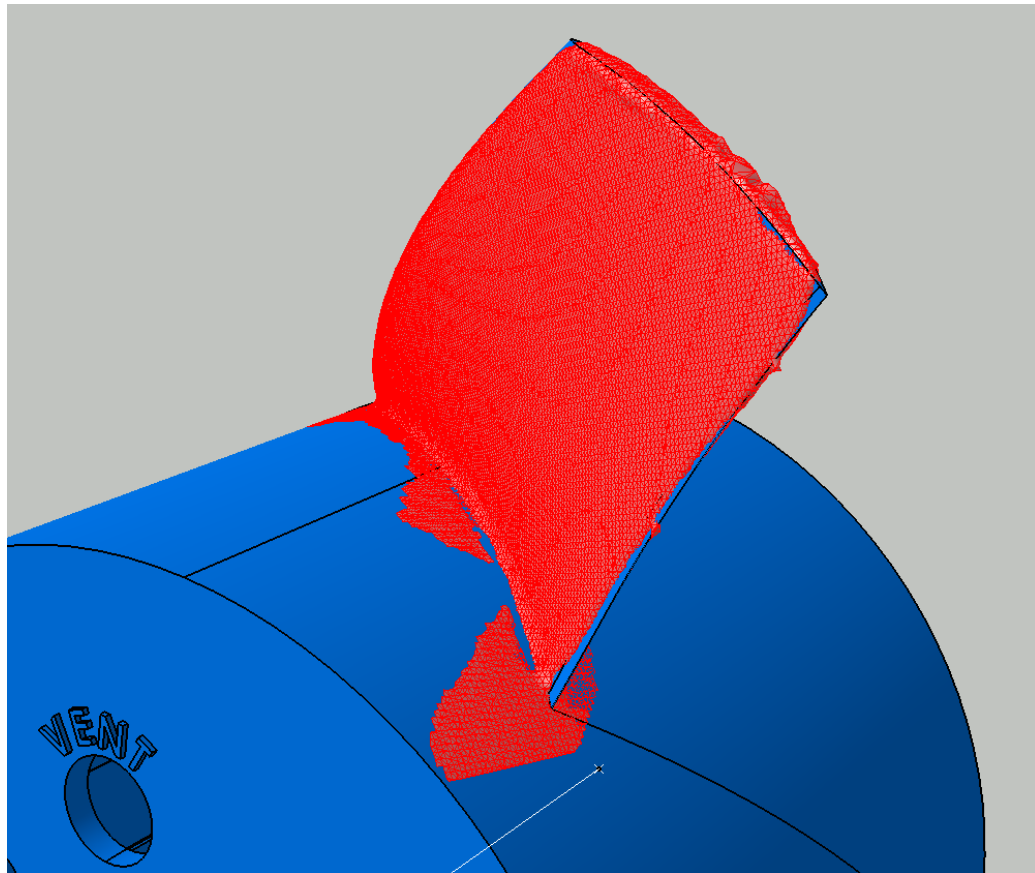


Figura 3-8 Comparación entre el álabe real y el obtenido mediante escaneado, destacando la similitud en las superficies y las limitaciones en la definición del espesor

En esta figura se observa que la superficie visible del álabe presenta una elevada similitud entre ambas geometrías, lo que confirma la validez del proceso de escaneado en la captura de la forma global de la pala.

No obstante, se aprecia que el escaneado presenta ciertas limitaciones en la representación del espesor del álabe, especialmente en las zonas más delgadas, donde la resolución de la nube de puntos no permite definir con precisión la geometría completa.

A pesar de esta limitación, la comparación con la geometría del fabricante permite inferir que el perfil del álabe sigue una tendencia coherente, por lo que se considera que la geometría proporcionada constituye una representación suficientemente fiel para su utilización en el análisis posterior.

A partir de este análisis preliminar, y con el fin de estudiar con mayor detalle la geometría del álabe, se adoptó una metodología basada en la generación de secciones radiales.

3.4.3 Generación de secciones del álabe

Con el objetivo de simplificar la reconstrucción geométrica y mejorar el control sobre la forma del álabe, se optó por una metodología basada en la generación de secciones transversales. Para ello, se definieron planos de corte mediante superficies curvas con centro en el eje de rotación de la hélice, permitiendo obtener perfiles representativos a distintas posiciones radiales.

Estas secciones permiten capturar la evolución geométrica del álabe desde la raíz hasta la punta, incluyendo variaciones en el espesor y curvatura. De este modo, se obtiene una descripción más estructurada de la geometría, facilitando su análisis y comparación.

El conjunto de perfiles generados constituye una aproximación fiel de la geometría real del álabe, permitiendo reconstruir su forma de manera progresiva y controlada, evitando los problemas asociados a la reconstrucción directa a partir de la nube de puntos.

Con el objetivo de ilustrar la metodología empleada, en la Figura 3-9 se muestra la comparación entre las secciones del álabe obtenidas a partir de la geometría escaneada y de la geometría proporcionada por el fabricante.

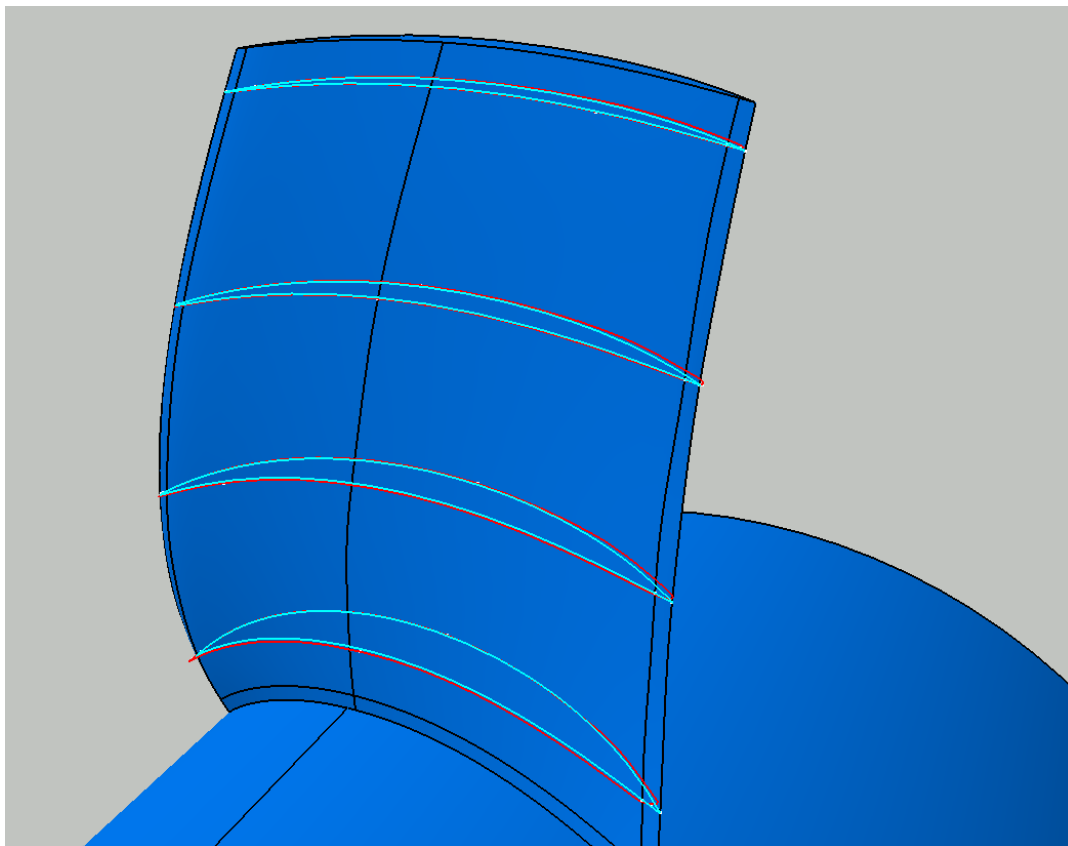


Figura 3-9 Comparación de secciones del álabe obtenidas a partir del escaneado y de la geometría del fabricante

En la figura se observa que los perfiles generados en ambas geometrías presentan una elevada similitud, lo que permite comprobar la coherencia de la forma del álabe a lo largo de su desarrollo radial.

Esta comparación refuerza la validez del proceso de escaneado y confirma que la geometría del fabricante reproduce adecuadamente las características principales del perfil del álabe, especialmente en términos de curvatura y distribución geométrica.

De este modo, el análisis mediante secciones constituye una herramienta eficaz para la validación geométrica del modelo.

Este procedimiento proporciona una base sólida para el análisis geométrico del álabe y facilita su posterior validación frente a modelos de referencia.

3.4.4 Validación geométrica y selección del modelo

En base a los resultados del análisis comparativo, se optó por utilizar la geometría de la hélice proporcionada por el fabricante como modelo de referencia para el desarrollo del trabajo. Esta decisión se fundamenta en criterios de eficiencia, precisión geométrica y viabilidad del proceso de modelado.

A partir de dicha geometría, se llevó a cabo un proceso de limpieza y simplificación en entorno CAD, eliminando elementos no relevantes para el análisis hidrodinámico, tales como pequeñas imperfecciones, detalles superficiales o características geométricas sin influencia significativa en el flujo.

Esta simplificación permite obtener un modelo más adecuado para la generación de malla y la simulación CFD, reduciendo el coste computacional y mejorando la estabilidad numérica del modelo.

De este modo, se garantiza un equilibrio entre fidelidad geométrica y eficiencia computacional, aspecto clave en el desarrollo de simulaciones numéricas de este tipo.

Esta validación conjunta, basada tanto en la comparación global como en el análisis por secciones, permitió confirmar la coherencia geométrica del modelo y justificar el empleo de la geometría del fabricante como base del modelo CAD.

3.4.5 Modelado simplificado del cubo

En lo que respecta al cubo central de la hélice, se optó por realizar un modelado geométrico simplificado en el entorno CAD. La geometría real presenta pequeños huecos, relieves e inscripciones superficiales que, si bien forman parte del diseño constructivo del componente, no tienen una influencia significativa en el análisis hidrodinámico del rendimiento de la hélice en el contexto del presente estudio. Por este motivo, dichos detalles no fueron reproducidos en el modelo digital.

El modelado se limitó a la definición del volumen exterior principal del cubo y del hueco interno necesario para garantizar la correcta integración de la hélice en el ensamblaje con el resto del propulsor, incluyendo la tobera y los elementos estructurales externos. Esta aproximación permite mantener la coherencia geométrica del conjunto sin introducir complejidad innecesaria en el mallado ni incrementar el coste computacional de la simulación.

Desde el punto de vista del cálculo del rendimiento, estas simplificaciones no afectan a los resultados obtenidos, ya que el análisis CFD se centra en la interacción del flujo con las superficies activas de las palas. Tal y como se detallará en el apartado correspondiente a la definición del dominio fluido, se establecerán superficies de entrada y salida de flujo definidas como planos lisos, de modo que las irregularidades superficiales del cubo real no influyen de forma apreciable en la determinación del empuje, el par ni los coeficientes adimensionales.

En consecuencia, el modelado simplificado del cubo central responde a un criterio de optimización orientado a la simulación, priorizando la representatividad física del fenómeno sobre la reproducción exacta de detalles constructivos sin relevancia hidrodinámica.

3.4.6 Ensamblaje final

Una vez definida la reconstrucción geométrica de la hélice, se procedió a la realización del ensamblaje completo del propulsor carenado en el entorno CAD. Para ello, se emplearon las piezas principales proporcionadas por el fabricante de Blue Robotics, correspondientes a la tobera y a los elementos estructurales externos del conjunto.

Con el fin de adaptar el modelo al requerimiento de la simulación CFD, se simplificaron determinadas geometrías secundarias que no influyen de forma significativa en el comportamiento hidrodinámico global, eliminando pequeños detalles constructivos y elementos de fijación no relevantes para el análisis.

El ensamblaje se realizó mediante la aplicación de restricciones geométricas apropiadas en Autodesk Inventor, asegurando la correcta alineación de la hélice con el eje del propulsor y su posicionamiento relativo respecto a la tobera. Se emplearon restricciones de concentricidad para garantizar la coincidencia de ejes y restricciones de apoyo para definir la posición axial del conjunto.

La Figura 3-10 ilustra la aplicación de restricciones geométricas para la alineación del eje.

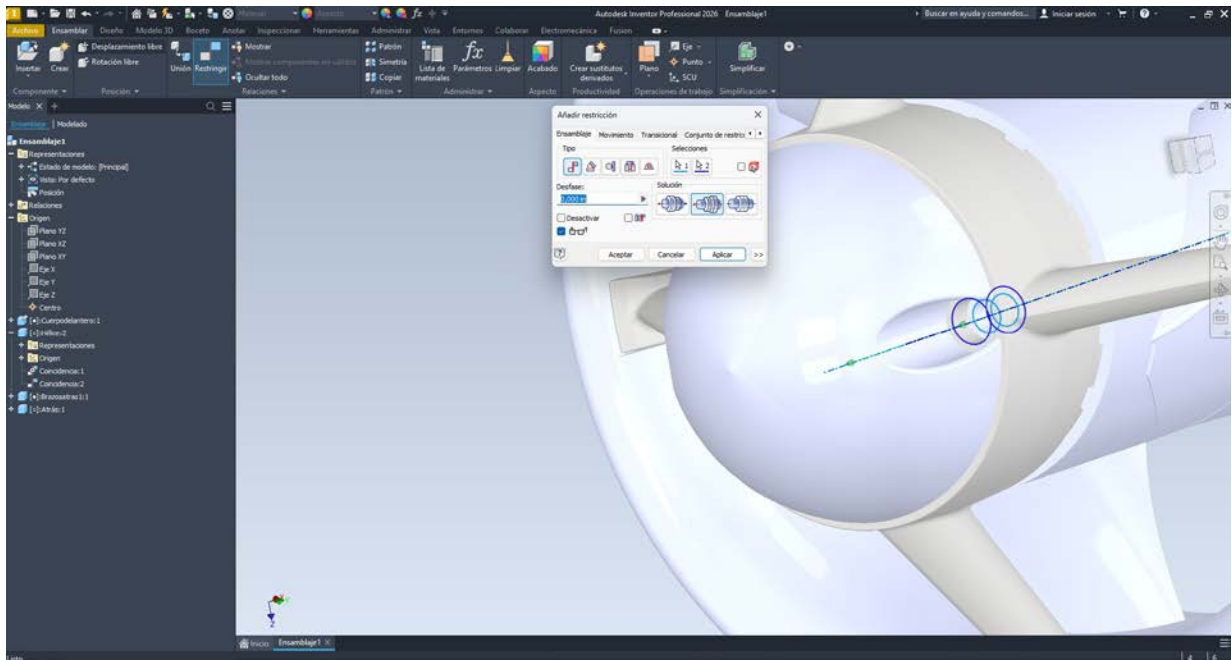


Figura 3-10 Restricción por coincidencia de ejes

Además de las restricciones de concentricidad para garantizar la coincidencia de ejes, se aplicaron restricciones de coincidencia de caras con el fin de definir la posición axial exacta de la hélice respecto a la tobera y evitar desplazamientos no deseados en la dirección longitudinal.

En la Figura 3-11 se muestra un ejemplo de la aplicación de restricciones de cara durante el proceso de ensamblaje.

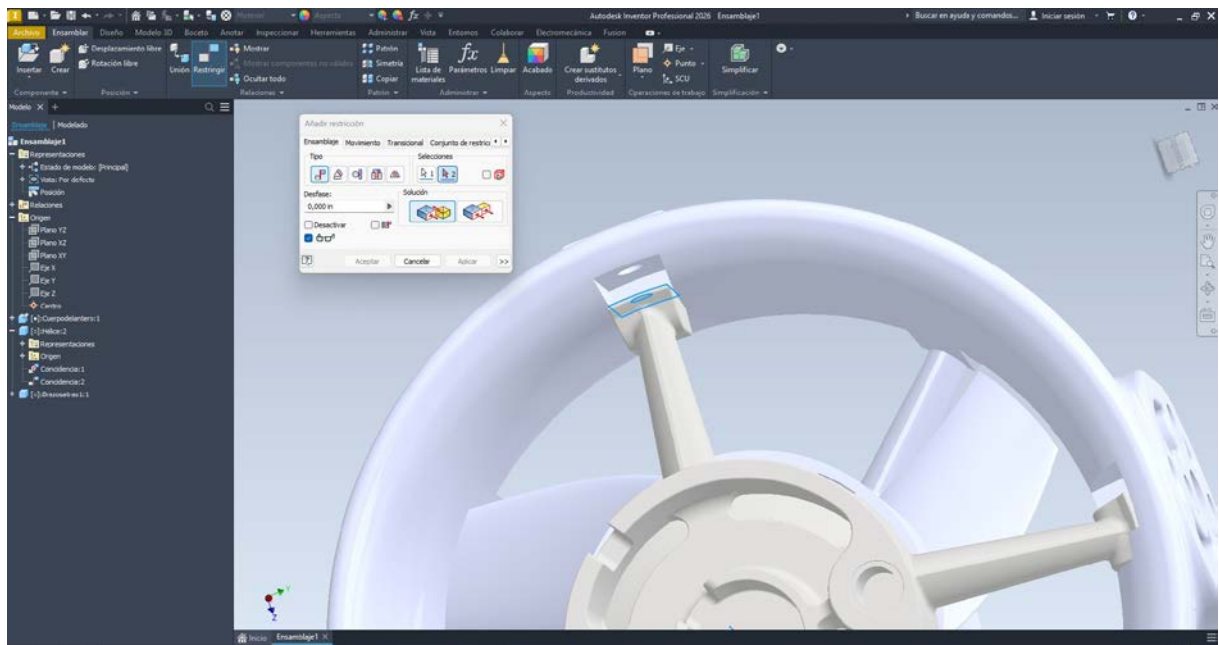


Figura 3-11 Aplicación de restricciones geométricas de coincidencia de caras en el ensamblaje del propulsor

Asimismo, se configuró el grado de libertad correspondiente a la rotación de la hélice alrededor de su eje, permitiendo su posterior definición como región rotatoria en el entorno CFD.

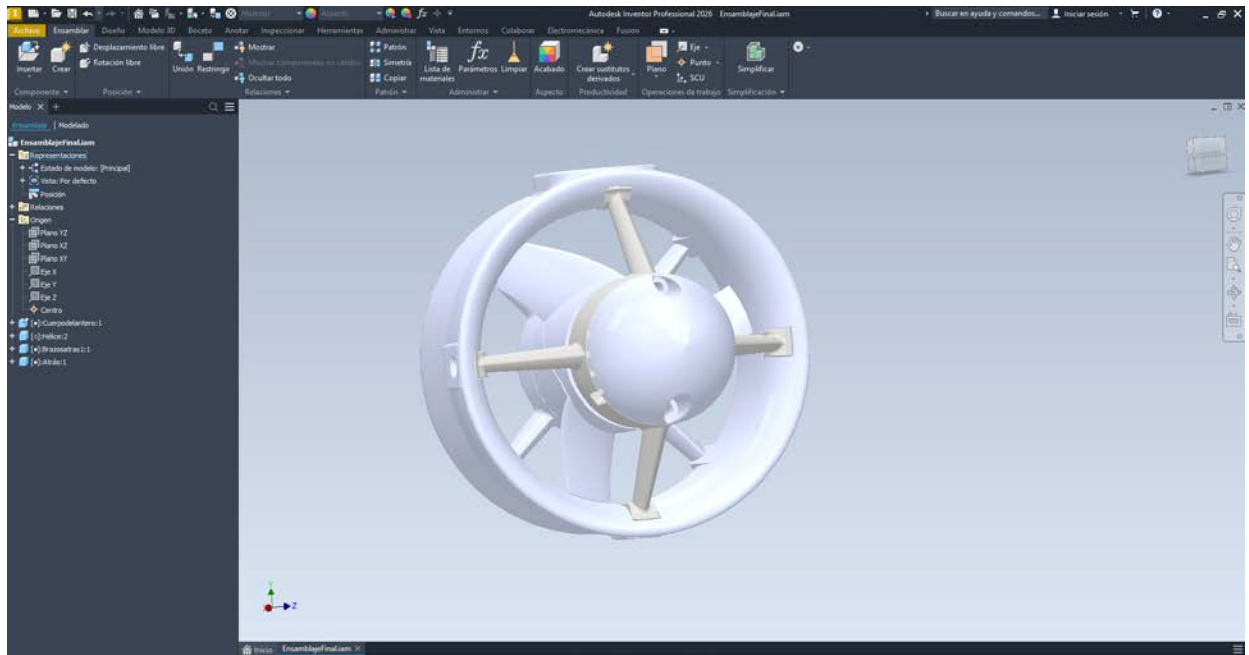


Figura 3-12 Conjunto final ensamblado del propulsor carenado

El modelo ensamblado obtenido constituye la representación geométrica definitiva del propulsor carenado, a partir de la cual se procederá a la definición del dominio computacional y al análisis mediante simulación CFD.

Con el objetivo de facilitar la comprensión del conjunto y de las distintas partes que lo componen, en la Figura 3-13 se muestra una vista explosionada del ensamblaje del propulsor.

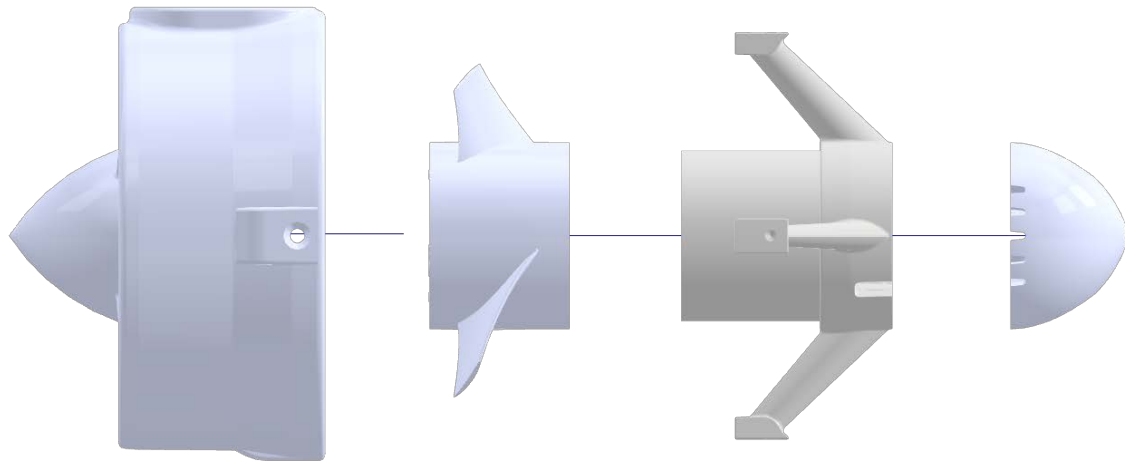


Figura 3-13 Vista explosionada del ensamblaje del propulsor T200

En esta representación pueden identificarse las principales piezas del sistema, tales como la hélice, el núcleo central, el cono de entrada y la tobera, las cuales serán consideradas posteriormente en la configuración del modelo CFD.

3.5 Configuración del modelo CFD

En este apartado se describe la configuración general del modelo de simulación CFD empleado en el presente trabajo. Se detallan los aspectos relacionados con la definición del dominio computacional, la generación de la malla y las condiciones de contorno utilizadas en las simulaciones.

La configuración descrita en esta sección se empleará tanto en el proceso de validación del modelo numérico como en la simulación del propulsor T200, garantizando así la coherencia metodológica entre los diferentes análisis realizados.

3.5.1 Definición del dominio computacional

En el marco de la simulación CFD, el dominio computacional se define como el volumen de fluido en el que se resuelven las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del flujo alrededor de la hélice. En el presente estudio, dicho dominio corresponde al volumen de agua que rodea a la hélice y en el que se analizará su rendimiento hidrodinámico.

Con el objetivo de optimizar el proceso de preprocesado y evitar la realización de operaciones booleanas adicionales en el entorno de mallado de ANSYS, se decidió generar directamente el volumen del fluido en el entorno CAD, utilizando Autodesk Inventor. Para ello, se creó inicialmente un cilindro macizo que contenía la hélice reconstruida en su interior. Posteriormente, mediante una operación de sustracción booleana, se eliminó el sólido correspondiente a la hélice, obteniéndose como resultado el volumen del fluido a simular.

En la Figura 3-14 se muestra la geometría inicial Autodesk Inventor, donde puede apreciarse el cilindro macizo definido como dominio envolvente y la hélice situada en su interior.

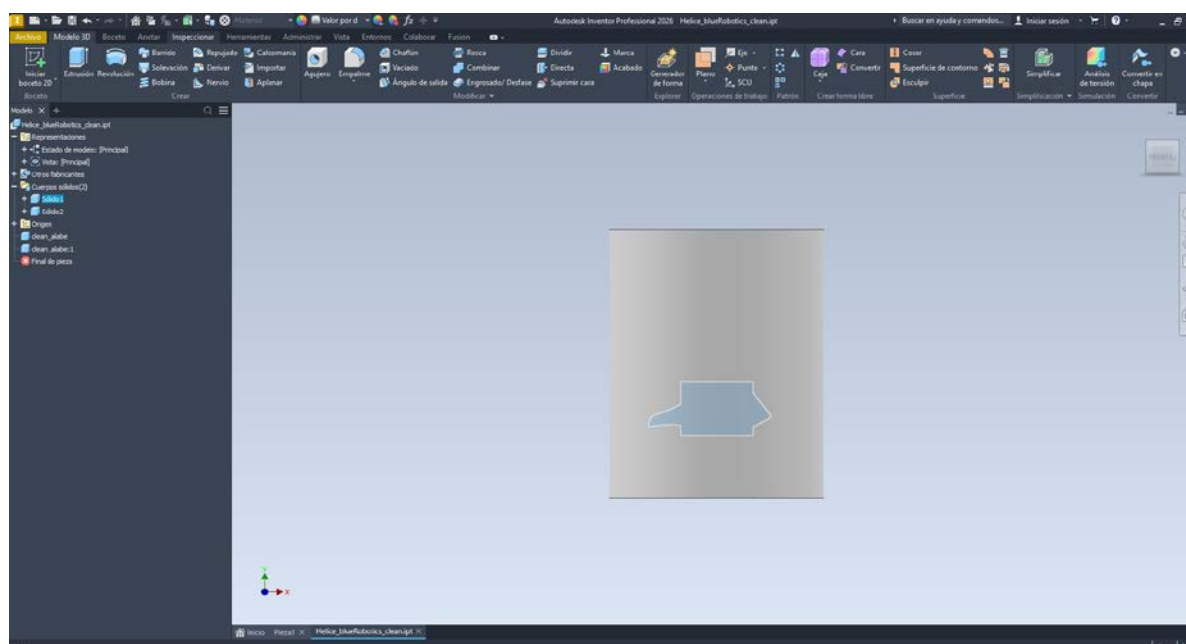


Figura 3-14 Cilindro envolvente que contiene la hélice antes de la operación de sustracción

Para la obtención del volumen fluido, se empleó la herramienta *Combinar* del entorno CAD, utilizando la opción de sustracción para restar el sólido de la hélice al cilindro envolvente. Como resultado, se obtuvo el volumen correspondiente al fluido, que constituye el dominio computacional inicial para la simulación CFD.

En la Figura 3-15 se muestra el sólido resultante, correspondiente al volumen del fluido, preparado para su exportación al entorno de mallado en ANSYS Fluent.

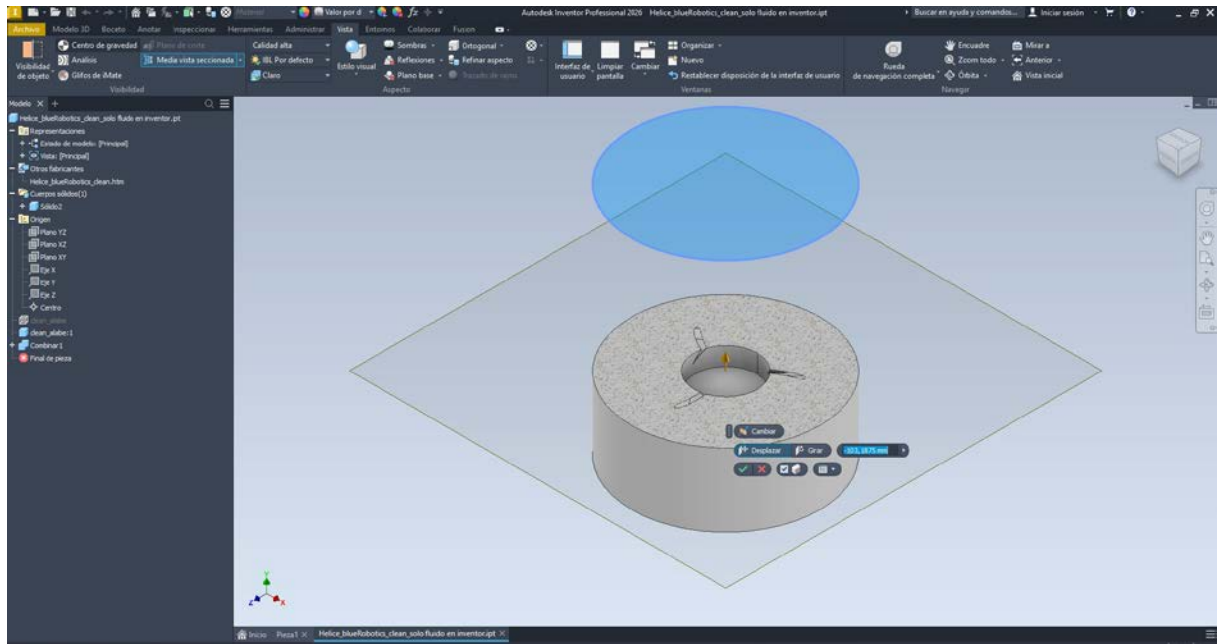


Figura 3-15 Dominio fluido simplificado inicial

No obstante, con el fin de representar de forma más realista el comportamiento del flujo alrededor de la hélice, se adoptó una configuración más avanzada del dominio computacional, basada en la separación del volumen del fluido en dos regiones diferenciadas: una región rotatoria próxima a la hélice y una región estacionaria exterior.

Para ello, en el entorno CAD se generaron dos cilindros coaxiales alineados con el eje de rotación del propulsor. El primer cilindro, de menor diámetro, se definió envolviendo directamente la hélice y constituye la región que, en la simulación CFD, será modelada como dominio rotatorio. Esta región permite representar el movimiento relativo del fluido inducido por la rotación de la hélice.

El segundo cilindro, de mayor diámetro, define el dominio exterior estacionario. Posteriormente, se realizó una operación booleana de sustracción entre ambos cilindros, obteniéndose un volumen anular que representa la región de fluido estática que rodea a la zona rotatoria.

De este modo, el dominio computacional final quedó dividido en dos volúmenes diferenciados: un volumen interior destinado a simular el efecto de rotación y un volumen exterior estacionario que reproduce el flujo incidente y su desarrollo aguas arriba y aguas abajo del propulsor. Esta configuración permite aplicar posteriormente en ANSYS Fluent un modelo de región rotativa, mejorando la representación física del problema frente a un dominio completamente estacionario.

En la Figura 3-16 se muestra un corte longitudinal del dominio computacional, donde puede apreciarse la región rotatoria interior, que contiene el vacío correspondiente a la hélice, y la región estacionaria exterior que rodea dicha zona.

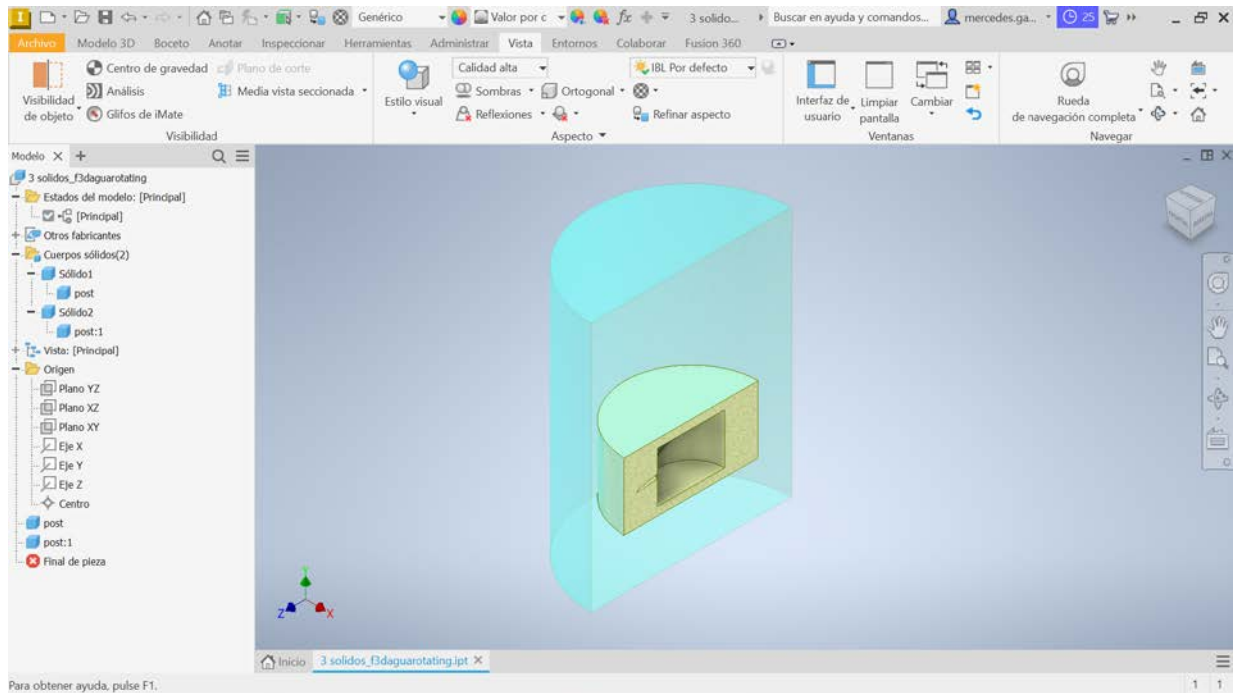


Figura 3-16 Sección longitudinal del dominio computacional con separación de región rotatoria (interior) y región estacionaria (exterior)

Esta configuración geométrica permite aplicar en la simulación CFD un modelo de referencia rotatoria en la región interior, manteniendo el dominio exterior en reposo relativo.

3.5.1 Generación y configuración de la malla

Una vez definido el dominio computacional, el siguiente paso en el proceso de simulación CFD consiste en la generación de la malla. La malla representa la discretización del dominio fluido en un conjunto finito de elementos o celdas, sobre los cuales se resuelven numéricamente las ecuaciones que describen el comportamiento del flujo.

El proceso de mallado se realizó en el entorno de preprocesado de ANSYS, donde se generó una malla tridimensional adaptada a la geometría del dominio computacional previamente definido. Con el objetivo de obtener una representación adecuada del flujo alrededor de la hélice, se estableció un rango de tamaño de elemento que permite adaptar la resolución de la malla a las diferentes regiones del dominio.

En particular, se emplearon elementos de menor tamaño en las zonas próximas a la hélice y en la región rotatoria, donde se producen mayores variaciones de velocidad y presión debido al movimiento del propulsor. Por el contrario, en las regiones más alejadas de la hélice se utilizaron elementos de mayor tamaño, permitiendo reducir el número total de celdas del modelo sin afectar significativamente a la precisión de los resultados.

Esta estrategia permite concentrar la resolución de la malla en las zonas de mayor interés hidrodinámico, manteniendo al mismo tiempo un coste computacional razonable para la ejecución de las simulaciones.

Para ello, durante el proceso de generación de mallado se definió un rango de tamaño de elemento que permite ajustar valores mínimo y máximo de las celdas del dominio. De este modo, se obtiene una mayor resolución en las regiones cercanas a la hélice, mientras que en las zonas más alejadas se emplean elementos de mayor tamaño.

En la Figura 3-17 se muestra la configuración de los parámetros utilizados durante la generación de la malla en el entorno de ANSYS. En particular, se definieron los valores mínimo y máximo de tamaño de elemento, así como el factor de crecimiento de la malla, que controla la transición entre regiones de

distinto tamaño de celda. Además, se empleó una función de tamaño basada en curvatura y proximidad, lo que permite adaptar automáticamente la resolución de la malla a las características geométricas del modelo.

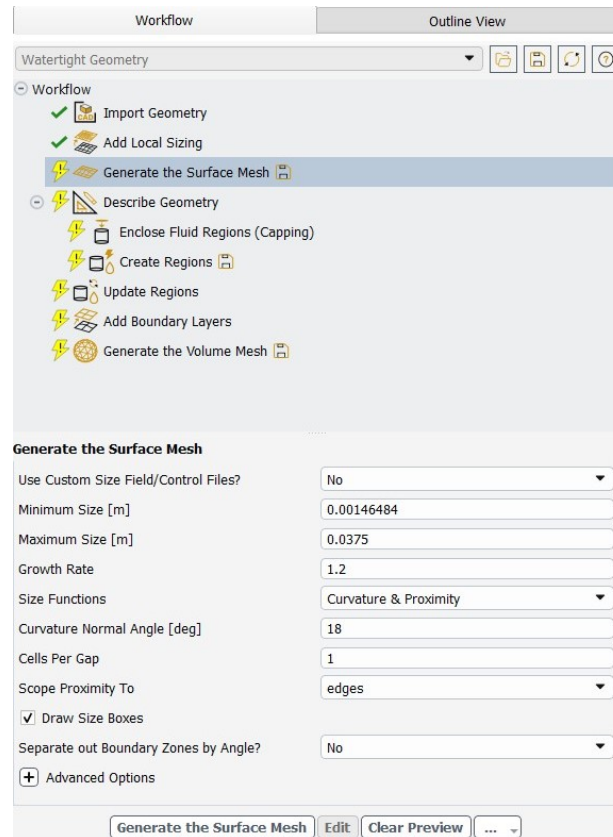


Figura 3-17 Configuración de mallado en ANSYS

Una vez definidos los parámetros de mallado y generada la malla correspondiente, se procedió a la definición de las condiciones de contorno y de los parámetros de simulación empleados en el modelo CFD.

3.5.2 Condiciones de contorno y parámetros de simulación

Una vez generado el dominio computacional y la malla correspondiente, el siguiente paso consiste en definir las condiciones de contorno y los parámetros de simulación que permiten resolver el comportamiento del flujo alrededor de la hélice.

En primer lugar, se establecieron las superficies que delimitan el dominio fluido, asignando a cada una de ellas las condiciones físicas correspondientes. La superficie situada en la entrada del dominio se definió como entrada de velocidad (velocity inlet), donde se establece la velocidad del flujo incidente. Por su parte, la superficie situada en la salida del dominio se definió como salida de presión (pressure outlet), permitiendo que el flujo abandone el dominio computacional.

Las superficies correspondientes a la geometría de la hélice se definieron como paredes (wall), aplicando la condición de no deslizamiento, que establece que la velocidad del fluido en contacto con la superficie sólida es nula.

Asimismo, las superficies que separan el dominio rotatorio del dominio estacionario no se definieron como paredes sólidas, sino como superficies internas (internal) del dominio fluido. Esta configuración permite establecer la interacción entre ambas regiones del fluido durante la simulación, evitando la introducción de una barrera física artificial entre el dominio rotatorio y el estacionario. De este modo, el flujo puede transferirse correctamente entre ambas regiones del dominio computacional, permitiendo representar de forma más realista el comportamiento del flujo alrededor de la hélice.

En la Figura 3-18 se muestra la definición de las diferentes condiciones de contorno empleadas durante la configuración del modelo CFD en el entorno de ANSYS.

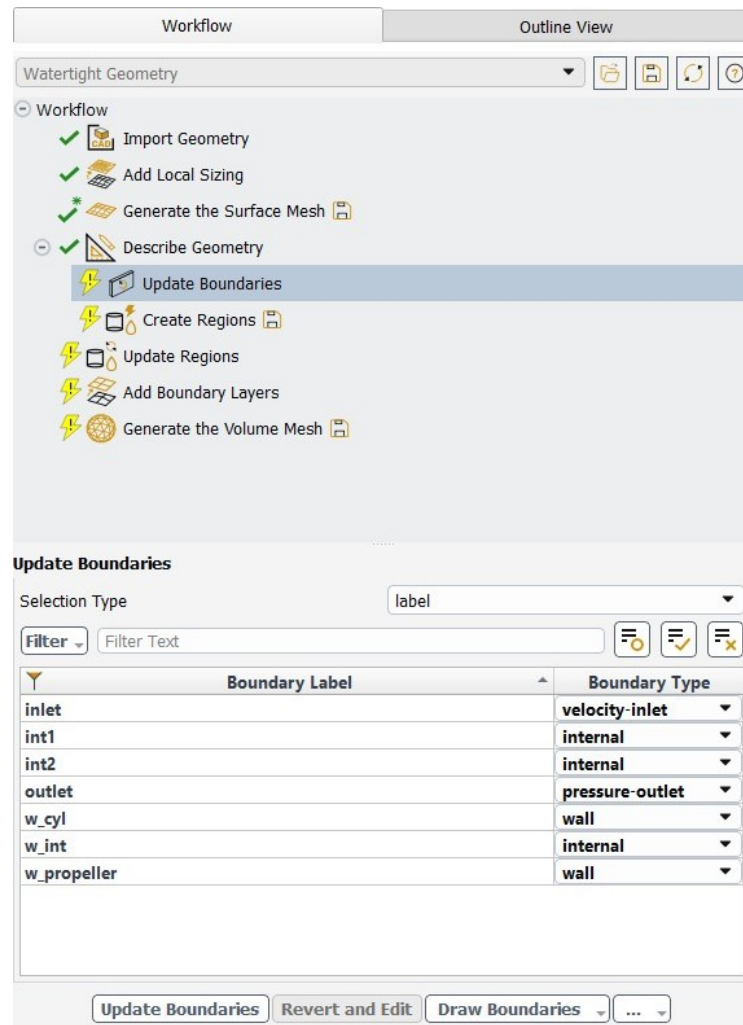


Figura 3-18 Definición de las condiciones de contorno del dominio computacional en el entorno de mallado de ANSYS

Una vez definida la configuración del modelo CFD, se procedió a aplicar esta metodología en el proceso de validación del modelo numérico.

3.6 Validación del modelo CFD

Con el objetivo de evaluar la fiabilidad del modelo de simulación CFD empleado en este trabajo, se ha realizado un proceso de validación utilizando como referencia una hélice previamente estudiada en un Trabajo de Fin de Grado anterior [20]. En dicho estudio se analizaron las características hidrodinámicas de una hélice abierta de paso variable mediante ensayos experimentales realizados por Postdam Model Basin, obteniéndose las correspondientes curvas de rendimiento [21].

A partir de la geometría utilizada en dicho trabajo, se llevó a cabo una simulación numérica empleando la misma metodología CFD descrita en el apartado anterior. El objetivo de este proceso es comprobar la capacidad del modelo numérico para reproducir el comportamiento hidrodinámico observado experimentalmente, lo que permitirá validar el procedimiento antes de aplicarlo al estudio del propulsor T200.

3.6.1 Importación y preparación de la geometría

La geometría de la hélice empleada en el proceso de validación se obtuvo a partir del modelo utilizado en el Trabajo Fin de Grado anteriormente mencionado. Dado que dicha geometría ya había sido definida y validada en el estudio previo, se procedió directamente a su importación en el entorno de simulación CFD.

Una vez importada la geometría en el software de preprocesado, se realizó una comprobación de integridad mediante la herramienta Check Geometry, como se puede apreciar en la Figura 3-19, con el fin de verificar la ausencia de errores geométricos que pudieran afectar al proceso de mallado o a la posterior simulación numérica.

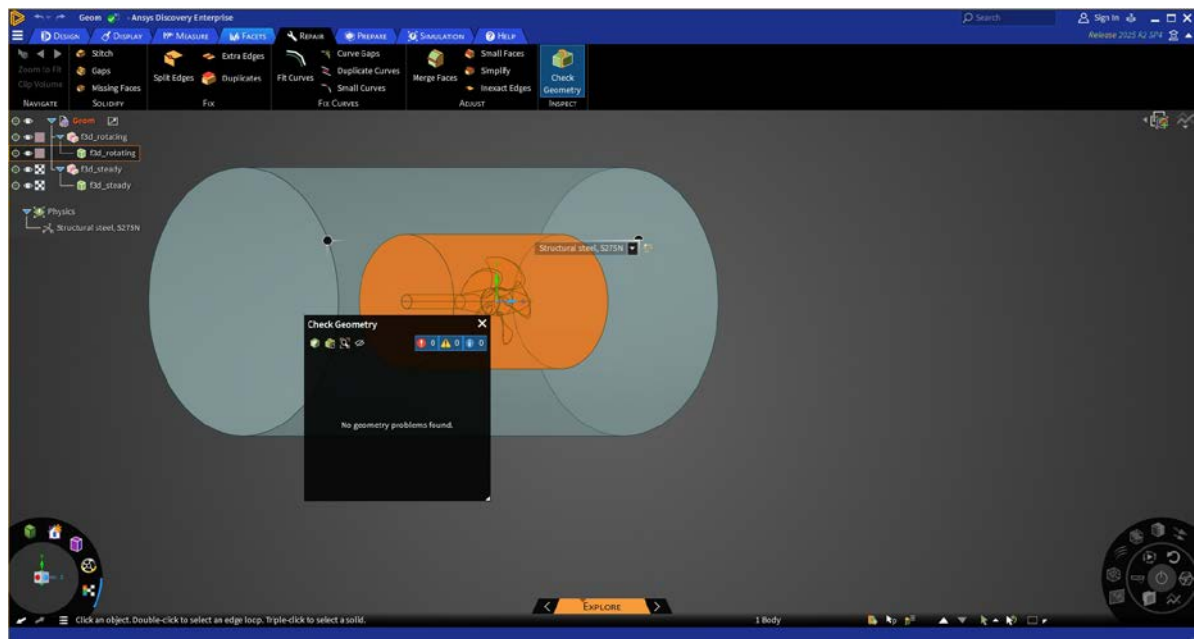


Figura 3-19 Geometría de la hélice importada en el entorno CFD y comprobación de integridad

3.6.2 Definición de superficies y jerarquía del modelo

Tras verificar la correcta importación de la geometría, se procedió a definir la jerarquía de las diferentes superficies del dominio computacional. Para ello, se asignaron nombres a las distintas zonas del modelo, permitiendo identificar las superficies correspondientes a las condiciones de contorno de la simulación.

En particular, se definieron las superficies de entrada y salida del flujo, así como las paredes correspondientes al dominio del flujo. Asimismo, el dominio se dividió en dos regiones principales: un cilindro interior rotatorio que contiene a la hélice y un cilindro exterior estacionario que representa el flujo circulante. Esta configuración permite modelar el efecto de rotación de la hélice mediante un sistema de referencia rotatorio, manteniendo el resto del dominio en reposo.

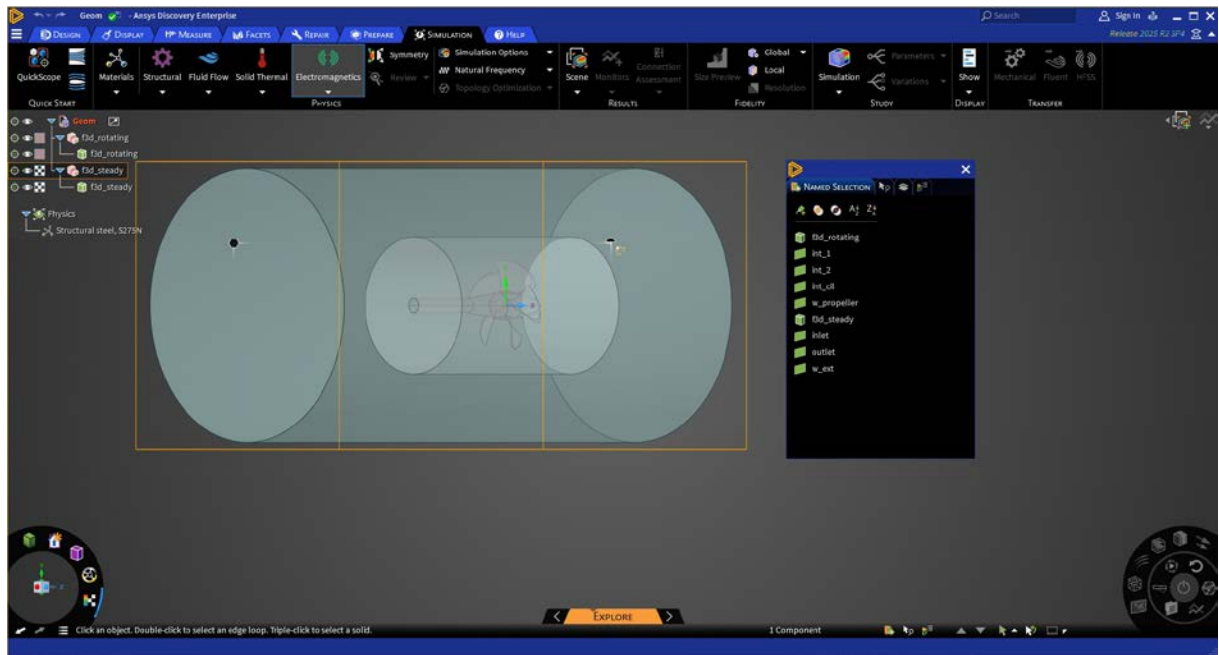


Figura 3-20 Definición de superficies

3.6.3 Generación de la malla

Una vez definidas las superficies del dominio computacional, se procedió a la generación de la malla. Para ello, se estableció un rango de tamaño de elementos que permite adaptar la discretización del dominio a las diferentes zonas del modelo.

De este modo, el tamaño de los elementos varía dentro de un intervalo definido en el proceso de mallado, permitiendo emplear elementos más pequeños en las regiones cercanas a la hélice, donde se producen mayores gradientes de velocidad y presión, y elementos de mayor tamaño en zonas más alejadas del propulsor. Esta estrategia permite capturar con mayor precisión los fenómenos hidrodinámicos en las zonas de mayor interés, manteniendo al mismo tiempo un número total de elementos adecuado para la realización de las simulaciones.

En la Figura 3-21 se muestra el rango de tamaño de elementos definido durante el proceso de generación de la malla.

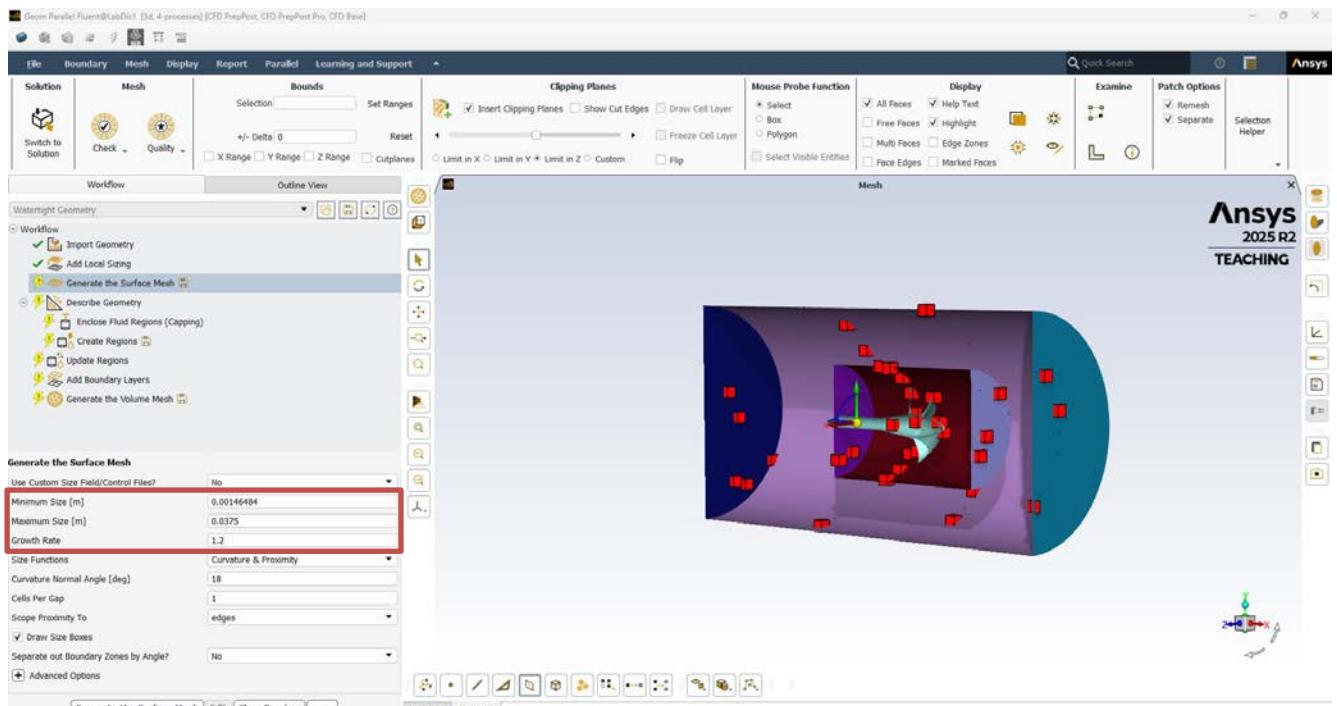


Figura 3-21 Detalle de la malla generada en el entorno CFD

Este rango de discretización permite controlar el nivel de refinamiento de la malla en las distintas regiones del dominio computacional.

Una vez definidos los parámetros de tamaño de elemento y el rango establecido para el mallado, se generó la malla final del dominio computacional. La Figura 3-22 muestra el resultado del proceso de generación de la malla, donde puede observarse la estructura del dominio fluido y la distribución de los elementos alrededor de la hélice.

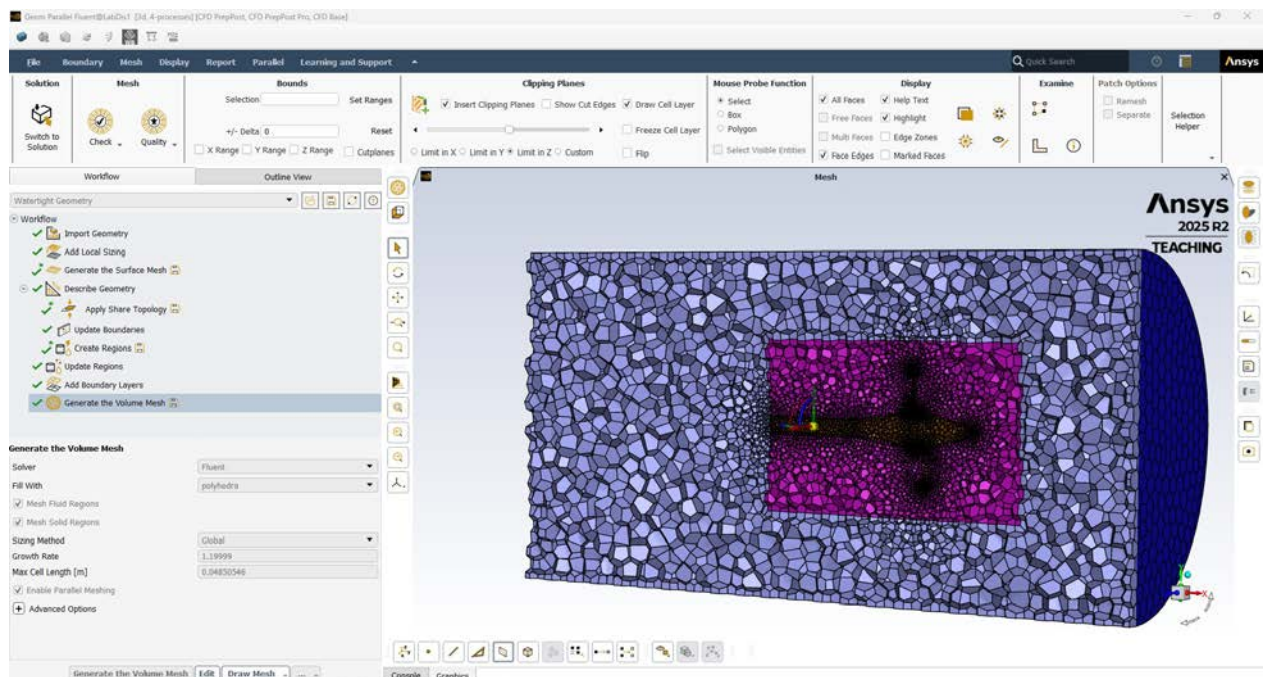


Figura 3-22 Malla final generada para el dominio computacional del modelo CFD

Como puede apreciarse, la zona próxima al propulsor presenta un mayor nivel de detalle en los elementos de la malla, con el objetivo de capturar de forma adecuada los gradientes de velocidad y presión generados por la rotación de la hélice.

3.6.4 Obtención y análisis de resultados

Una vez configurado el modelo numérico y generada la malla correspondiente, se ejecutaron las simulaciones CFD para diferentes condiciones de funcionamiento de la hélice. A partir de los resultados obtenidos se calcularon las magnitudes hidrodinámicas principales, como el empuje y el par generados por la hélice.

Los resultados obtenidos mediante simulación se exportaron posteriormente a una hoja de cálculo, donde se procesaron los datos para obtener las curvas de rendimiento del propulsor en función de la relación de avance. A partir de estos datos se calcularon los coeficientes hidrodinámicos adimensionales correspondientes, permitiendo representar las curvas características del propulsor en función de la relación de avance. Estos coeficientes permiten analizar el comportamiento hidrodinámico de la hélice de forma independiente de su tamaño y de las condiciones específicas de operación.

Los resultados obtenidos mediante simulación CFD se organizaron en forma de tabla y posteriormente se representaron gráficamente para facilitar su comparación con los datos experimentales disponibles de los ensayos realizados en SVA Potsdam.

Con el fin de establecer una referencia para la validación del modelo numérico, se presentan en primer lugar los datos experimentales obtenidos en los ensayos realizados en SVA Potsdam [21].

n [rps]	V [m/s]	T [N]	Q [Nm]
15	0	835	45,315
15	1	727,63	39,186
15	2	583,92	32,073
15	3	450,84	26,071
15	4	318,74	19,907
15	5	196,45	13,88
15	6	55,6	6,419

Tabla 3-1 Datos experimentales obtenidos en los ensayos realizados en SVA Potsdam [21]

A partir de los valores experimentales, se calcularon los coeficientes hidrodinámicos adimensionales correspondientes. Estos coeficientes, permiten representar las curvas de rendimiento del propulsor en función de la relación de avance.

J	C_T	$10C_Q$	η_0	C_{TH}	Re
0	0,95	2,06	0	-	0,764
0,26	0,83	1,78	0,19	29,68	0,769
0,53	0,66	1,46	0,38	5,95	0,786
0,8	0,51	1,18	0,54	2,04	0,815
1,07	0,36	0,90	0,68	0,81	0,848
1,33	0,22	0,63	0,74	0,32	0,895
1,6	0,063	0,29	0,55	0,06	0,946

Tabla 3-2 Coeficientes hidrodinámicos obtenidos a partir de los datos experimentales [20]

De forma análoga, los resultados obtenidos mediante simulación CFD se procesaron para calcular los coeficientes hidrodinámicos correspondientes.

n [rps]	V [m/s]	T [N]	Q [Nm]
15	1	646,17	37,02
15	2	552,07	32,11
15	3	440,79	26,82
15	4	315,06	20,72
15	5	186,45	14,17
15	6	119,34	10,59
15	7	42,00	6,35

Tabla 3-3 Datos experimentales obtenidos mediante CFD

A partir de los valores de empuje y par obtenidos mediante simulación CFD se calcularon los coeficientes hidrodinámicos adimensionales correspondientes, utilizando las expresiones presentadas previamente en el apartado 2.2.1.

J	C_T	$10C_Q$	η_0	C_{TH}	Re
0,26	0,74	1,68	0,19	-	0,77
0,53	0,63	1,46	0,36	5,63	0,79
0,8'	0,50	1,22	0,52	2,00	0,81
1,07	0,36	0,94	0,65	0,80	0,85
1,33	0,21	0,65	0,70	0,30	0,89
1,47	0,14	0,48	0,66	0,16	0,92
1,60	0,05	0,29	0,42	0,05	0,95

Tabla 3-4 Coeficientes hidrodinámicos obtenidos mediante simulación CFD

Con el objetivo de evaluar la precisión del modelo numérico, las curvas de rendimiento obtenidas mediante simulación CFD se compararon con las correspondientes curvas experimentales obtenidas en los ensayos realizados por SVA Potsdam.

Para ello se representaron los coeficientes hidrodinámicos en función de la relación de avance, permitiendo analizar las diferencias entre ambos conjuntos de resultados.

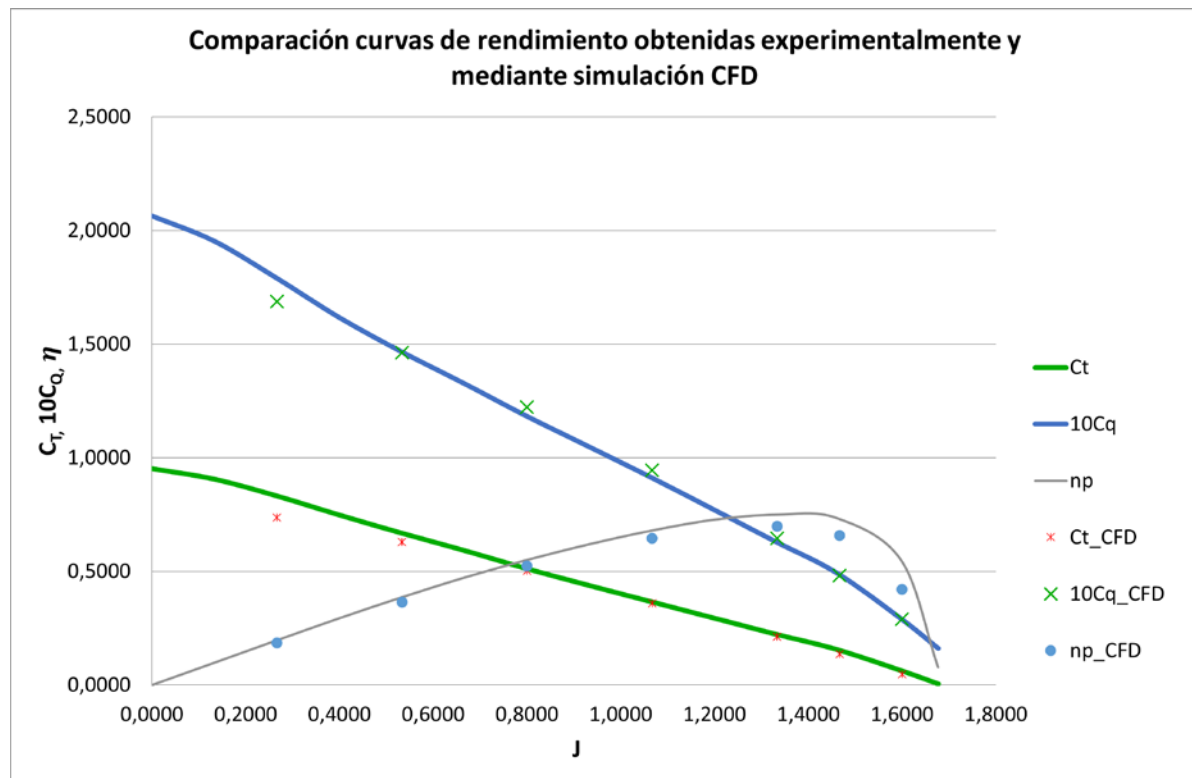


Figura 3-23 Comparación entre los coeficientes de empuje obtenidos experimentalmente y los resultados obtenidos mediante simulación CFD

Como puede apreciarse en la Figura 3-23, los resultados obtenidos mediante simulación CFD presentan una evolución similar a la observada en los datos experimentales. Las curvas muestran una tendencia comparable a lo largo del rango de relaciones de avance analizado, lo que indica que el modelo numérico reproduce adecuadamente el comportamiento hidrodinámico de la hélice.

Las pequeñas diferencias observadas pueden atribuirse a simplificaciones propias del modelo numérico y a las condiciones idealizadas de la simulación. No obstante, la concordancia general entre ambos conjuntos de resultados permite considerar el modelo CFD como una herramienta válida para el análisis hidrodinámico de este tipo de propulsores.

Por tanto, la buena concordancia entre los resultados experimentales y los obtenidos mediante simulación numérica valida la metodología CFD empleada en este trabajo, permitiendo su aplicación posterior al estudio del propulsor T200.

3.7 Simulación CFD de la hélice T200

3.7.1 Importación y preparación de la geometría

Una vez validada la metodología de simulación CFD mediante la comparación con resultados experimentales, se procedió a aplicar el modelo numérico al análisis del propulsor T200 desarrollado por Blue Robotics, objeto principal del presente trabajo.

Para ello se empleó la geometría de la hélice previamente reconstruida en el entorno CAD a partir del proceso de escaneo 3D descrito en los apartados anteriores. Esta geometría fue posteriormente importada al entorno de simulación CFD con el fin de analizar su comportamiento hidrodinámico en distintas condiciones de funcionamiento.

Una vez importado el dominio computacional en el entorno de simulación CFD dentro del módulo *Geometry* de ANSYS, se realizó una verificación de su integridad mediante la herramienta *Check Geometry*, con el objetivo de asegurar que no existían errores que pudieran afectar al proceso de mallado o a la simulación posterior.

A continuación, se llevó a cabo la identificación y nombrado de las distintas superficies del modelo, paso fundamental para la correcta definición de las condiciones de contorno y la organización del dominio durante la simulación. En esta etapa se asignaron nombres a las superficies principales del dominio, tales como la entrada del flujo (inlet), la salida (outlet) y la superficie lateral del cilindro, definida como symmetry.

Asimismo, se distinguieron las dos regiones principales del dominio fluido: el volumen rotatorio interior, denominado fluid rotating, que engloba la hélice, y el volumen exterior estacionario, denominado fluid fixed, correspondiente al cilindro exterior.

Con el fin de definir correctamente la interfaz entre ambas regiones, se identificaron las superficies de contacto del dominio rotatorio, asignándoles las denominaciones int1, int2 e int cil, que permitirán establecer la interacción entre las zonas rotatoria y estacionaria durante la simulación.

Por otro lado, se realizó una diferenciación de los distintos elementos del propulsor, asignando nombres específicos a cada uno de ellos: la hélice (propeller), el cono de entrada (nosecone), el núcleo central (core) y la tobera (nozzle). Esta clasificación permite una mejor identificación visual de los componentes durante el proceso de mallado y facilita el análisis posterior de los resultados.

Con el objetivo de mejorar la claridad y trazabilidad del modelo, se ha incluido en el Anexo IV, una tabla resumen con la nomenclatura completa empleada en la simulación donde se recogen las distintas superficies y regiones del dominio junto con su correspondiente denominación.

Con el fin de proporcionar una visión global del modelo, en la Figura 3-24 se muestra la geometría completa del dominio computacional con las distintas superficies previamente identificadas. La representación se ha realizado de forma parcialmente transparente para facilitar la visualización de los diferentes componentes del propulsor y de las regiones del dominio fluido.

En esta figura se pueden distinguir de manera general las principales superficies y regiones del modelo, cuya nomenclatura detallada se recoge en el anexo correspondiente.

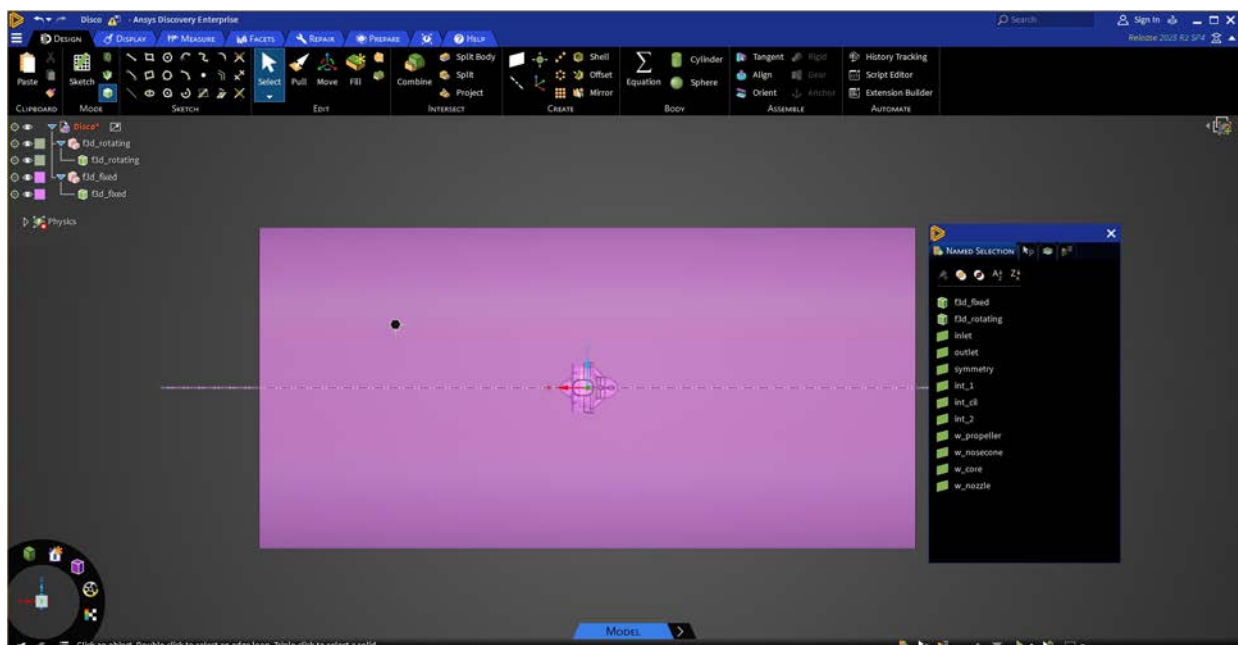


Figura 3-24 Vista general del dominio computacional con la identificación de las principales superficies y regiones del modelo

Esta representación permite comprobar la correcta organización del modelo y la coherencia en la asignación de las distintas superficies, constituyendo un paso fundamental previo a la generación de la malla y a la configuración de la simulación CFD.

Una vez verificada la correcta definición y organización de las superficies del dominio, el modelo queda preparado para continuar con el proceso de generación de la malla y la posterior configuración de la simulación CFD.

3.7.2 Generación de la malla

Una vez definida la geometría y correctamente identificadas las distintas superficies del dominio, se procedió a la conexión del módulo Geometry con el entorno de simulación, enlazando dicho bloque con ANSYS Fluent (Fluent Meshing) dentro del entorno *Workbench*.

A continuación, se inició el proceso de generación de la malla del dominio computacional en el entorno de mallado, el cual se compone de una serie de etapas secuenciales que permiten preparar el modelo para su posterior simulación.

Este proceso de mallado se estructura en diferentes pasos, que se describen de forma detallada a continuación, siguiendo el flujo de trabajo establecido en el preprocesador de ANSYS.

Una vez establecida la conexión entre los distintos módulos, se procedió a la transferencia de la geometría al entorno de mallado.

En la Figura 3-25 se muestra el entorno de trabajo en ANSYS Workbench, donde puede observarse la conexión entre el bloque de geometría y el módulo de mallado y simulación CFD.

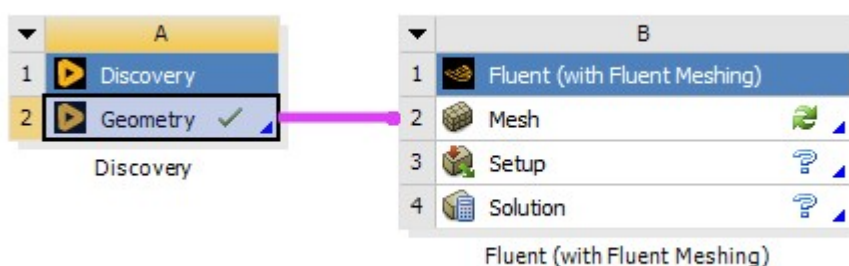


Figura 3-25 Conexión entre los módulos de geometría y simulación en ANSYS Workbench [13]

Esta conexión permite iniciar el proceso de generación de la malla del dominio computacional en el entorno de Fluent Meshing.

1. Importación de la geometría (Import Geometry)

En primer lugar, se procedió a la importación de la geometría en el entorno de mallado de ANSYS Fluent. Para ello, el modelo fue previamente guardado en formato Discovery, propio del entorno ANSYS, tras haber definido y asignado correctamente la nomenclatura de las distintas superficies en el módulo de geometría.

Este paso permite transferir al entorno de mallado toda la información geométrica necesaria, incluyendo la identificación de las superficies que posteriormente serán utilizadas para la definición de las condiciones de contorno.

En la Figura 3-26 se muestra la geometría importada en el entorno de mallado de ANSYS Fluent. Con el objetivo de facilitar la visualización del interior del modelo, se ha representado una sección del dominio mediante un corte según el eje Z, lo que permite observar con mayor claridad la disposición interna del propulsor y del dominio fluido.

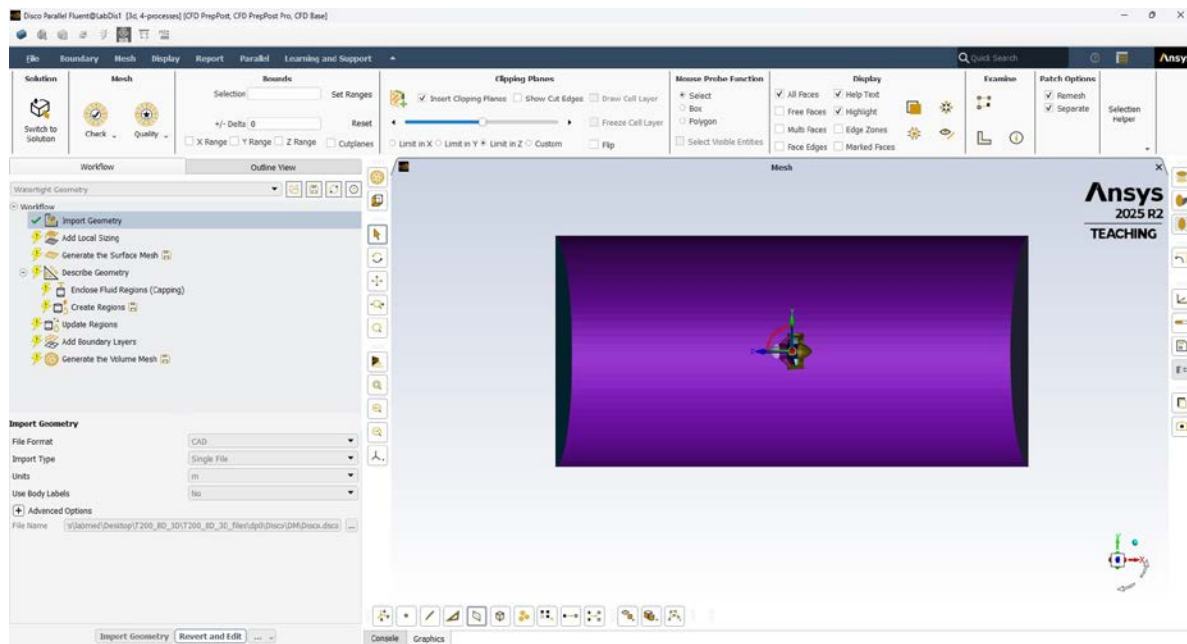


Figura 3-26 Geometría importada en ANSYS Fluent con corte según el eje Z para visualización del interior del dominio

Esta representación permite verificar tanto la correcta importación de la geometría como la disposición relativa de los distintos elementos del propulsor dentro del dominio computacional.

2. Definición de refinamiento local de malla (Add Local Sizing)

En esta etapa, el entorno de mallado permite definir refinamientos locales mediante la herramienta Add Local Sizing, que posibilita establecer un tamaño de elemento más reducido en zonas específicas del dominio. Este refinamiento se puede aplicar, por ejemplo, mediante la creación de una región de influencia (Body of Influence), en la cual se definen parámetros que permiten aumentar la resolución de la malla en áreas de especial interés, cómo las proximidades de la hélice.

No obstante, en el presente trabajo no se ha empleado este tipo de refinamiento local, ya que su utilización implica un incremento significativo del número de elementos y, por tanto, del coste computacional asociado a la generación de la malla y a la ejecución de las simulaciones.

En su lugar, se ha optado por utilizar una malla general basada en la definición de un rango adecuado de tamaños de elemento, lo que permite obtener una discretización suficientemente precisa del dominio manteniendo un tiempo de cálculo razonable.

Cabe destacar que, en caso de requerir un mayor nivel de detalle en zonas específicas del flujo, la aplicación de refinamientos locales constituye una herramienta válida para mejorar la resolución de la malla.

En la Figura 3-27 se muestra la configuración correspondiente a la etapa de Add Local Sizing, donde se ha seleccionado la opción de no aplicar refinamientos locales en el dominio.

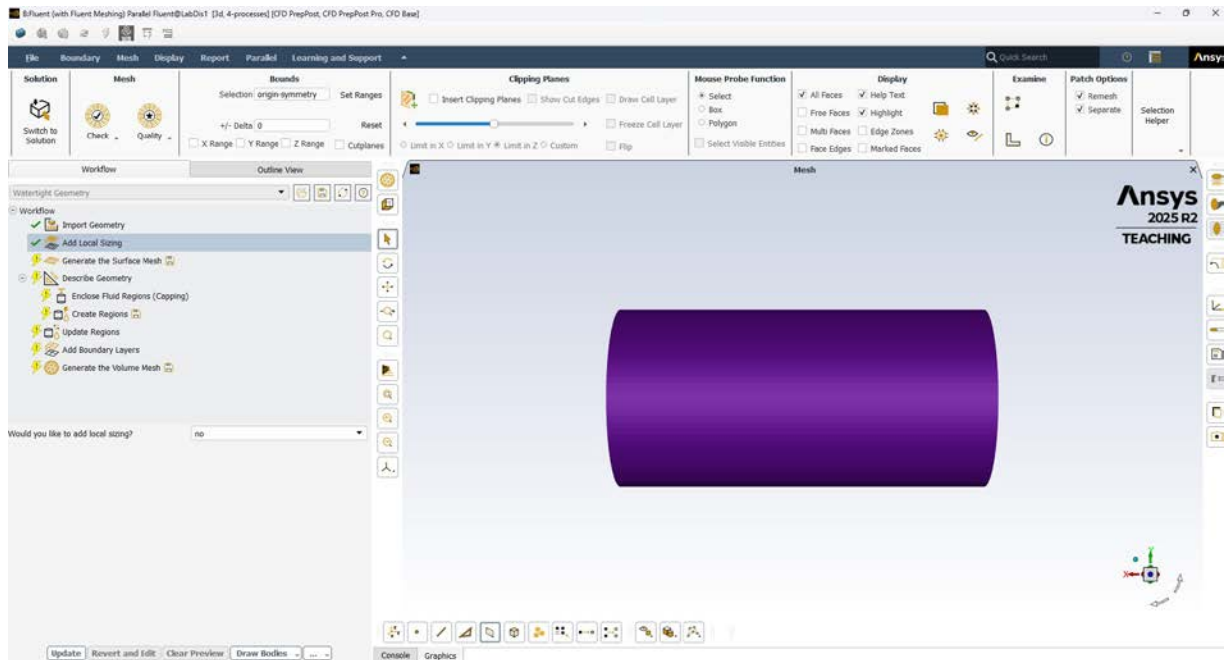


Figura 3-27 Configuración de la opción Add Local Sizing sin aplicación de refinamientos locales en el dominio

Como puede observarse, no se ha definido ninguna región de refinamiento local, optando por una discretización global del dominio. Esta decisión permite reducir el coste computacional asociado al mallado y a la simulación, manteniendo al mismo tiempo una precisión adecuada para los objetivos del presente estudio.

3. Generación de la malla superficial (Generate the Surface Mesh)

Una vez establecidas las opciones iniciales de mallado, se procedió a la generación de la malla superficial del dominio. En esta etapa se definen los parámetros que controlan el tamaño de los elementos de la malla, determinando así la resolución con la que se discretizará la geometría.

Para ello, se estableció un rango de tamaño de elemento comprendido entre un valor mínimo de 0,0008 metros y un valor máximo de 0,02 metros. Este rango permite adaptar la resolución de la malla a las distintas regiones del dominio, proporcionando un mayor nivel de detalle en las zonas de interés hidrodinámico, como las proximidades de la hélice, y una discretización más gruesa en las zonas alejadas de la misma.

Esta configuración permite alcanzar un equilibrio adecuado entre la precisión de la simulación y el coste computacional asociado.

En la Figura 3-28 se muestra la configuración de los parámetros utilizados para la generación de la malla superficial.

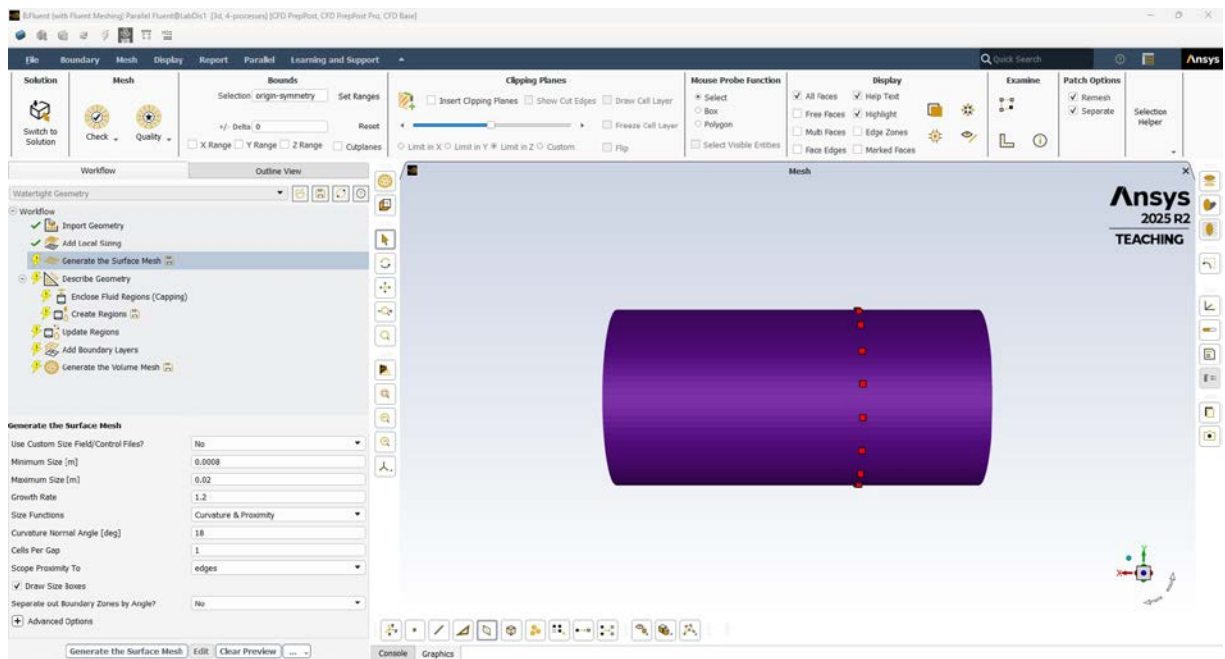


Figura 3-28 Configuración del rango de tamaños de elemento para la generación de la malla superficial en ANSYS

Como puede observarse, la definición del tamaño mínimo y máximo de elemento permite controlar la resolución de la malla en función de las unidades del análisis

4. Descripción de la geometría (Describe Geometry)

Una vez generada la malla superficial, se procedió a la descripción de la geometría del modelo mediante la herramienta Describe Geometry. En esta etapa se define la naturaleza de los distintos volúmenes que componen el dominio computacional, estableciendo el tipo de comportamiento físico asociado a cada uno de ellos.

En el presente caso, la geometría se definió como un modelo compuesto por regiones de fluido, sólidos y vacíos, tal y como se aprecia en la Figura 3-29. Permitiendo distinguir entre los distintos elementos que intervienen en la simulación.

En particular, el volumen correspondiente al dominio que rodea la hélice se identifica como fluido, siendo la región en la que se resolverán las ecuaciones del flujo. Por otro lado, los componentes del propulsor, como la hélice y el resto de los elementos estructurales, se consideran sólidos, mientras que las regiones vacías se utilizan para definir adecuadamente el dominio y las interfaces necesarias para la simulación.

Esta clasificación resulta fundamental para la correcta definición del modelo, ya que permite al preprocesador identificar las distintas zonas del dominio y preparar la geometría para las etapas posteriores de definición de regiones y generación de la malla volumétrica.

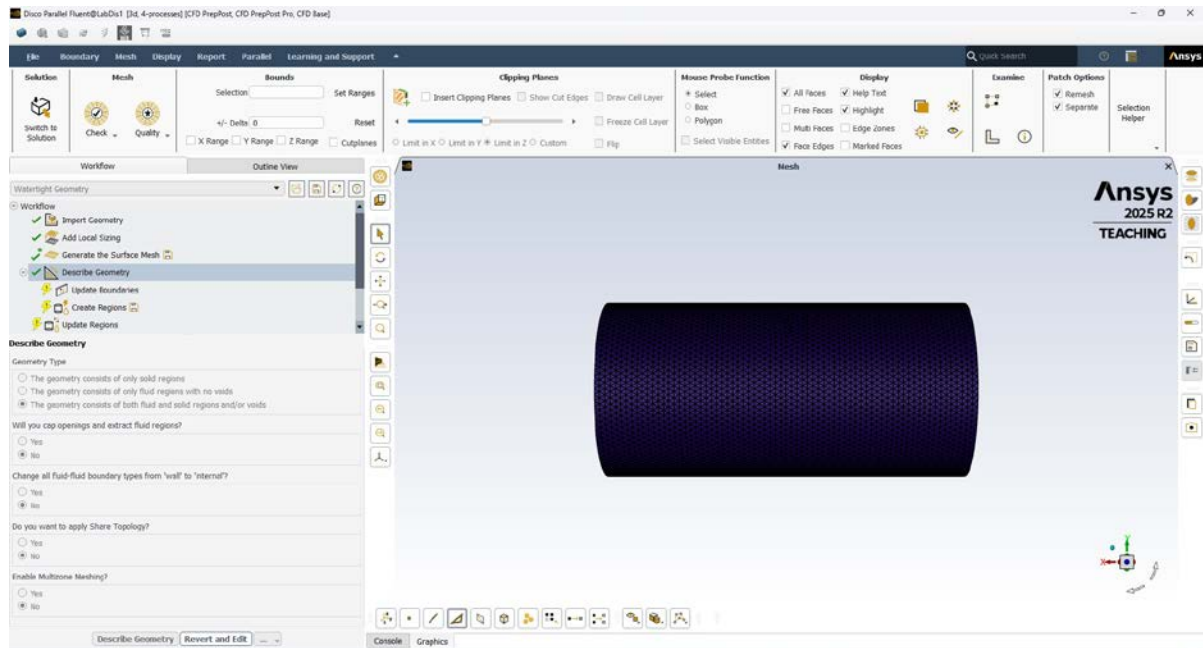


Figura 3-29 Describe Geometry

Como puede observarse, se definen las distintas regiones del modelo en función de su naturaleza física, lo que permite una correcta preparación del dominio para el proceso de mallado.

5. Actualización de límites (Update Boundaries)

Una vez descrita la geometría y definidas las distintas regiones del dominio, se procedió a la asignación de las condiciones de contorno mediante la herramienta Update Boundaries. En esta etapa se establece el comportamiento físico del flujo en cada una de las superficies del modelo.

En primer lugar, la superficie de entrada del dominio se definió como entrada de velocidad (velocity inlet), donde se impone la velocidad del flujo incidente. Por su parte, la superficie de salida se estableció como salida de presión (pressure outlet), permitiendo la evacuación del flujo del dominio computacional.

Las superficies de interfaz entre la región rotatoria y la región estacionaria del dominio, denominadas int1, int2 e int cil, se definieron como superficies internas (internal), lo que permite la correcta interacción del flujo entre ambas regiones sin introducir discontinuidades físicas.

Asimismo, la superficie lateral del dominio exterior se definió como condición de simetría (symmetry), reduciendo así los efectos de frontera y representando adecuadamente el comportamiento del flujo en el entorno del propulsor.

Finalmente, las superficies correspondientes a los elementos sólidos del propulsor, tales como la hélice (propeller), el núcleo (core), el cono de entrada (nosecone) y la tobera (nozzle), se definieron como paredes (wall), aplicando la condición de no deslizamiento entre fluido y las superficies sólidas.

En la Figura 3-30 se muestra la asignación de las distintas condiciones de contorno en el entorno de mallado de ANSYS.

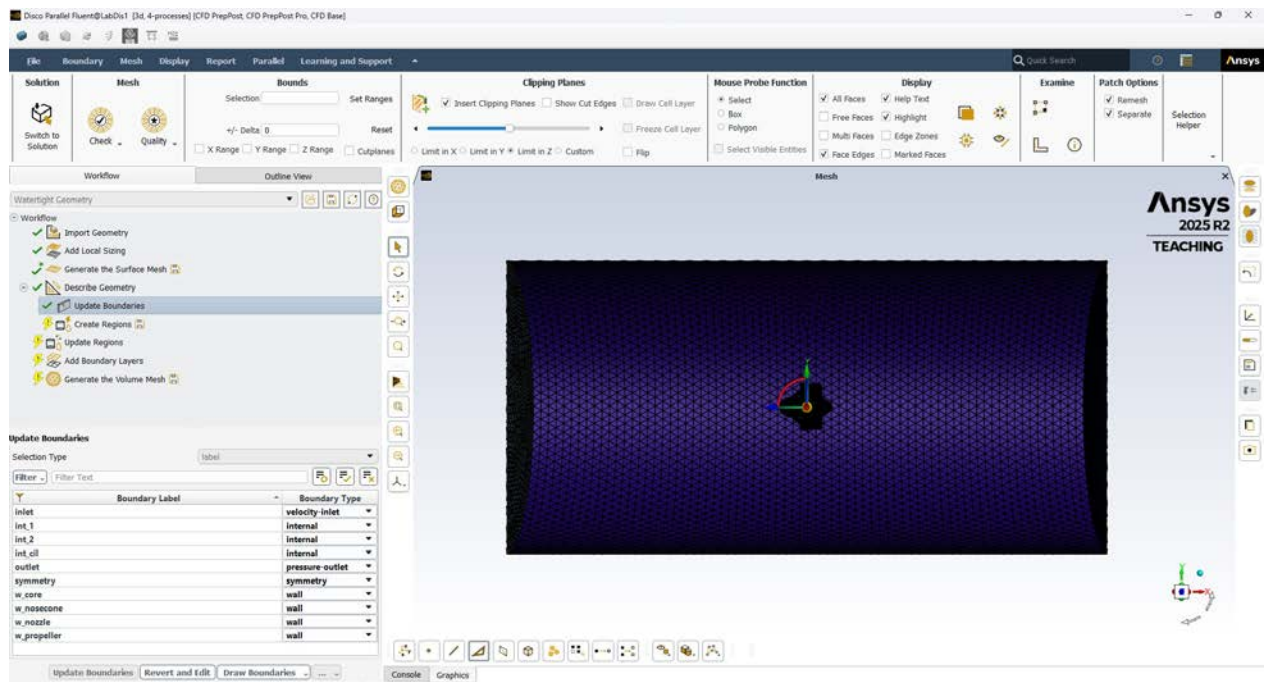


Figura 3-30 Update Boundaries

Como puede observarse, cada una de las superficies del dominio queda asociada a una condición de contorno específica, lo que permite definir correctamente el comportamiento del flujo en la simulación.

6. Creación de regiones (Create Regions)

Una vez definidas las condiciones de contorno, se procedió a la creación de las distintas regiones del dominio mediante la herramienta Create Regions. En esta etapa se establecen los volúmenes que componen el dominio fluido sobre los que se resolverán las ecuaciones del flujo.

En el presente modelo se definieron dos regiones de fluido diferenciadas: una región interior asociada al volumen que contiene la hélice, que será tratada como dominio rotatorio, y una región exterior correspondiente al fluido circundante, considerada como dominio estacionario.

Esta división del dominio permite representar de forma adecuada el efecto de la rotación de la hélice sobre el flujo, aplicando posteriormente un sistema de referencia rotatorio en la región interior, mientras que el dominio exterior permanece en reposo relativo.

En la Figura 3-31 se muestra la definición de las regiones del dominio fluido en el entorno de mallado de ANSYS.

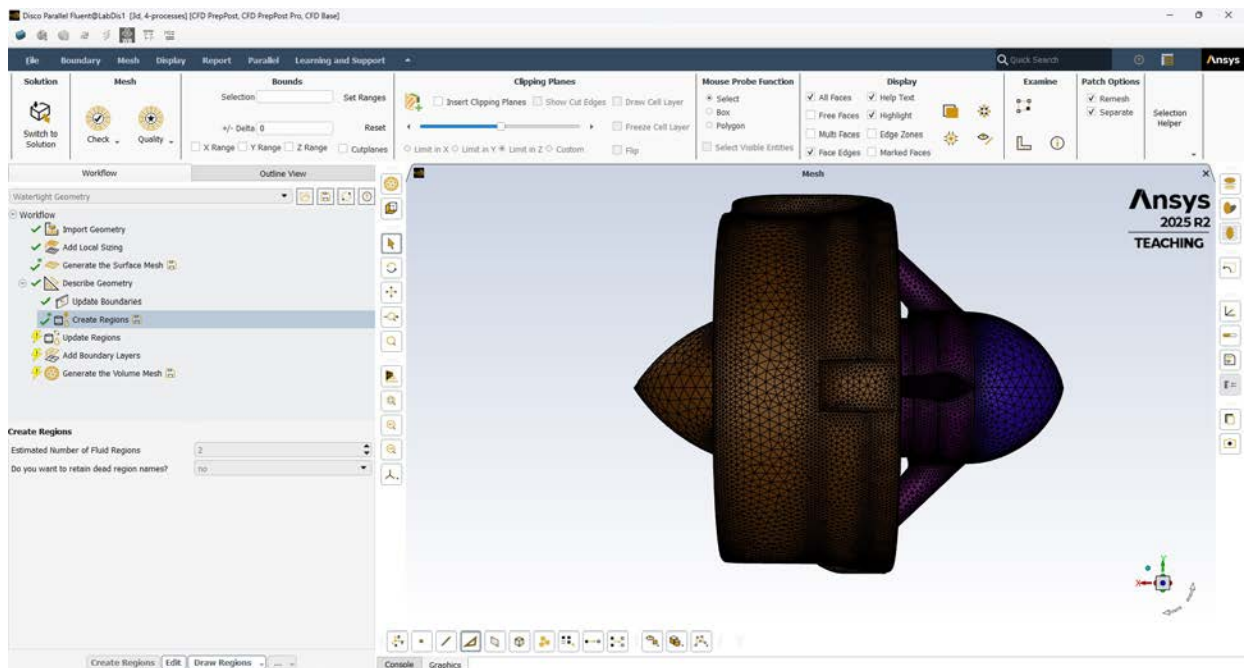


Figura 3-31 Create Regions

Como puede observarse, el dominio queda dividido en una región rotatoria interior y una región estacionaria exterior, lo que permite modelar correctamente el comportamiento del flujo inducido por la hélice.

7. Actualización de regiones (Update Regions)

Una vez creadas las regiones del dominio, se procedió a su configuración mediante la herramienta Update Regions, en la cual se asigna la naturaleza física de cada una de ellas dentro del modelo de simulación.

En este caso, las regiones correspondientes al volumen interior y exterior del dominio, denominadas fluid rotating y fluid fixed, se definieron como regiones de fluido, siendo en estas donde se resolverán las ecuaciones del flujo.

Asimismo, se generó una región adicional denominada dead0, asociada a los distintos componentes sólidos del propulsor, como la hélice, el núcleo, el cono de entrada y la tobera. Esta región se definió como región tipo “dead”, indicando que no forma parte del dominio fluido y, por tanto, no interviene directamente en la resolución del flujo.

Esta configuración permite delimitar el dominio sobre el que se resolverán las ecuaciones del flujo, excluyendo las regiones correspondientes a los elementos sólidos.

En la Figura 3-32 se muestra la configuración de las regiones del modelo tras la aplicación de la herramienta *Update Regions*.

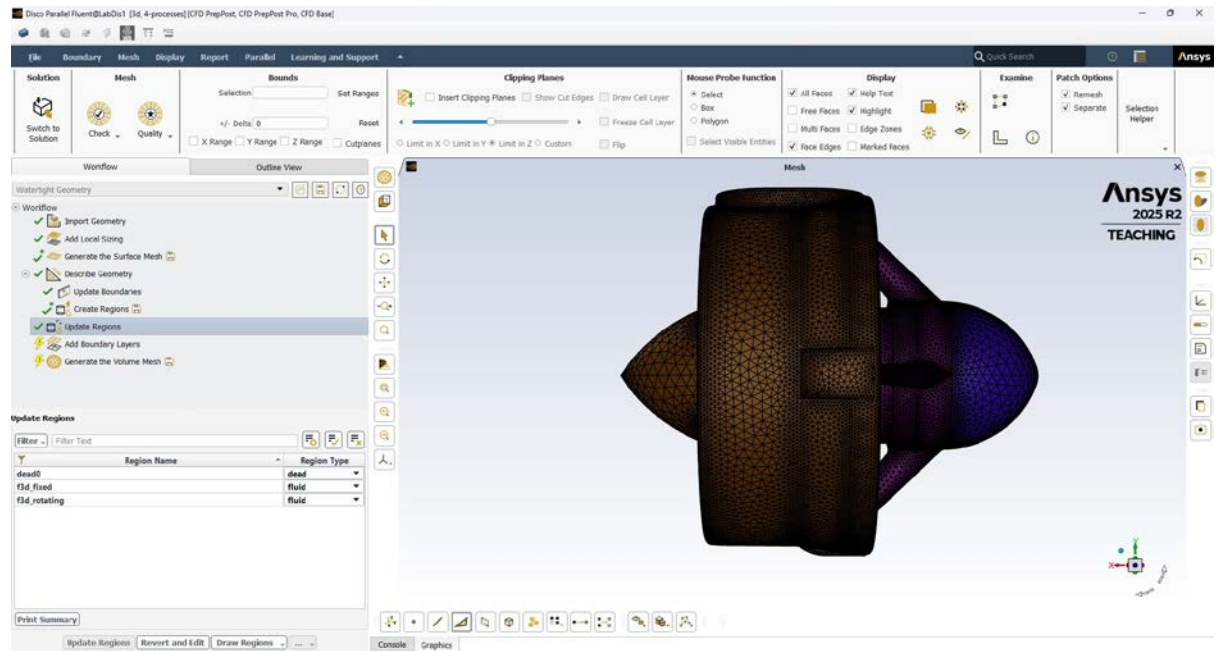


Figura 3-32 Update Regions

Como puede observarse, las regiones de fluido quedan claramente diferenciadas.

8. Definición de capas límite (Add Boundary Layers)

En esta etapa, el entorno de mallado permite la incorporación de capas límite en las superficies sólidas con el fin de mejorar la resolución del flujo en zonas próximas a las paredes.

En el presente trabajo no se han aplicado capas límite, optando por una discretización global del dominio que permite obtener resultados adecuados con un coste computacional reducido.

En la Figura 3-33 se muestra la configuración correspondiente a esta etapa, donde no se han definido capas límite.

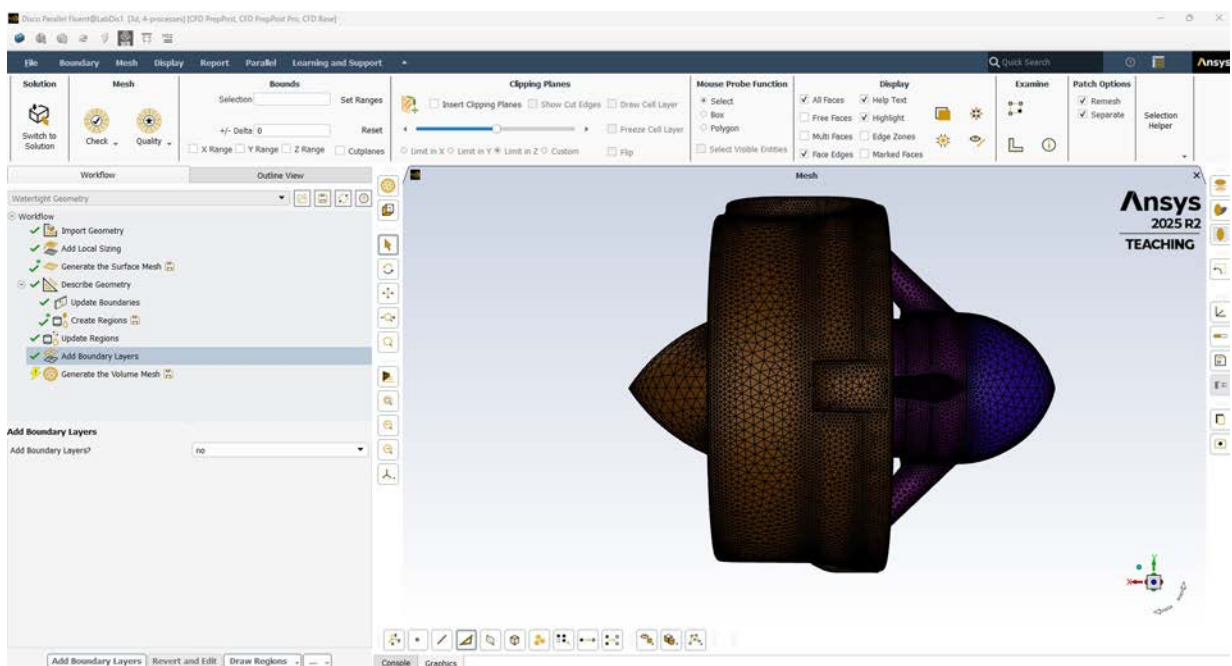


Figura 3-33 Add Boundary Layers

De este modo, el modelo queda preparado para la generación de la malla volumétrica.

9. Generación de la malla volumétrica (Generate Volume Mesh)

Finalmente, se procedió a la generación de la malla volumétrica del dominio computacional mediante la herramienta Generate Volume Mesh. Para ello, se empleó una discretización basada en elementos poliedrales (polyhedra), que permite una mayor adaptación a geometrías complejas y una mayor eficiencia numérica en la simulación.

Este tipo de malla ofrece un buen equilibrio entre precisión y coste computacional, reduciendo el número de elementos necesarios en comparación con otros tipos de discretizaciones, sin comprometer la calidad de los resultados.

En la Figura 3-34 se muestra la malla volumétrica generada para el dominio de simulación.

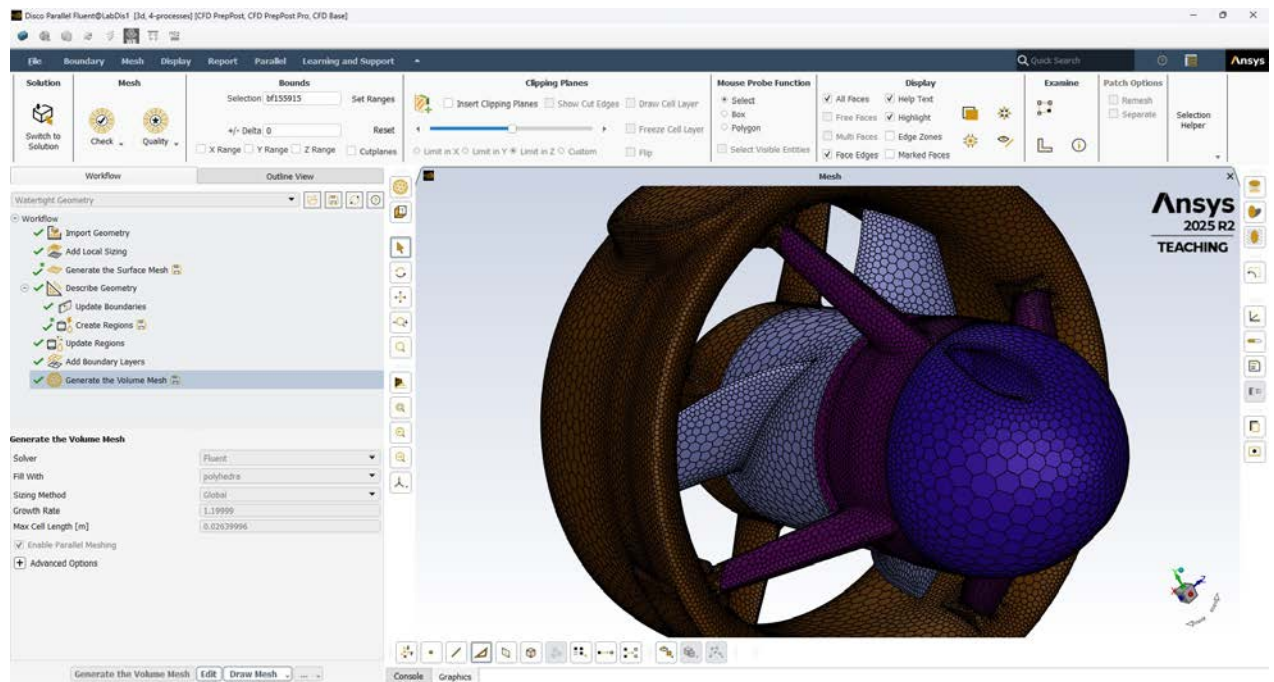


Figura 3-34 Generate Volume Mesh

Como puede observarse en la figura, la malla representa una mayor resolución en las zonas de mayor complejidad geométrica, como las regiones externas de los álabes de la hélice, donde se concentran mayores gradientes del flujo. Por el contrario, en las zonas más alejadas o de menor interés hidrodinámico, la malla es más gruesa, optimizando así el número total de elementos.

Con ello, se completa el proceso de generación de la malla, quedando el modelo preparado para la ejecución de la simulación CFD.

3.7.3 Simulación CFD del propulsor T200

Una vez generada la malla volumétrica del dominio computacional, se procedió a la configuración y ejecución de la simulación CFD en el entorno de ANSYS Fluent, con el objetivo de determinar las magnitudes hidrodinámicas generadas por el propulsor T200.

Antes de iniciar la simulación se definieron las propiedades del fluido de trabajo, seleccionando agua líquida (wáter-liquid) como fluido del modelo. De este modo, se establecen las propiedades físicas necesarias para la resolución del problema, tales como la densidad y la viscosidad del fluido.

Asimismo, se definió el sentido del flujo dentro del dominio computacional, estableciendo una velocidad de entrada del fluido en la superficie de entrada (velocity inlet) y una condición de presión atmosférica en la salida (pressure outlet).

El sentido del flujo resulta un aspecto clave en la simulación, ya que determina la dirección del empuje generado por la hélice. En función del modo de funcionamiento del propulsor (directo o inverso), la interacción entre la hélice y el fluido da lugar a una fuerza de empuje en sentido opuesto al movimiento del flujo incidente.

Con el fin de facilitar la comprensión del comportamiento del flujo y de la generación del empuje, se presenta a continuación una explicación teórica del funcionamiento del propulsor en el dominio de simulación. Posteriormente, se mostrarán las imágenes correspondientes a la simulación numérica, dónde se podrá observar este comportamiento de forma visual.

Modo directo

En la Figura 3-35 se muestra un esquema teórico del sistema de referencia adoptado, junto con el sentido del flujo y la dirección del empuje generado por el propulsor en modo directo.



Figura 3-35 Esquema del modo directo. Elaboración propia.

Para el análisis se considera el sistema de referencia definido en el modelo, donde el eje X se orienta en sentido positivo hacia la izquierda, mientras que los ejes Y y Z definen el plano transversal del dominio.

En primer lugar, se analiza el funcionamiento en modo directo. La hélice del propulsor T200 se considera levógira, siendo designada por el fabricante Blue Robotics como rotación tipo CW (clockwise).

En este caso, el flujo incidente se introduce en el dominio a través de la condición de velocity inlet, entrando por la parte correspondiente al cono de entrada (nosecone), es decir, la zona de mayor sección de la tobera. De acuerdo con el sistema de referencia adoptado, el fluido se desplaza en dirección positiva del eje X.

Como consecuencia de la interacción entre la hélice y el fluido, se genera una fuerza de empuje en sentido opuesto al flujo incidente. Por tanto, el empuje actúa en dirección negativa del eje X, lo que corresponde a un desplazamiento del propulsor hacia la izquierda en el sistema de referencia definido.

Una vez descrito el comportamiento teórico, en la Figura 3-36 se muestra la representación del flujo obtenida mediante la simulación CFD para modo directo.

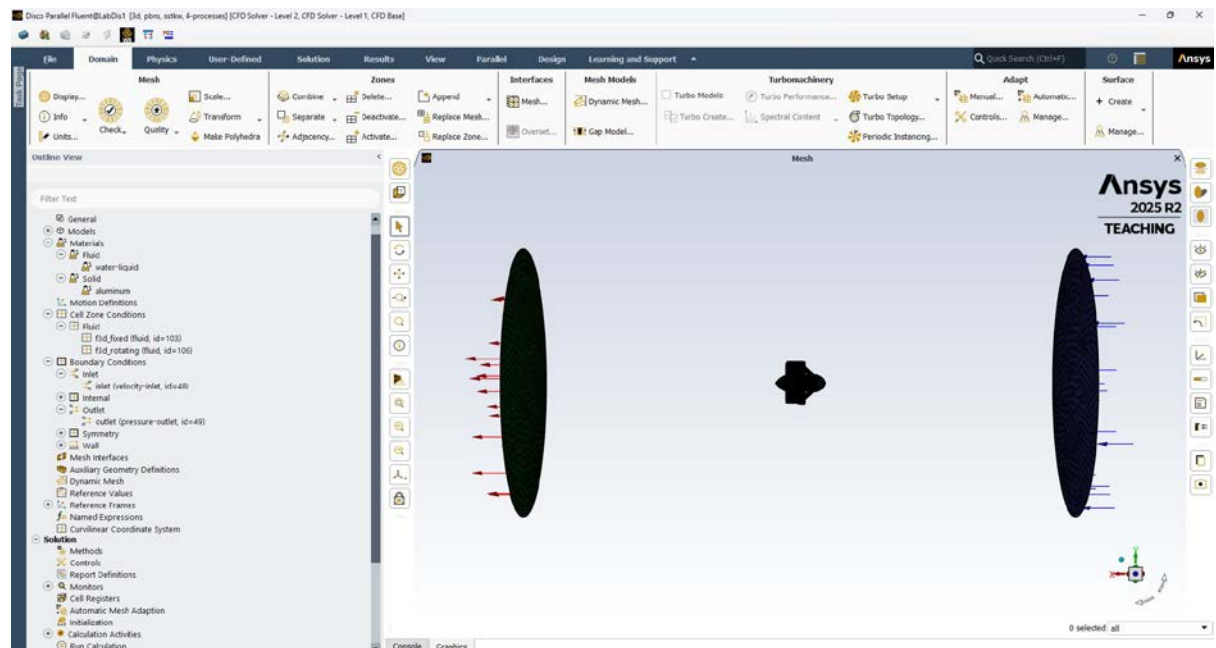


Figura 3-36 Campo de velocidades del flujo en modo directo obtenido mediante simulación CFD

Como puede observarse, el flujo se desplaza en dirección positiva del eje X, en concordancia con lo descrito en el análisis teórico. Aunque en la simulación se representa el campo de velocidades del fluido, la dirección del empuje puede deducirse a partir del sentido del flujo, siendo esta opuesta al mismo.

Modo inverso

A continuación, se analiza el funcionamiento del propulsor en modo inverso, manteniendo el mismo sistema de referencia definido previamente.

En este caso, el flujo incidente se introduce en el dominio en sentido contrario al modo directo, es decir, en dirección negativa del eje X. La condición de velocity inlet se aplica por la zona de menor sección de la tobera, correspondiente a la parte posterior del propulsor.

Para representar este modo de funcionamiento, el régimen de giro de la hélice se considera con signo negativo, lo que implica una inversión del sentido efectivo de operación del propulsor, aunque la hélice mantenga su configuración geométrica levógira, denominada por el fabricante como rotación tipo CW (clockwise).

Como consecuencia de la interacción entre la hélice y el flujo incidente, el empuje generado actúa en sentido opuesto al del flujo. Por tanto, en este caso el empuje se produce en dirección positiva del eje X, lo que corresponde a un desplazamiento del propulsor en sentido contrario al modo directo.

En la Figura 3-37 se muestra un esquema teórico del sentido del flujo y de la dirección del empuje en modo inverso.



Figura 3-37 Esquema del modo inverso. Elaboración propia.

De acuerdo con este esquema, en la Figura 3-38 se representa el campo de velocidades obtenido mediante la simulación CFD para el modo inverso.

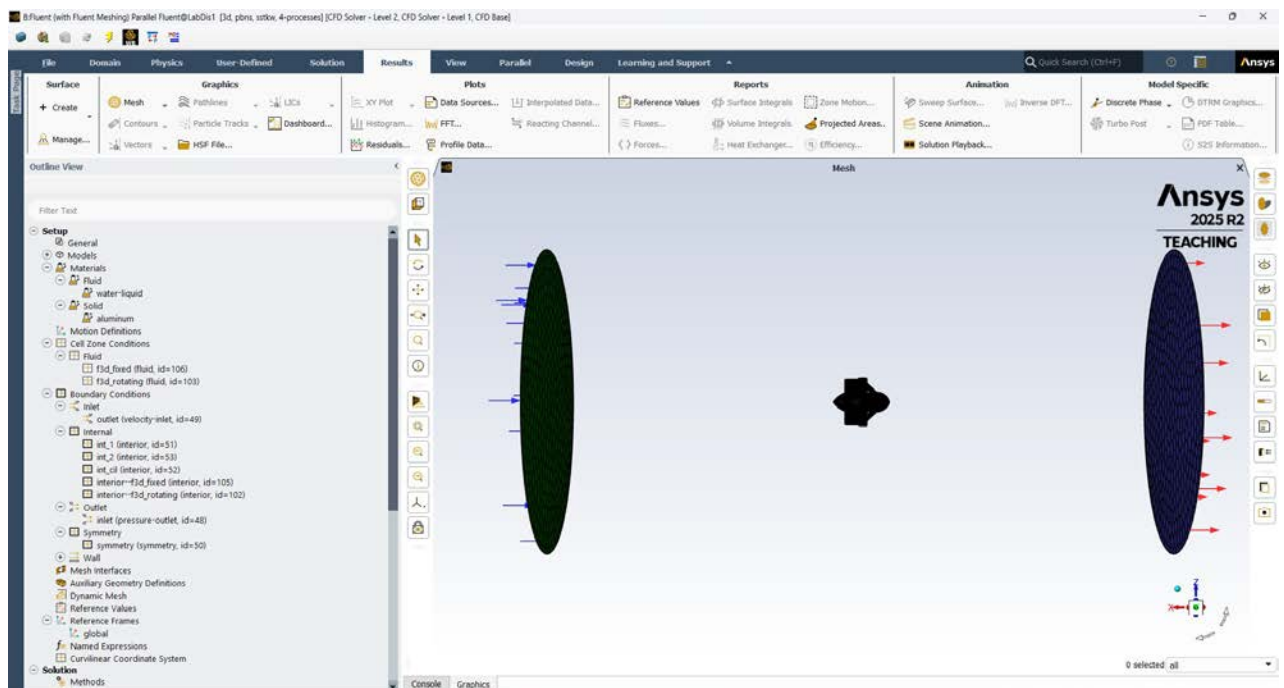


Figura 3-38 Campo de velocidades del flujo en modo inverso obtenido mediante simulación CFD

Como puede observarse, el flujo se desplaza en dirección negativa del eje X, mientras que el empuje generado por la hélice actúa en sentido opuesto, concordancia con el planteamiento teórico.

Una vez descrito el comportamiento del flujo y la generación del empuje desde un punto de vista teórico, se procede a definir los parámetros de simulación empleados en el modelo CFD.

En esta fase, se realizaron simulaciones tanto en modo directo como en modo inverso, considerando distintos valores del régimen de giro de la hélice, comprendidos entre 100 y 4000 RPM.

Para estas simulaciones iniciales, la velocidad de entrada del flujo se fijó en $0,1 \text{ m/s}$. No obstante, este valor se introduce únicamente para garantizar la estabilidad numérica del modelo, pudiendo considerarse que, desde un punto de vista físico, el propulsor opera en condiciones próximas a fluido en reposo.

Este planteamiento permite reproducir condiciones equivalentes a las proporcionadas por el fabricante Blue Robotics, donde el empuje se expresa en función del régimen de giro sin considerar velocidad de avance significativa. De este modo, los resultados obtenidos en la simulación CFD pueden compararse directamente con los datos experimentales disponibles.

Una vez realizada esta primera fase de simulaciones y comprobada la coherencia de los resultados, se llevó a cabo un segundo conjunto de simulaciones orientado a la obtención de las curvas de rendimiento del propulsor. Para ello, se fijó un régimen de giro constante y se varió la velocidad de entrada del flujo, permitiendo calcular las magnitudes de empuje y par en diferentes condiciones de operación.

De este modo, queda completamente definido el modelo numérico empleado, incluyendo la geometría, el dominio computacional, la discretización mediante malla y las condiciones de contorno aplicadas. Asimismo, se ha establecido los parámetros de simulación necesarios para el análisis del comportamiento del propulsor en diferentes condiciones de funcionamiento.

La metodología descrita permite obtener las magnitudes hidrodinámicas principales, como el empuje y el par, a partir de las cuales es posible evaluar el rendimiento del propulsor. En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante la simulación CFD, así como su comparación con los datos proporcionados por el fabricante.

4 RESULTADOS

4.1 Descripción del apartado

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones CFD realizadas sobre el propulsor T200. En primer lugar, se analiza el empuje generado para diferentes regímenes de giro en condiciones de fluido prácticamente en reposo, comparando los resultados obtenidos mediante simulación con los datos proporcionados por el fabricante Blue Robotics.

Posteriormente, se presentan los resultados correspondientes al cálculo del par y de los coeficientes hidrodinámicos adimensionales, a partir de los cuales se obtienen las curvas de rendimiento del propulsor.

4.2 Comparación del empuje CFD-Fabricante

Con el objetivo de validar el modelo numérico desarrollado, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos mediante simulación CFD y los datos proporcionados a distintos valores de tensión. Entre los parámetros disponibles se incluyen el régimen de giro (rpm), la corriente, la potencia, y el empuje generado.

Para el presente análisis, se seleccionó la variable de empuje, transformando los valores proporcionados por el fabricante de *kgf* a *Newtons (N)*, mediante la conversión $1\text{kgf} \approx 9,81\text{N}$, con el fin de trabajar en unidades del Sistema Internacional.

A partir de estos datos, se representó el empuje en función del régimen de giro, obteniendo dos curvas diferenciadas correspondientes al modo directo (Forward direction) y al modo inverso (Reverse direction).

Posteriormente, estos resultados se compararon con los valores de empuje obtenidos mediante simulación CFD para los regímenes de giro analizados (100, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 y 4000 rpm), permitiendo evaluar la capacidad del modelo para reproducir el comportamiento real del propulsor.

En la Figura 4-1 se muestra la comparación entre los valores de empuje obtenidos mediante simulación CFD y los proporcionados por el fabricante, tanto en modo directo como en modo inverso.

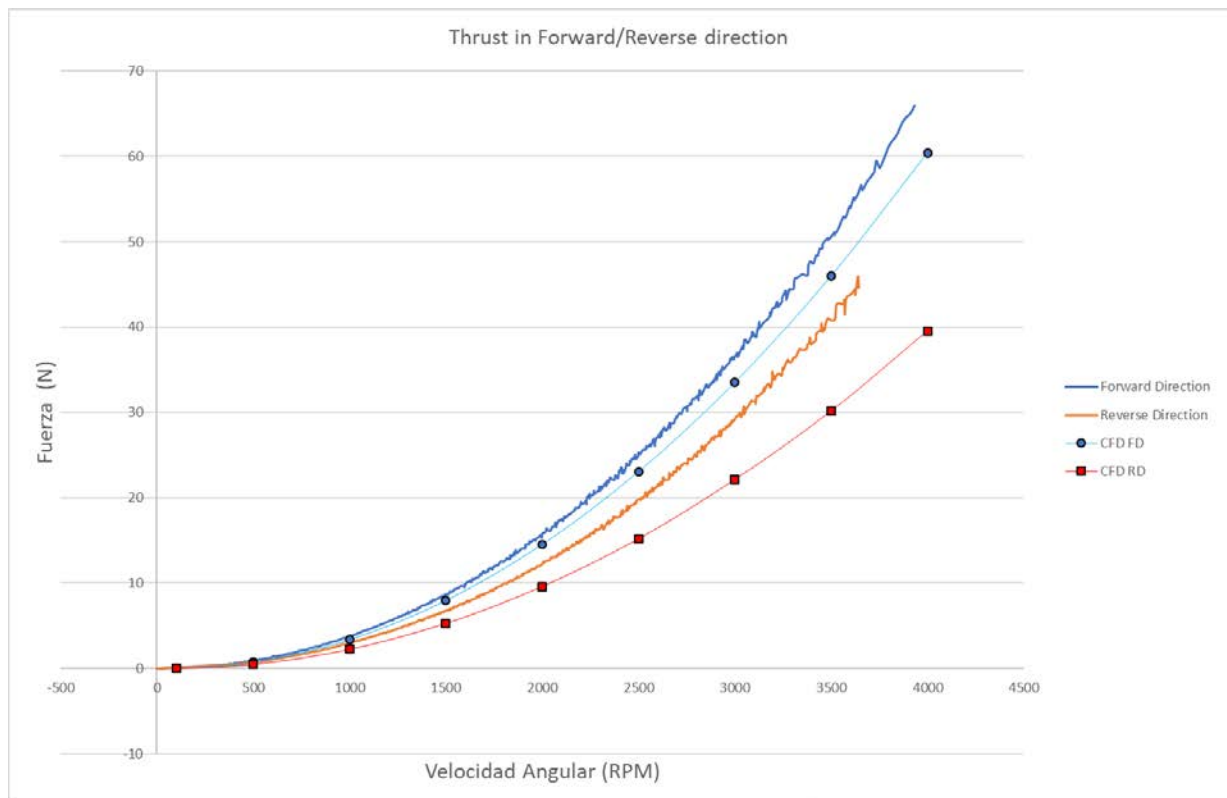


Figura 4-1 Fuerza de empuje en modo directo/inverso

Como puede observarse, los resultados obtenidos mediante simulación CFD siguen la misma tendencia que los proporcionados por el fabricante, lo que valida la metodología empleada y confirma que el modelo reproduce adecuadamente el comportamiento del propulsor.

No obstante, se aprecian ligeras diferencias entre ambos conjuntos de datos, que pueden atribuirse principalmente a la discretización del dominio y a las simplificaciones adoptadas en el modelo numérico. En el presente estudio se ha utilizado una malla de aproximadamente 250 000 celdas, lo que supone un compromiso entre precisión y coste computacional.

Una posible mejora de los resultados podría lograrse mediante un refinamiento de la malla, reduciendo el tamaño de los elementos e incrementando el número total de celdas. Asimismo, la utilización de técnicas de refinamiento local, como la definición de Body of Influence (BOI) en la zona de la hélice, permitiría aumentar la resolución en las regiones de mayor interés hidrodinámico.

Por otro lado, el tamaño y la forma del dominio computacional también influyen en la precisión de la simulación. En este trabajo se ha considerado un dominio de longitud aproximada de ocho veces el diámetro de la hélice y un ancho de tres veces dicho diámetro. La implicación de este dominio, así como la adopción de geometrías más regulares, podría mejorar la representación del flujo y reducir los efectos de contorno.

Finalmente, es importante señalar que los datos proporcionados por el fabricante tampoco están exentos de incertidumbre, ya que pueden verse afectados por las condiciones experimentales, como la temperatura del agua y sus propiedades físicas. En este contexto, la buena concordancia observada entre ambos conjuntos de resultados permite considerar que los valores obtenidos mediante simulación son suficientemente representativos, lo que justifica su utilización para el cálculo de las curvas de rendimiento del propulsor.

Con el fin de comprobar la influencia del mallado en los resultados obtenidos, se llevó a cabo una simulación adicional incorporando un refinamiento local mediante la definición de un Body of Influence (BOI) en la zona de la hélice.

Con el objetivo de evaluar la mejora en la precisión del modelo, en la Figura 4-2 se presenta la comparación entre los resultados obtenidos mediante simulación CFD con refinamiento local (BOI) y los datos proporcionados por el fabricante.



Figura 4-2 Fuerza de empuje en modo directo/inverso con BOI

Como resultado, se observó una mejora significativa en la concordancia entre los resultados obtenidos mediante CFD y los datos proporcionados por el fabricante, especialmente en el modo inverso, donde previamente se apreciaban mayores diferencias.

Esta configuración permitió incrementar la resolución de la malla en la región de mayor interés hidrodinámico, alcanzando un tamaño de malla del orden de 1 millón de celdas, frente a las aproximadamente 250 000 celdas empleadas en la simulación inicial.

Este resultado confirma que el refinamiento del mallado, y en particular el uso de técnicas como el BOI, permite mejorar la precisión del modelo numérico, validando las consideraciones realizadas anteriormente sobre la influencia de la discretización en los resultados.

Por lo tanto, este comportamiento pone en manifiesto la sensibilidad del modelo numérico al mallado, siendo este uno de los factores más relevantes en la obtención de resultados fiables en simulaciones CFD. Además, puede considerarse que el modelo presenta una tendencia hacia la independencia de malla, si bien un refinamiento adicional podría seguir mejorando la precisión a costa de un mayor coste computacional. No obstante, la elección del nivel de refinamiento debe ajustarse a los objetivos del estudio y a los recursos disponibles.

4.3 Curvas de rendimiento del propulsor T200 ($n = 3000 \text{ rpm}$)

En este apartado se analizan las curvas de rendimiento del propulsor T200 para un régimen de giro constante $n=3000\text{rpm}$, obtenidas a partir de la variación de la velocidad de avance del flujo.

A partir de los resultados obtenidos mediante la simulación CFD, se calcularon los coeficientes hidrodinámicos adimensionales, representando el coeficiente de empuje (C_T), el coeficiente de par (C_Q) y el rendimiento (η) en función de la relación de avance J .

En la Figura 4-3 se muestran las curvas de rendimiento correspondientes al modo directo, donde se representa la evolución de C_T , $10C_Q$ y η en función de J .

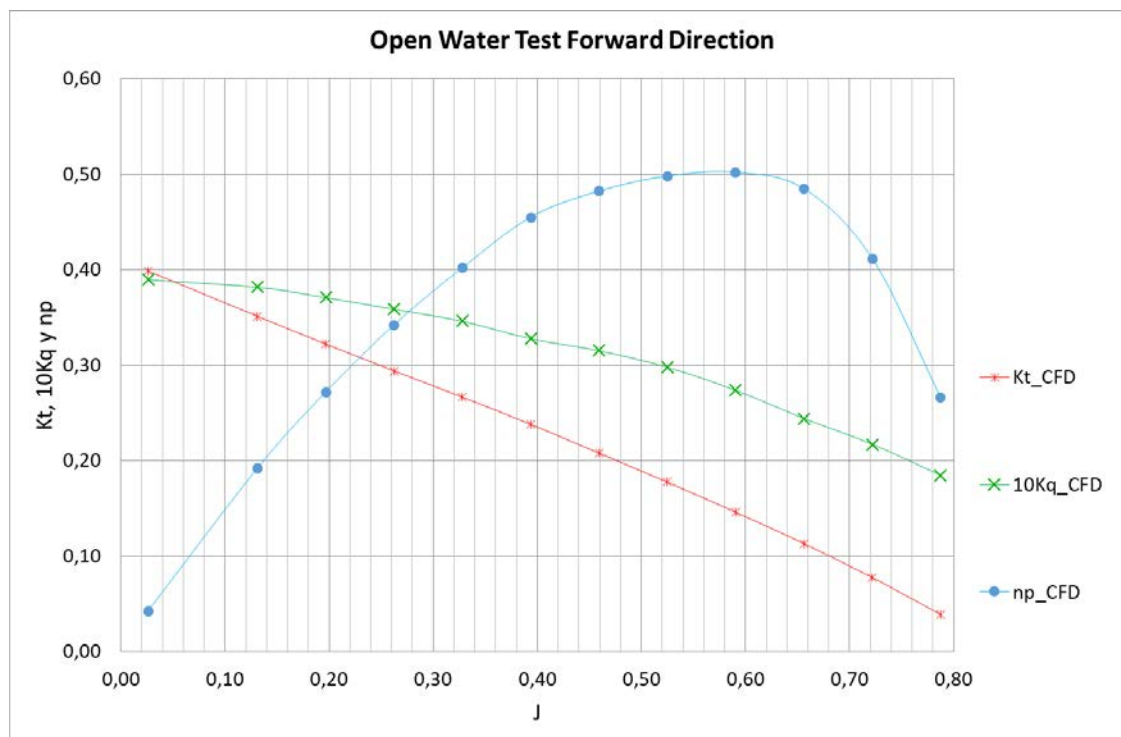


Figura 4-3 Curva de rendimiento FD

Como puede observarse, en modo directo del propulsor presenta un comportamiento eficiente en un amplio rango de operación, alcanzando valores máximos de rendimiento del orden de $\eta \approx 0,5$. Asimismo, la relación de avance se extiende hasta valores cercanos a $J \approx 0,8$, lo que indica una buena capacidad de adaptación a distintas condiciones de funcionamiento.

El coeficiente de empuje (C_T) muestra una disminución progresiva con el aumento de J , mientras que el coeficiente (C_Q), representado como ($10C_Q$), sigue una tendencia similar. Esta evolución es coherente con el comportamiento teórico de las hélices, donde el incremento de la velocidad de avance reduce la carga hidrodinámica sobre las palas.

Por otro lado, en la Figura 4-4 se presentan las curvas de rendimiento correspondientes al modo inverso, bajo las mismas condiciones de régimen de giro.

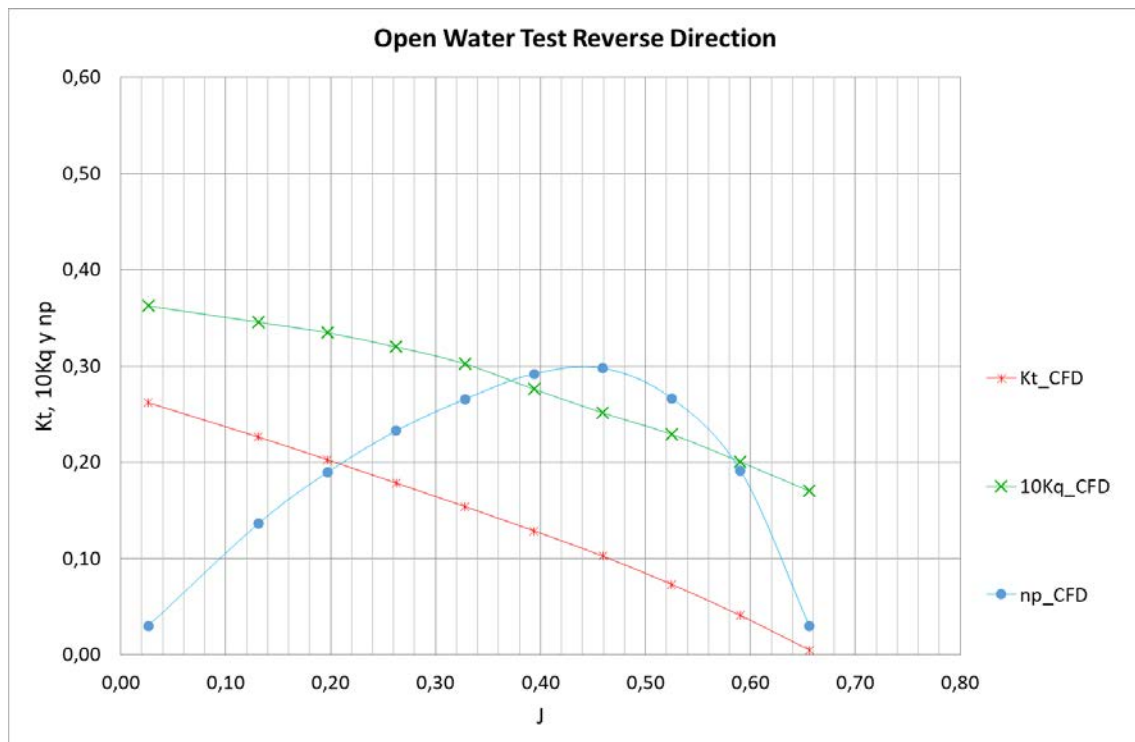


Figura 4-4 Curva de rendimiento RD

En este caso, se observa una reducción significativa en el rendimiento del propulsor, alcanzando valores máximos del orden de $\eta \approx 0,3$, con un rango de operación más limitado, hasta aproximadamente $J \approx 0,66$.

Esta diferencia respecto al modo directo se debe a que la hélice no está optimizada para operar en sentido inverso. El flujo incide sobre las palas en una dirección no diseñada, lo que provoca una distribución de presiones menos favorable, así como mayores pérdidas asociadas a fenómenos de separación y recirculación.

Como consecuencia, la conversión de energía mecánica de empuje resulta menos eficiente, lo que se refleja en los menores valores de rendimiento obtenidos.

En conjunto, los resultados obtenidos muestran un comportamiento claramente diferenciado entre ambos modos de funcionamiento, siendo el modo directo significativamente más eficiente. Este comportamiento es característico de los propulsores carenados utilizados en vehículos submarinos, donde se prioriza el empuje y el control en condiciones de bajo coeficiente de avance, optimizando el diseño para el funcionamiento en un único sentido.

La representación conjunta de C_T , C_Q y η permite caracterizar de forma completa el comportamiento hidrodinámico del propulsor, proporcionando una base sólida para su análisis e integración en sistemas de propulsión submarina.

En definitiva, el análisis de las curvas de rendimiento pone de manifiesto que el propulsor T200 presenta un comportamiento claramente optimizado para su funcionamiento en modo directo, ofreciendo mayores niveles de eficiencia y un rango de operación más amplio. Además, la identificación del punto de máxima eficiencia permite determinar las condiciones óptimas de operación del propulsor. Este comportamiento resulta coherente con su aplicación en vehículos submarinos, donde se prioriza la generación de empuje y el control preciso del movimiento en condiciones de bajo coeficiente de avance.

Por otro lado, la diferencia observada entre los modos directo e inverso evidencia la influencia de la geometría de la hélice y del flujo sobre su rendimiento, siendo este comportamiento característico de las hélices carenadas. Finalmente, cabe señalar que los resultados obtenidos están condicionados por las

hipótesis de modelado adoptadas, por lo que un refinamiento adicional del mallado podría mejorar la precisión de las simulaciones.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusión de los objetivos iniciales

5.1.1 Modelado tridimensional de la hélice

Se ha alcanzado con éxito la reconstrucción tridimensional de la hélice del propulsor T200 mediante el uso de escaneado 3D de luz estructurada. El proceso se ha optimizado centrando la adquisición en una única pala, aprovechando la simetría del conjunto, lo que ha permitido reducir el tiempo de escaneado sin comprometer la precisión. La nube de puntos obtenida presenta un error aproximado de 0,1 mm, valor adecuado para la posterior reconstrucción geométrica en entorno CAD.

A partir de dicha nube de puntos, se ha generado un modelo preciso de la hélice en Autodesk Inventor, cumpliendo el objetivo de representar con fidelidad la geometría del propulsor.

5.1.2 Ensamblaje completo del propulsor

Se ha desarrollado el ensamblaje del propulsor en entorno CAD, integrando la hélice reconstruida con los principales elementos del sistema carenado. Para ello, se han simplificado aquellas partes no relevantes para el análisis hidrodinámico permitiendo obtener un modelo funcional y adecuado para su utilización en simulación numérica.

Este ensamblaje ha permitido definir correctamente la geometría del dominio de estudio y sentar las bases para el posterior desarrollo del modelo CFD.

5.1.3 Elaboración de la malla y simulación CFD

Se ha llevado a cabo la generación de la malla tridimensional del fluido y la configuración del modelo CFD en ANSYS Fluent, definiendo el dominio computacional, las condiciones de contorno y los parámetros de simulación. La estrategia adoptada, basada en la división en regiones rotatoria y estacionaria, ha permitido representar de forma adecuada el comportamiento del flujo alrededor de la hélice.

A partir, de las simulaciones realizadas, se han determinado los coeficientes adimensionales de empuje (C_T), par (C_Q) y rendimiento (η) en función de la relación de avance, cumpliendo el objetivo planteado.

5.1.4 Obtención y análisis de las curvas de rendimiento

Finalmente, se han obtenido y representado las curvas de rendimiento del propulsor tanto en modo directo como en modo inverso. El análisis comparativo realizado muestra un comportamiento claramente diferenciado entre ambos modos, presentando el propulsor un mayor rendimiento en modo directo, con valores de eficiencia superiores y un rango de operación más amplio.

Estos resultados son coherentes con el diseño de las hélices carenadas empleadas en ROV, las cuales están optimizadas para operar en condiciones de bajo coeficiente de avance, priorizando la generación de empuje frente a la eficiencia en sentido inverso.

5.2 Objetivos adicionales

5.2.1 Análisis de la influencia del mallado

Además de los objetivos inicialmente planteados, se ha realizado un análisis de la influencia del mallado en los resultados obtenidos. En particular, se ha comprobado que el refinamiento local mediante técnicas como el *Body of Influence* permite mejorar la precisión de la simulación, especialmente en el modo inverso, reduciendo las discrepancias con los datos del fabricante.

Este análisis pone en manifiesto la sensibilidad del modelo CFD a la discretización y aporta un valor añadido al trabajo, reforzando la validez de la metodología empleada.

5.3 Conclusión final

Todos los objetivos planteados en este Trabajo Fin de Grado han sido alcanzados satisfactoriamente, logrando la determinación de las curvas de rendimiento del propulsor T200 mediante técnicas de ingeniería inversa y simulación CFD.

El trabajo desarrollado ha permitido obtener una caracterización hidrodinámica detallada del propulsor, aportando información relevante sobre su comportamiento en distintos modos y evidenciando su mayor eficiencia en modo directo.

Asimismo, se ha demostrado la capacidad de la simulación CFD como herramienta fiable para el análisis de sistemas de propulsión marina, especialmente en situaciones donde la información proporcionada por el fabricante es limitada.

En conjunto, este trabajo contribuye a mejorar el conocimiento del comportamiento del propulsor T200 y proporciona una base sólida para su aplicación en el diseño y análisis de vehículos submarinos no tripulados.

5.4 Líneas futuras

5.4.1 Corto plazo: Mejora del modelo CFD y estudio de independencia de malla

Como primera línea de desarrollo futuro, se propone profundizar en la mejora del modelo CFD empleado, especialmente en lo relativo a la calidad del mallado y la precisión de los resultados obtenidos. En el presente trabajo se ha comprobado que la discretización del dominio influye directamente en la concordancia con los datos del fabricante, observándose mejoras significativas al aplicar técnicas de refinamiento local como el *Body of Influence*.

En este sentido, resultaría de interés realizar un estudio sistemático de independencia de malla, evaluando diferentes tamaños de elemento y configuraciones de refinamiento con el objetivo de garantizar la convergencia de los resultados. Asimismo, podría analizarse la influencia del tamaño del dominio computacional, incrementando sus dimensiones para reducir posibles efectos de contorno sobre el flujo.

Por otro lado, en el presente trabajo se ha empleado la técnica de Marco de Referencia Múltiple (MRF), en la que el dominio se divide en una región estacionaria y una región rotatoria resuelta en un sistema de referencia de rotación. Esta aproximación permite obtener resultados representativos con un coste computacional reducido, siendo adecuada para estudios estacionarios del rendimiento de hélices.

No obstante, como línea de mejora, se plantea la utilización de metodologías más avanzadas, como el uso de mallas rotantes (Sliding Mesh) o técnicas de malla superpuesta (Overset Mesh), que permitirían capturar fenómenos no estacionarios y modelar con mayor precisión la interacción entre la hélice y el

flujo. Estas técnicas podrían aportar una mayor fidelidad en los resultados, especialmente en condiciones de operación más complejas.

Estas mejoras permitirían aumentar la precisión del modelo y obtener resultados aún más fiables, consolidando la simulación CFD como herramienta de análisis del propulsor.

5.4.2 Medio plazo: Estudio del impacto de elementos de protección en la hélice

En aplicaciones reales, los vehículos submarinos no tripulados (ROV) operan en entornos donde es frecuente la presencia de algas, sedimentos u otros elementos en suspensión que pueden interferir con el funcionamiento del sistema propulsivo. Como consecuencia, en algunos casos se emplean sistemas de protección, como rejillas o estructuras de barrera, con el objetivo de evitar la entrada de dichos elementos en la hélice.

En este contexto, una línea de trabajo futura de gran interés consiste en analizar la influencia de estos elementos de protección en el rendimiento hidrodinámico del propulsor. La incorporación de una rejilla o estructura similar podría modificar significativamente el flujo de entrada a la hélice, afectando tanto al empuje generado como a la eficiencia del sistema.

Mediante simulaciones CFD, sería posible evaluar diferentes configuraciones de protección, comparando su impacto en los coeficientes de empuje, par y rendimiento, así como en la distribución de velocidades y presiones en el interior del carenado.

Este análisis permitiría establecer un compromiso óptimo entre protección mecánica y rendimiento hidrodinámico, aportando un valor añadido al diseño de sistemas de propulsión en ROV.

Cabe destacar que para esta línea de estudio no ha podido abordarse en el presente trabajo debido a limitaciones de tiempo, si bien se considera una extensión directa y natural del mismo.

5.4.3 Medio plazo: Modelado simplificado de propulsores en ROV

El presente trabajo se ha centrado en el análisis de un único propulsor. Sin embargo, los vehículos submarinos tipo ROV suelen incorporar configuraciones con múltiples propulsores (5, 6 u 8), cuya interacción influye de forma significativa en el comportamiento global del sistema.

En este sentido, una línea futura de desarrollo consiste en la creación de modelos simplificados de propulsor que permitan reducir el coste computacional, facilitando la simulación del vehículo completo sin necesidad de modelar en detalle cada uno de los propulsores.

Este tipo de aproximación permitiría analizar fenómenos globales como la interacción entre chorros, el control del vehículo, la distribución de empujes o la eficiencia global del sistema propulsivo, abriendo la puerta a estudios más completos del comportamiento del ROV en condiciones reales de operación.

5.4.4 Largo plazo: Aplicación en sistemas ROV para la Armada

A largo plazo, se plantea la integración del propulsor caracterizado en el presente trabajo en plataformas ROV destinadas a aplicaciones específicas en el ámbito de la Armada. Estos vehículos podrían emplearse como herramienta de apoyo en tareas de inspección del casco de buques en alta mar, revisión de elementos propulsivos o asistencia a buzos en operaciones de mantenimiento y verificación.

El uso de modelos hidrodinámicos precisos permitiría optimizar el comportamiento del vehículo en condiciones reales, mejorando su maniobrabilidad y capacidad de posicionamiento en entornos complejos. Asimismo, este tipo de soluciones contribuiría a aumentar la seguridad operativa, reduciendo la exposición directa del personal en situaciones de riesgo.

De este modo, el trabajo desarrollado puede servir como base para futuras aplicaciones prácticas orientadas al apoyo técnico y operativo en el entorno marítimo.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Rico López y A. Museros Alegre, «Vehículos marinos de operación remota (ROV): La vanguardia de la intervención subacuática,» Armada-Ministerio de Defensa, 2023, pp. 871-890.
- [2] Ministerio de Defensa (España), «Dirección General de Armamento y Material,» Ministerio de Defensa (España), [En línea]. Available: <https://www.defensa.gob.es/ministerio/organigrama/sedef/dgam/>. [Último acceso: Enero 2026].
- [3] A. Conte de los Ríos, «Los UMS en la actualidad, estado del arte,» *Cuadernos de Pensamiento Naval*, nº 40, pp. 33-34, 2025.
- [4] Blue Robotics, «T200 Thruster,» Blue Robotics, [En línea]. Available: <https://bluerobotics.com/store/thrusters/t100-t200-thrusters/t200-thruster-r2-rp/>. [Último acceso: Enero 2026].
- [5] Blue Robotics, «BlueROV2 Operation,» Blue Robotics, [En línea]. Available: <https://bluerobotics.com/learn/bluerov2-operation/>. [Último acceso: Enero 2026].
- [6] Blue Robotics, «BlueROV2 Software Setup,» Blue Robotics, [En línea]. Available: <https://bluerobotics.com/learn/bluerov2-software-setup/>. [Último acceso: 2026].
- [7] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), «ICTS-CEHIPAR,» INTA, [En línea]. Available: <https://www.inta.es/ICTS-CEHIPAR/es/inicio/>. [Último acceso: Enero 2026].
- [8] A. Baquero Mayor, Introducción a la resistencia y propulsión. Propulsión del Buque., Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, 2011.
- [9] A. F. Molland, Ship Resistance and Propulsion, Cambridge: Cambridge University Press, 2017 (2ª edición).
- [10] J. Carlton, Marine Propellers and Propulsion, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012.
- [11] J. Willemsen, Improving Potential Flow Predictions for Ducted Propellers, Universidad de Twente: Faculty of Engineering, Group Engineering Fluid Dynamics, Program Mechanical Engineering, 2013.
- [12] Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, «Centro de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo (CEHIPAR),» Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, [En línea]. Available: <https://www.ciencia.gob.es/Organismos-y-Centros/ICTS/Ingenieria/MARHIS/CEHIPAR.html>. [Último acceso: Enero 2026].

- [13 ANSYS, Inc., «ANSYS Fluent User's Guide,» ANSYS Fluent, [En línea]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v252/en/fluent_ug/flu_ug.html. [Último acceso: Febrero 2026].
- [14 Jing Liu, Charlene, Bernard Voon Ee HOW, Haihua Xu, Wei Han Siow, Rion You y Eng Wei Gog, «Experimental and Numerical Investigation on Ducted Thruster for Underwater Robots,» de *IEEE International Conference on Cybernetics and Intellignet Systems (CIS) and IEEE International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM)*, Hangzhou, China, 2024.
- [15 ANSYS, Inc., «ANSYS Fluent,» Software de simulación CFD, 2025. [En línea]. Available: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>.
- [16 Artec 3D, «Artec Studio,» Software de escaneo y procesamiento 3D, 2014. [En línea]. Available: <https://www.artec3d.com/3d-software/artec-studio>.
- [17 AESUB, «AESUB Products,» AESUB, [En línea]. Available: <https://aesub.com/products/>. [Último acceso: Enero 2026].
- [18 Artec 3D, «Artec Studio 20 User Guide,» Artec 3D, [En línea]. Available: <https://docs.artec3d.com/as/20/en/>.
- [19 Autodesk, Inc., «Autodesk Inventor Professional,» Autodesk, Inc., 2024. [En línea]. Available: <https://www.autodesk.com/es/products/inventor/overview>.
- [20 J. A. R.-G. Salgueiro, «Análisis CFD del comportamiento hidrodinámico de una hélice (Trabajo Fin de Grado),» Centro Universitario de la Defensa, Vigo, 2015.
- [21 Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH, «SVA Potsdam,» SVA Potsdam, [En línea]. Available: <https://www.sva-potsdam.de/en/>.
- [22 Blue Robotics, «T200-Public-Performance-Data-10-20V-September-2019,» Blue Robotics, Septiembre 2019. [En línea]. Available: <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fcad.bluerobotics.com%2FT200-Public-Performance-Data-10-20V-September-2019.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK>.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El presente proyecto se enmarca en el ámbito de la digitalización y optimización de sistemas de propulsión para vehículos marinos no tripulados, un sector en crecimiento dentro de la ingeniería naval y de defensa. La caracterización hidrodinámica de una hélice comercial mediante técnicas de digitalización tridimensional y simulación CFD no constituye únicamente un análisis técnico puntual, sino que forma parte de una tendencia global orientada a la validación virtual, la eficiencia energética y la mejora de la autonomía tecnológica en sistemas complejos.

Desde el punto de vista social y de seguridad, el perfeccionamiento de los sistemas de propulsión en vehículos submarinos no tripulados contribuye a reforzar la fiabilidad operativa de estas plataformas en entornos potencialmente peligrosos. Los ROV permiten realizar tareas de inspección, mantenimiento y reconocimiento sin exponer directamente al personal humano a condiciones de riesgo. La mejora en la comprensión del comportamiento hidrodinámico de la hélice facilita un dimensionamiento adecuado del sistema propulsivo, incrementando la estabilidad y el control del vehículo durante la misión. Asimismo, el uso de simulación numérica como herramienta de análisis previo reduce la necesidad de ensayos físicos repetitivos en fases iniciales, minimizando riesgos asociados a pruebas experimentales en entornos reales.

En el ámbito económico e industrial, la aplicación de metodologías basadas en ingeniería inversa y CFD representa una alternativa eficiente frente a la dependencia exclusiva de campañas experimentales. La posibilidad de obtener curvas de rendimiento y coeficientes adimensionales mediante simulación reduce costes asociados a ensayos en canal, fabricación de prototipos adicionales y tiempos de validación. Además, la generación de un modelo digital preciso de un componente comercial permite su reutilización en múltiples escenarios de análisis, tales como estudios a distintos regímenes de giro, evaluaciones de integración del modelo digital maximiza el retorno del esfuerzo inicial de digitalización y refuerza la eficiencia del proceso de desarrollo.

Un aspecto relevante es la autonomía tecnológica que proporciona la ingeniería inversa aplicada a componentes comerciales. La reconstrucción geométrica detallada de la hélice a partir de una nube de puntos permite disponer de un modelo propio independiente de información propietaria del fabricante, facilitando su integración en estudios avanzados y reduciendo la dependencia externa en procesos de análisis y diseño.

Desde una perspectiva ambiental, la optimización del rendimiento hidrodinámico tiene un impacto directo en la eficiencia energética del sistema propulsivo. Una hélice que opera en un rango óptimo requiere menor potencia para generar el empuje necesario, reduciendo el consumo eléctrico del vehículo y, de manera indirecta, la huella ambiental asociada a su operación. Asimismo, la validación virtual previa a la fabricación física disminuye la necesidad de producir múltiples prototipos, contribuyendo a un uso más racional de materiales y recursos. La modelización detallada del flujo constituye, además, un paso previo fundamental para estudios relacionados con la reducción del ruido submarino y otros fenómenos que pueden afectar a ecosistemas marinos sensibles.

En conjunto, el trabajo desarrollado se integra en un marco más amplio de transformación digital en la ingeniería marina, donde la simulación numérica, la eficiencia energética y la optimización de recursos se consolidan como pilares fundamentales en el diseño y evaluación de sistemas autónomos. La caracterización precisa de un elemento específico como la hélice analizada no solo aporta conocimiento técnico, sino que contribuye a mejorar la seguridad operativa, la eficiencia económica y la sostenibilidad ambiental de las tecnologías submarinas actuales.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

En el presente Trabajo Fin de Grado se han tenido en cuenta diversas consideraciones éticas y sociales relacionadas con el desarrollo y aplicación de la tecnología empleada.

Desde el punto de vista ético, el trabajo se ha basado en el uso responsable de herramientas de simulación numérica, en particular software de dinámica de fluidos computacional (CFD), garantizando la veracidad de los resultados mediante su validación con datos experimentales disponibles en la literatura y proporcionados por el fabricante. Asimismo, se ha hecho un uso adecuado de las fuentes de información, citando correctamente la bibliografía empleada y evitando el plagio.

En relación con el uso de herramientas digitales, incluyendo aquellas basadas en inteligencia artificial, estas se han utilizado como apoyo en la redacción del trabajo, principalmente como herramienta de ampliación de vocabulario y mejora en la expresión de ideas propias. Asimismo, se ha utilizado en la generación de imágenes con el fin de representar de forma conceptual y aclaratoria los fenómenos analizados, facilitando su comprensión. En todo momento, la interpretación, validación y desarrollo del contenido han sido realizados por el autor del trabajo.

Desde el punto de vista social, el desarrollo de sistemas de propulsión eficientes para vehículos submarinos, como los ROV, presenta un impacto positivo en diversos ámbitos. Entre ellos, destacan las aplicaciones en inspección y mantenimiento de infraestructuras submarinas, investigación científica marina y operaciones de rescate, contribuyendo a mejorar la seguridad y reducir riesgos para las personas.

No obstante, también es importante considerar que este tipo de tecnologías pueden tener aplicaciones en ámbitos militares o de vigilancia, lo que plantea la necesidad de un uso responsable y regulado de las mismas.

En el ámbito medioambiental, el diseño y optimización de propulsores más eficientes contribuye a la reducción del consumo energético y, por tanto, a una menor huella ambiental en operaciones submarinas. Sin embargo, el funcionamiento de hélices puede generar perturbaciones en el medio marino, como ruido o alteraciones en el flujo, que deben tenerse en cuentas en aplicaciones reales.

En conclusión, el desarrollo de este trabajo se ha realizado bajo criterios de responsabilidad ética, rigor científico y conciencia social, considerando tanto los beneficios como las posibles implicaciones del uso de la tecnología estudiada.

ANEXO III: DEMOSTRACIÓN DE LA EXPRESIÓN DEL RENDIMIENTO DEL PROPULSOR

En el presente anexo se desarrolla la demostración de la expresión del rendimiento del propulsor empleada en el trabajo.

Partiendo de la definición del rendimiento como la relación entre la potencia útil generada por la hélice y la potencia suministrada al eje, se obtiene:

$$\eta = \frac{Tv}{Qw}$$

A continuación, se procede a expresar esta relación en función de los coeficientes hidrodinámicos adimensionales definidos en el estado del arte. Se definen como:

$$J = \frac{V}{nD}$$

$$C_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

$$C_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

A partir de estas expresiones, se pueden despejar las magnitudes de empuje y velocidad:

$$T = C_T \rho n^2 D^4$$

$$v = JnD$$

Sustituyendo en la expresión del rendimiento:

$$\eta = \frac{(C_T \rho n^2 D^4)(JnD)}{Qw}$$

Teniendo en cuenta que la velocidad angular se define como $w = 2\pi n$, sustituyendo la expresión del par:

$$Q = C_Q \rho n^2 D^5$$

Se obtiene finalmente

$$\eta = \frac{C_T J}{2\pi C_Q}$$

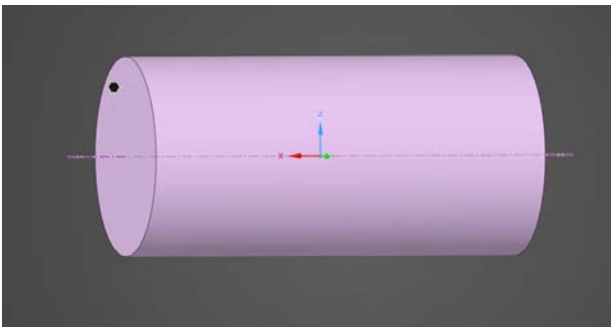
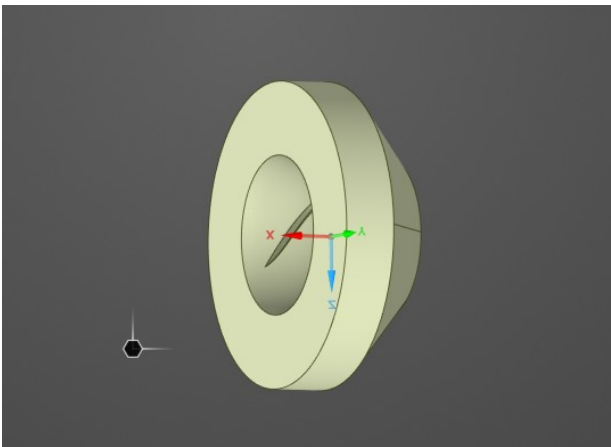
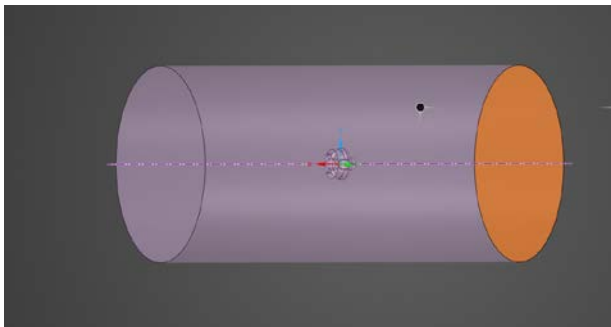
De este modo, se obtiene la expresión del rendimiento en función de coeficientes adimensionales, utilizada en el desarrollo del presente trabajo.

ANEXO IV: DEFINICIÓN DE SUPERFICIES Y CONDICIONES DE CONTORNO EN EL MODELO CFD

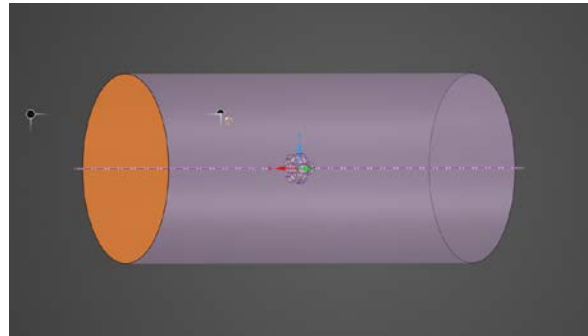
En el presente anexo se recoge la nomenclatura empleada para la identificación de las distintas superficies del dominio computacional, así como el tipo de condición de contorno asignada a cada una de ellas en el proceso de mallado y configuración del modelo CFD.

La asignación de nombres a las superficies se realizó durante la fase de preparación de la geometría, con el objetivo de facilitar la definición de las condiciones de contorno y asegurar una correcta interpretación del modelo en el entorno de simulación.

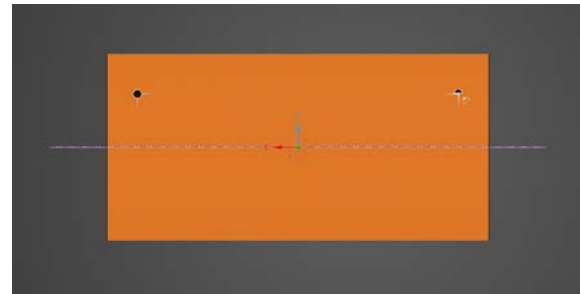
En la Tabla 0-1 se presentan las diferentes superficies definidas, junto a su denominación en el modelo y el tipo de condición de contorno asociada.

Nombre	Condiciones de contorno	Foto
F3d_fixed	-	
F3d_rotating	-	
Inlet	Velocity-inlet	

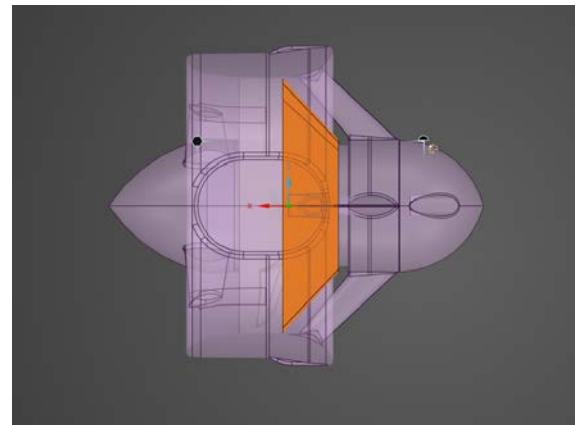
Outlet Pressure-outlet



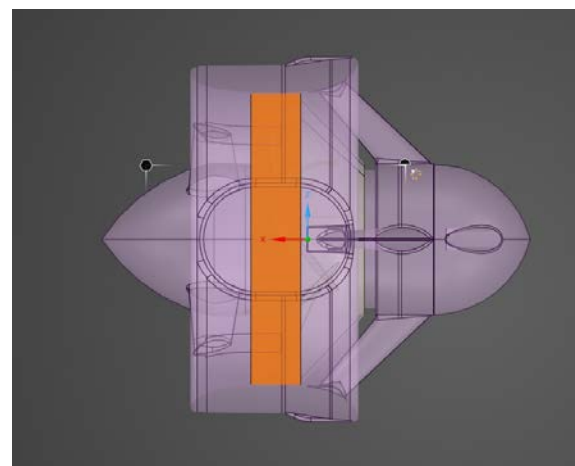
Symmetry Symmetry



Int_1 Internal

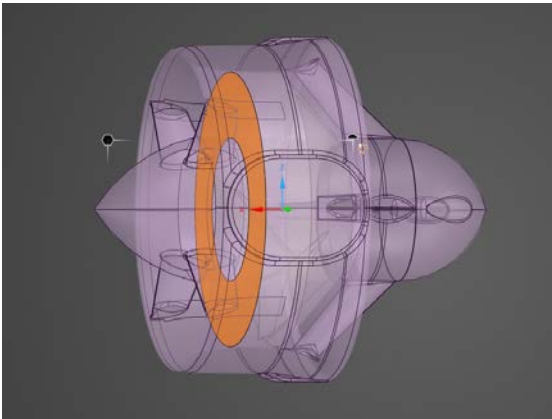


Int_cil Internal



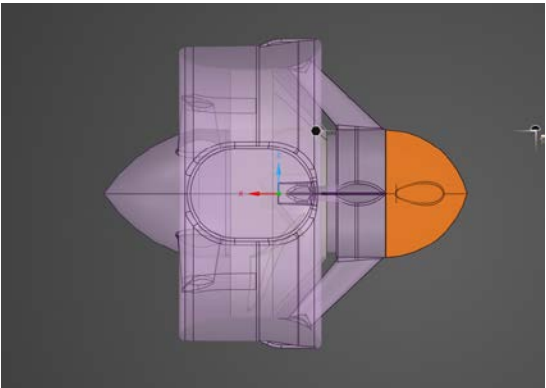
Int_2

Internal



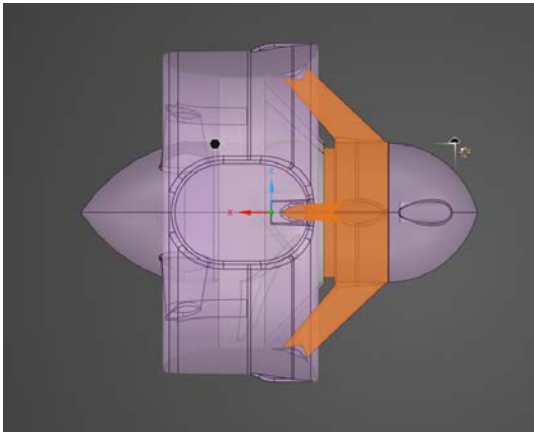
W_nosecone

Wall



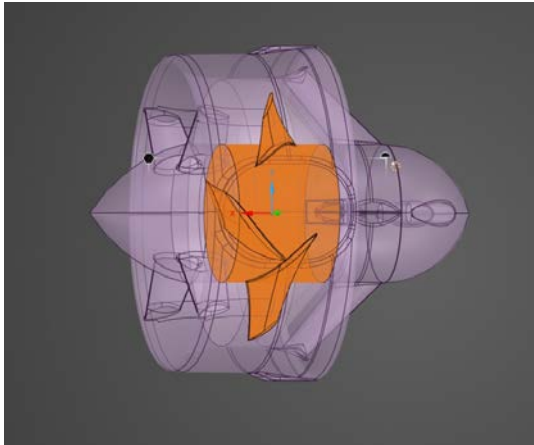
W_core

Wall



W_propeller

Wall



W_nozzle

Wall

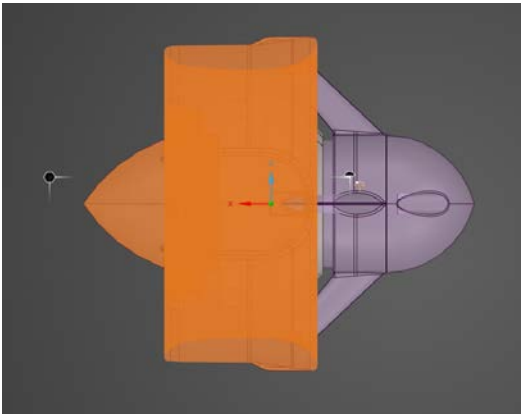


Tabla 0-1 Relación de superficies y condiciones de contorno

ANEXO V: DOCUMENTACIÓN TÉCNICA DEL PROPULSOR T200 PROPORCIONADA POR EL FABRICANTE

El presente anexo recoge la información técnica publicada por el fabricante Blue Robotics relativa al propulsor Blue Robotics T200 Thruster, empleado como objeto de estudio en el presente Trabajo Fin de Grado. Esta documentación constituye el punto de partida para comprender el funcionamiento general del sistema propulsivo y establecer un marco de referencia para el análisis hidrodinámico desarrollado posteriormente mediante simulación CFD.

El propulsor T200 es un sistema de propulsión eléctrica diseñado para su uso en vehículos submarinos no tripulados (ROV) y otras plataformas robóticas marinas. El sistema integra un motor eléctrico sin escobillas (BLDC) optimizado para funcionamientos en entornos sumergidos, junto con una hélice de tres palas alojada en una tobera protectora. Esta configuración carenada permite mejorar la generación de empuje a bajas velocidades de avance y proporciona protección mecánica a la hélice frente a posibles impactos o interferencias externas. Asimismo, el motor presenta una configuración conocida como *flooded motor*, en la cual el agua circula a través del motor favoreciendo su refrigeración y aumentando la fiabilidad del sistema en aplicaciones submarinas.

De acuerdo con la documentación proporcionada por el fabricante, el propulsor puede operar en un rango de tensión comprendido aproximadamente entre 7 y 20 V, siendo 16 V el valor nominal de funcionamiento. El empuje generado depende principalmente de la tensión aplicada al motor y del régimen de giro alcanzado por la hélice. En condiciones de velocidad de avance nula ($v = 0$), el propulsor es capaz de generar valores de empuje superiores a los 5 kgf (49,033 N en sistema internacional) en modo directo.

El fabricante proporciona datos de empuje tanto en modo directo como en modo inverso, expresados en unidades de kilogramo-fuerza (kgf). Estos datos, obtenidos en condiciones de empuje estático, resultan especialmente relevantes para aplicaciones en ROV, donde predominan los regímenes de bajo coeficiente de avance y es fundamental la capacidad de generar empuje a bajas velocidades [14].

La Tabla 0-1 recoge algunos de los valores aproximados de empuje proporcionados por el fabricante para diferentes tensiones de alimentación.

Tensión (V)	Empuje directo (kgf)	Empuje inverso (kgf)
12	3,7	2,9
16	5,25	4,1
20	6,7	5,05

Tabla 0-1 Empuje máximo del propulsor T200 según tensión de alimentación [14]

Con el fin de garantizar la coherencia en el análisis y facilitar la comparación con los resultados obtenidos mediante simulación CFD, los valores de empuje han sido convertidos al Sistema Internacional de Unidades (SI), expresándose en Newton (N), considerando la equivalencia $1\text{kgf} = 9,81\text{N}$.

Tensión (V)	Empuje directo (N)	Empuje inverso (N)
12	36,3	28,4
16	51,5	40,2
20	65,7	49,5

Tabla 0-2 Conversión del empuje a unidades del Sistema Internacional (Conversión realizada considerando $1 \text{ kgf} = 9.81 \text{ N}$)

Estos valores permiten estimar el comportamiento general del sistema y constituyen una referencia útil para contrastar el orden de magnitud de los resultados obtenidos mediante simulación numérica. No obstante, las curvas proporcionadas por el fabricante relacionan el empuje principalmente con parámetros eléctricos como la tensión, la corriente o la potencia consumida, sin proporcionar directamente coeficientes hidrodinámicos adimensionales que permitan un análisis más detallado del rendimiento propulsivo.

El fabricante proporciona también gráficas de rendimiento que relacionan el empuje generado con la potencia eléctrica consumida para diferentes tensiones de alimentación. Estas curvas permiten evaluar el comportamiento global del propulsor y constituyen una referencia útil para validar la coherencia de los resultados obtenidos mediante simulación CFD.

A continuación, en la Figura 0-1 se aprecia la curva de empuje en función de la potencia eléctrica para el propulsor T200 a diferentes tensiones de alimentación, según los datos proporcionados por Blue Robotics [14].

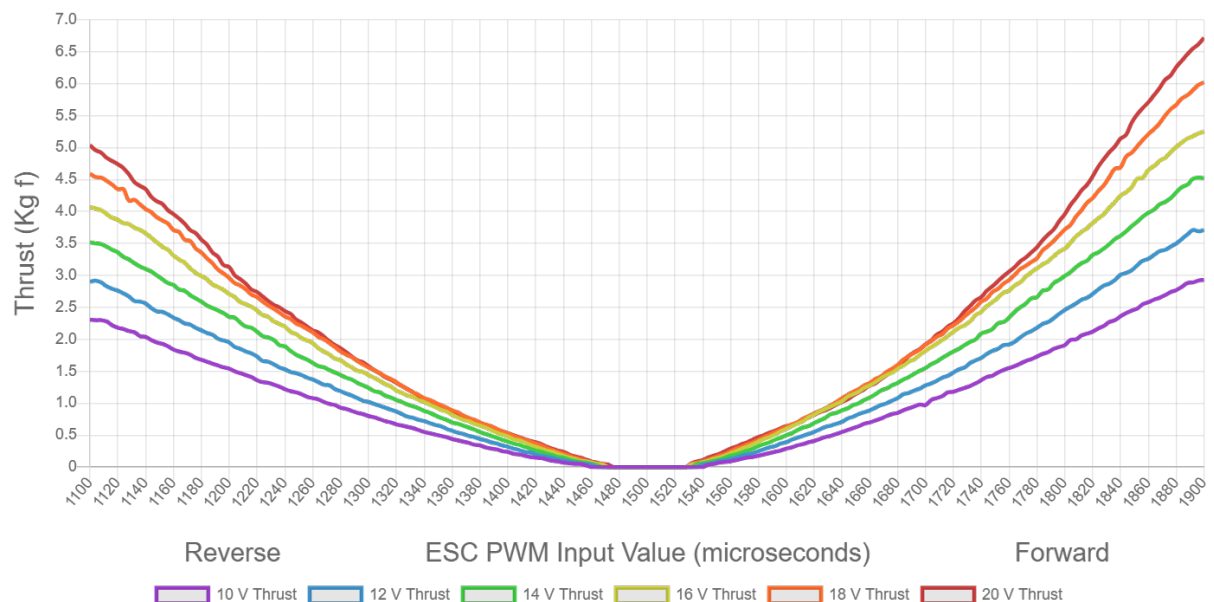


Figura 0-1 Curva de empuje en función de la potencia eléctrica [4]

Desde el punto de vista geométrico, el propulsor presenta una configuración de hélice carenada formada por tres palas y alojada en una tobera protectora. Las dimensiones principales del sistema y los parámetros geométricos más relevantes para el análisis hidrodinámico se resumen en la Tabla 0-3 incluyendo el diámetro de la hélice, el número de palas y el ángulo de paso característico.

Parámetro	Símbolo	Valor aproximado
Diámetro de hélice carenada	D	100 mm
Diámetro de la hélice	d	76 mm
Número de palas	Z	3
Tipo de paso	-	Paso fijo
Ángulo de paso (75% radio)	β	22,5°
Configuración	-	Hélice carenada

Tabla 0-3 Parámetros geométricos relevantes del propulsor [4]

A pesar de que el fabricante proporciona información general sobre el funcionamiento del propulsor, la documentación disponible no incluye datos detallados sobre la geometría completa de la hélice ni sobre las curvas hidrodinámicas características del sistema en términos de coeficientes adimensionales de empuje, par o eficiencia. Esta ausencia de información limita la posibilidad de realizar análisis predictivos precisos basados únicamente en la documentación oficial.

Por este motivo, en el presente Trabajo Fin de Grado se aborda la caracterización hidrodinámica del propulsor mediante técnicas de ingeniería inversa y simulación CFD, con el objetivo de obtener dichas curvas y complementar la información proporcionada por el fabricante.