



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis fluidodinámico con software CFD de un propulsor
waterjet*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Martín Alexander Vivanco Pérez

DIRECTORES: Antonio Eirís Barca

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis fluidodinámico con software CFD de un propulsor
waterjet*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

En el presente trabajo se lleva a cabo el análisis fluidodinámico con herramientas computacionales de un propulsor waterjet. En la primera fase se desmonta el propulsor para adquirir la geometría y crear el modelo CAD de cada pieza individualmente. La finalización de la etapa de diseño fue el ensamblaje de las piezas. Se realiza la limpieza de la geometría para extraer la superficie que es bañada por el fluido. Una vez obtenida las caras mojadas por el fluido, se procede a cerrar dicha superficie generando un volumen, el cual será importado en el Workbench de Ansys. El volumen generado es importado en Discovery en el cual se prepara la geometría. A continuación, se procede con el mallado del fluido asistido por el flujo de trabajo Watertight Geometry. En la etapa posterior de solución se imponen las condiciones de contorno (velocidad de avance y revoluciones de la hélice) y se procede con el estudio del comportamiento del fluido. Se realizaron varias simulaciones con distintas condiciones en las cuales se verifica el cumplimiento global de las ecuaciones de gobierno de la mecánica de fluidos. Como parte de los resultados, se muestran los contornos de presión sobre la hélice, los vectores de velocidad y se recogen en forma de tabla los datos de presión y velocidad en distintas zonas del fluido y fuerzas de empuje y par de accionamiento.

PALABRAS CLAVE

Análisis Fluidodinámico, Propulsor Waterjet, CFD, Ansys-Fluent.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor, el profesor Antonio Eirís Barca, por la dedicación que tiene hacia la investigación y por el apoyo brindado hacia mí durante el desarrollo del Trabajo de Fin de Grado. Además, agradecerle por las lecciones impartidas en las asignaturas del grado, que ayudaron a incrementar mis conocimientos y mi interés por la ciencia.

Asimismo, agradezco al Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar y a la Universidad de Vigo, por los recursos, asignaturas, profesores y tiempo brindados para nuestra formación como profesionales.

También, quiero agradecer, con especial mención, a mi familia. Especialmente, a mi padre y a mi madre, que siempre se preocuparon por mi educación.

Finalmente, gracias amigos y compañeros que siempre me motivaron a seguir adelante y a seguir estudiando todos los días. Siempre dije que la mejor forma de aprender es enseñando; así que, gracias David, Juan y a todos aquellos que les pude compartir un poco de mis conocimientos. Gracias Guianella y Blanca; personas que aportaron desde fuera pero que sumaron mucho.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Propulsión Naval.....	7
1.2 Propulsores Waterjet	8
1.3 Motivación	10
1.4 Objetivos	10
1.5 Alcances y limitaciones	11
2 Estado del arte	12
2.1 Waterjet: Fundamentos	12
2.1.1 Generalidades	12
2.1.2 Principio de Funcionamiento	13
2.1.3 Ventajas y desventajas	14
2.1.4 Usos del propulsor waterjet	15
2.2 Componentes Principales.....	17
2.2.1 Toma	17
2.2.2 Impulsor	18
2.2.3 Tobera	19
2.3 Predicción de Potencia y Eficiencia en Waterjets.....	20
2.3.1 Predicción de Potencia.....	20
2.3.2 Diseño Inicial y Simplificaciones	22
2.4 Fundamentos de hélices navales	23
2.4.1 Coeficientes adimensionales.....	23
2.4.2 Curvas de Rendimiento.....	24
2.5 Dinámica de Fluidos Computacional	25
2.5.1 Introducción a CFD	25
2.5.2 Procedimiento de solución.....	26
2.6 Ecuaciones de Gobierno.....	27
2.6.1 Continuidad.....	27
2.6.2 Conservación cantidad de movimiento.....	27
2.6.3 Ecuación de Navier-Stokes	27
3 Desarrollo del TFG.....	29

3.1 Caracterización con Autodesk Inventor	29
3.1.1 CAD de Piezas	29
3.1.2 Comprobación CAD mediante escáner 3D y Ensamblaje	32
3.1.3 Limpieza de la geometría.....	36
3.2 Análisis CFD.....	40
3.2.1 Geometría	41
3.2.2 Ansys Discovery	43
3.2.3 Mallado mediante Watertight Geometry Workflow	45
3.2.4 Configuraciones.....	49
3.2.5 Soluciones.....	52
4 Resultados	53
4.1 Contornos de Presión y vectores de velocidad.....	53
4.2 Conservación de la masa y cantidad de movimiento	56
4.3 Gráficas de Presión y de Fuerzas de Empuje	58
4.4 Curvas de Rendimiento del impulsor.....	62
5 Conclusiones y líneas futuras	64
5.1 Conclusiones	64
5.2 Líneas Futuras	65
6 Bibliografía.....	66
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	70
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	71
Anexo III: Secciones nombradas en Ansys Discovery	72
Anexo IV: Descripción técnica del propulsor MSQ 50 mm 7075 2 palas	77
Anexo V: Resultados de distintos parámetros para un rango de velocidad de embarcación	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Clermont: primer barco a vapor (tomada de [1]).....	7
Figura 1-2 Tornillo de Arquímedes (tomada de [3]).....	8
Figura 1-3 Quinnat de Hamilton (tomada de [4]).....	9
Figura 1-4 Esquema General de un propulsor Waterjet (tomada de [5])	9
Figura 2-1 Sistema de propulsión tipo Waterjet (tomada de [9]).....	12
Figura 2-2 Esquema idealizado de un waterjet (tomada de [5]).....	13
Figura 2-3 Funcionamiento básico de un Waterjet (tomada de [10]).....	14
Figura 2-4 Vista general de un Littoral Combat Ship (tomada de [12])	15
Figura 2-5 Embarcación bombero (tomada de [13])	15
Figura 2-6 Vista Lateral de una moto de agua (tomada de [15])	16
Figura 2-7 Barco de Radiocontrol con chorro de agua	16
Figura 2-8 Toma tipo flush intake (tomada de [10])	17
Figura 2-9 Rejillas en la toma de un waterjet de radiocontrol	17
Figura 2-10 Impulsor waterjet marca Kongsberg (tomada de [18]).....	18
Figura 2-11 Tobera waterjet marca Rolls Royce (tomada de [19]).....	19
Figura 2-12 Niveles de flujo de energía normalizado y posición de estaciones (tomada de [7])	20
Figura 2-13 Eficiencia propulsiva vs relación de velocidades del chorro V_J/V (tomada de [7]).....	23
Figura 2-14 Curvas de Rendimiento de aguas abiertas (tomada de [5])	25
Figura 2-15 Tipos de celdas que componen una malla (tomada de [26])	26
Figura 3-1 Propulsor waterjet MSQ 50 mm 7075 2 palas.....	29
Figura 3-2 Deflector	30
Figura 3-3 Tobera.....	30
Figura 3-4 Estator.....	31
Figura 3-5 Cuerpo Principal.....	31
Figura 3-6 Hélice.....	32
Figura 3-7 Hélice bañada con spray AESUB.....	33
Figura 3-8 Cuerpo principal bañado con spray AESUB	33
Figura 3-9 Ensamblaje de comparación del cuerpo principal	34
Figura 3-10 Comparación de la caracterización del cuerpo principal.....	34
Figura 3-11 Ensamblaje de comparación de la hélice.....	35
Figura 3-12 Comparación de la caracterización de la hélice.....	35
Figura 3-13 Ensamblaje final waterjet	36
Figura 3-14 “Cono truncado”	37

Figura 3-15 “Cono truncado” con hélice en su interior.....	37
Figura 3-16 Ensamblaje de piezas bañadas por el fluido	38
Figura 3-17 Corte transversal del ensamblaje de piezas bañadas por el fluido.....	38
Figura 3-18 Superficie limpia.....	39
Figura 3-19 Superficie limpia con tapa en la toma y en la salida de la tobera.....	39
Figura 3-20 Ensayo experimental de un propulsor waterjet (tomada de [32]).....	40
Figura 3-21 Modelo CFD de un propulsor waterjet (tomada de [33])	40
Figura 3-22 Diámetro impulsor del sistema waterjet de estudio.....	41
Figura 3-23 Volumen rotatorio.....	41
Figura 3-24 Volumen fijo.....	42
Figura 3-25 Volumen previo	42
Figura 3-26 Geometría en Ansys Discovery	43
Figura 3-27 Corte transversal de la geometría en Ansys Discovery	44
Figura 3-28 Resultado del ‘Share Topology’	44
Figura 3-29 Pasos y geometría importada en el Watertight Geometry Workflow.....	45
Figura 3-30 Resultado mallado superficial	46
Figura 3-31 Corte transversal del mallado superficial en la sección del waterjet.....	46
Figura 3-32 Configuración de ‘Describe Geometry’	47
Figura 3-33 Configuración de ‘Update Boundaries’	47
Figura 3-34 Resultado final del mallado del fluido.....	48
Figura 3-35 Zoom del mallado en la zona del waterjet.....	48
Figura 3-36 Interfaz de ‘Setup’ de Ansys Fluent	49
Figura 3-37 Configuración del volumen rotatorio	50
Figura 3-38 Configuración velocidad de entrada en la pared inlet	50
Figura 3-39 Proceso final del ‘Setup’	51
Figura 3-40 Historial de Residuos.....	52
Figura 4-1 Contorno de Presiones.....	54
Figura 4-2 Vectores de velocidades absoluta	55
Figura 4-3 Vectores de velocidad axial y circunferencial absoluta.....	55
Figura 4-4 Datos de fuerza, velocidad y flujo másico solicitados a Ansys Fluent.....	56
Figura 4-5 Flujos másicos de entrada y de salida del waterjet.....	57
Figura 4-6 Contorno del dominio de control en 2D	58
Figura 4-7 Gráfica de distribución de presiones normalizadas según estaciones	59
Figura 4-8 Curva de valores de fuerza de empuje.....	60
Figura 4-9 Curva de rendimiento vs coeficiente de avance	62
Figura 4-10 Curva coeficiente de empuje vs coeficiente de avance	63

Figura A4-0-1 Captura de pantalla de la descripción técnica del propulsor waterjet MSQ 50mm .77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Definiciones de las estaciones por puntos a través del waterjet (tomada de [7]).....	21
Tabla 2-2 Factores a considerarse despreciables.....	22
Tabla 3-1 Denominación de los volúmenes de trabajo	43
Tabla 3-2 Pasos Watertight Geometry Workflow	45
Tabla 3-3 Rango de velocidades del volumen rotatorio.....	49
Tabla 4-1 Parámetros iniciales de cálculo para obtención de resultados	53
Tabla 4-2 Valores usados para validación de la continuidad y cantidad de movimiento	56
Tabla 4-3 Presión total en distintas caras (velocidad de embarcación de 14 m/s)	58
Tabla 4-4 Fuerza de empuje y velocidades para distintas velocidades de embarcación.....	60
Tabla 4-5 Presión total en las caras del impulsor para distintas velocidades de embarcación.....	61
Tabla A3 0-1 Secciones en nombras en Ansys Discovery	76
Tabla A5 0-1 Fuerza de empuje, par y velocidades para un rango de velocidad de embarcación...	79

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Propulsión Naval

El transporte por un medio acuático tiene sus orígenes hace casi cinco mil años, cuando los egipcios fabricaron sus primeras embarcaciones a remo para navegar por el Nilo y por el Mediterráneo. Posteriormente, el método más utilizado para navegar largas distancias fueron las velas. Estas embarcaciones tuvieron uso militar por países como España, Reino Unido, Países Bajos y Portugal. Años después, durante la Primera Revolución Industrial, alrededor de 1765, James Watt con la invención de la máquina a vapor cambiaría la forma de transmisión de energía y propulsión de las embarcaciones. Durante el siglo XIX, se desarrolló el primer buque a vapor con el cual se establecería el primer servicio regular de buques a vapor, este buque se denominó el Clermont (o North River Steamboat); este fue construido por Robert Fulton en 1807 y revolucionó el transporte fluvial en Estados Unidos realizando viajes recurrentes en el Río Hudson entre New York y Albany [1].

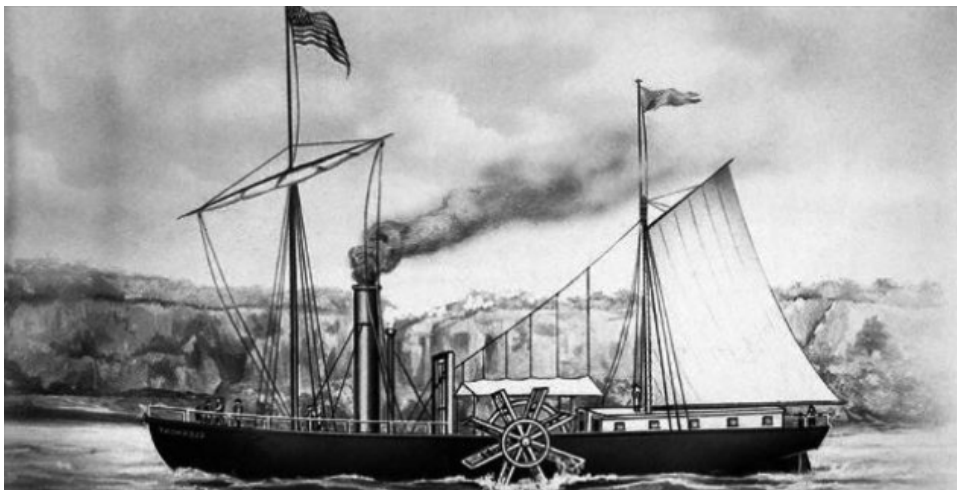


Figura 1-1 Clermont: primer barco a vapor (tomada de [1])

Años después, en el año 1894 el ingeniero angloirlandés Charles Parsons inventa un nuevo sistema: la turbina a vapor. Después en 1897 el ingeniero alemán y francés Rudolf Diesel introduce su motor de autoencendido por compresión, dando inicio a una nueva forma de propulsión: los motores diésel. Es así que, a inicios del siglo XX, en la Primera Guerra Mundial, ya se podían ver acorazados, cruceros de batalla, destructores y submarinos usando máquinas de vapor o los motores diésel.

La ciencia y la tecnología permitió que los avances continúen; es así que, en 1903 se introduce la propulsión eléctrica, especialmente la diésel-eléctrica, el primer barco en usar este tipo de propulsión fue el petrolero fluvial Vandal. Posteriormente, después de la Segunda Guerra Mundial, entre 1947 y 1951, se introduce la turbina a gas, una nueva forma que otorgaba mayores velocidades efectivas. En 1954, después del descubrimiento de la energía atómica, se introdujo una nueva forma de propulsión: la energía nuclear, esta nueva forma de generación de energía brindó mayor autonomía a los buques, los cuales ya podían permanecer más tiempo navegando sin necesidad de repostar o entrar a puerto. Esto fue un hito importante para los submarinos, los cuales podían estar más tiempo en inmersión y mantener discreción; el primer submarino en utilizar propulsión nuclear fue el USS Nautilus y el primer buque de superficie en usarlo fue el USS Enterprise [2].

Como se ha podido leer en los párrafos anteriores, la propulsión naval ha tenido un continuo desarrollo tecnológico, tanto así que ahora podemos encontrar buques con sistemas de propulsión combinados. En la actualidad, existen una clasificación muy amplia de los sistemas de propulsión según su fuente de energía: diésel, eléctrica, turbinas de gas, nuclear, sistemas combinados, híbridos. Y según el sistema de propulsión se pueden encontrar sistemas de hélices convencionales, Voith Schneider, PODS y waterjets. Son estos últimos los cuales estudiaremos en este trabajo.

1.2 Propulsores Waterjet

Los propulsores waterjets o también conocidos como hidrojets son sistemas de propulsión náuticas intraborda. El sistema consiste en un impulsor o bomba dentro del casco el cual genera un chorro a alta velocidad que es expulsado por popa de la embarcación, es muy parecido a un propulsor común y corriente de eje y hélice, pero con la diferencia que en este caso tenemos todo dentro de la embarcación.

El funcionamiento de un waterjet se basa en canalizar un chorro de agua producido para una hélice o impulsor, de esta forma su energía aumenta al salir. Este principio se remonta hacia el siglo III a.C. cuando Arquímedes desarrolló el tornillo de Arquímedes (Figura 1-2) para transportar líquidos a distintos niveles, utilizado para achicar barcos hundidos [3].

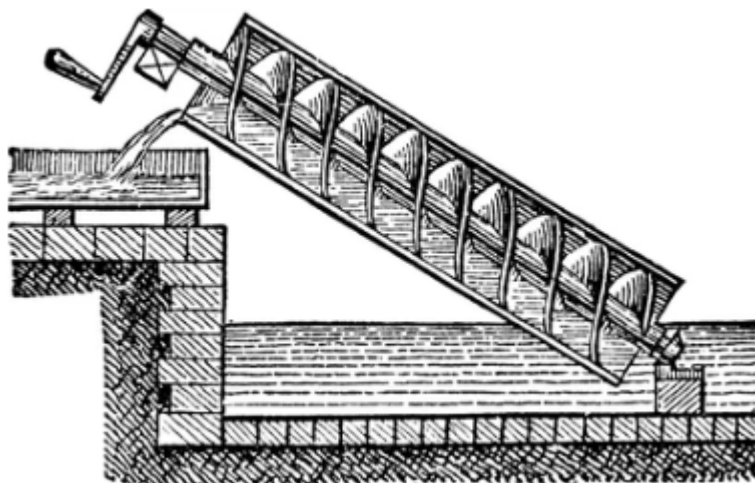


Figura 1-2 Tornillo de Arquímedes (tomada de [3])

También se debe mencionar a Bernoulli con su invento de un tubo en L, el cual atravesaba una embarcación; básicamente entraba agua por un extremo y salía por otro, ubicado en popa, a mayor velocidad, lo cual empujaba levemente una embarcación. Tuvieron que pasar muchos años para que el concepto de hidrojete se parezca a lo que se conoce ahora fue entonces cuando en 1950, Sir. Hamilton ideó la configuración de una bomba centrífuga que aspiraba agua y la expulsaba por la parte inferior mediante una tobera, esto permitió que se alcanzaran velocidades más elevadas (hasta 6 nudos). No pasó mucho tiempo (4 años) para que el simple hecho de subir la tobera por encima de la línea de flotación y

hacer que salga por la popa tuviese un impacto significativo en las velocidades efectivas resultantes, hasta el punto de llegar a alcanzar 15 nudos; a esta invención se le conoce como Quinnat, el cual consiste en una bomba centrífuga horizontal con el eje vertical y acoplada a una reductora ortogonal (Figura 1-3).

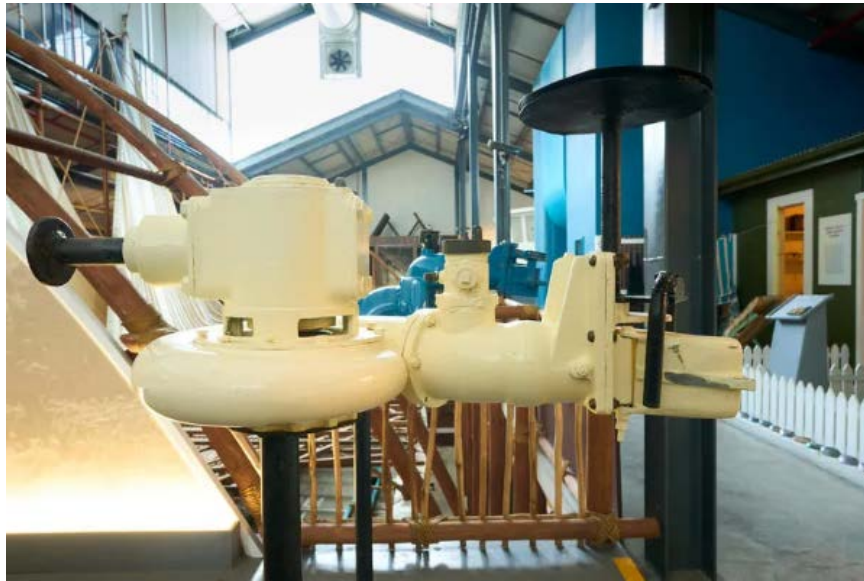


Figura 1-3 Quinnat de Hamilton (tomada de [4])

Es en este momento que el sistema waterjet empieza a tener una mayor importancia dentro del mundo naval, tanto así que, las grandes industrias del sector comenzaron a interesarse en mejorar lo inventado por Sir. Hamilton.

El waterjet está compuesto por 3 partes simples pero esenciales, si recorremos el barco de proa a popa por la parte de la quilla nos encontraremos primero por el conducto o sección de aspiración, luego estará una turbo-bomba y finalmente la tubería de impulsión. Es importante mencionar que dentro de esta subdivisión se encuentran distintos elementos encargados de proporcionar potencia al sistema completo: motor, acoplamientos, reductora, chumaceras, ejes y un sistema eléctrico. A continuación, en la Figura 1-4, se muestra gráficamente lo descrito en este párrafo.

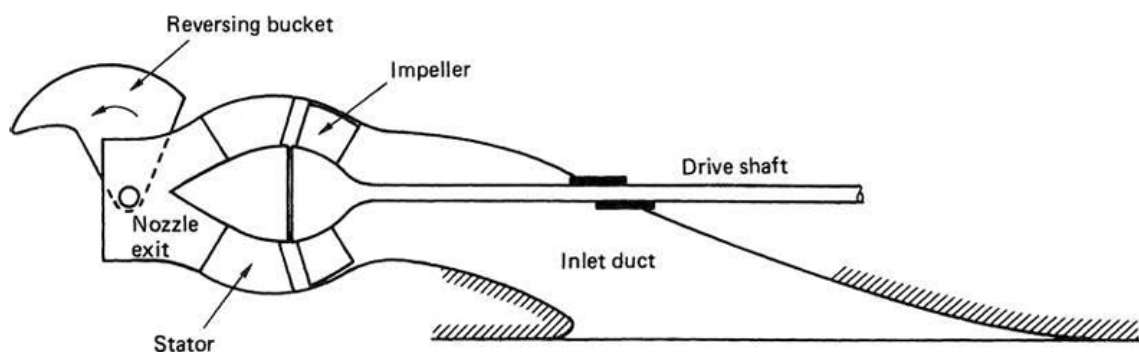


Figura 1-4 Esquema General de un propulsor Waterjet (tomada de [5])

Tomando como referencia la figura anterior, explicaremos el funcionamiento de un waterjet. Este consiste en el flujo de un chorro de agua que ingresa por la zona de aspiración, que después de haberse dotado de un aumento de energía debido al rodete de la bomba, impulsa el agua por la tobera, generando un empuje en sentido contrario a la dirección de la tobera. Aquí, se cumple básicamente, la Tercera Ley de Newton, ley de acción y reacción. El chorro de agua impulsado por la tobera ejerce una fuerza sobre el agua circundante; esta en consecuencia ejerce una fuerza reactiva sobre la embarcación, generando una fuerza de empuje que mueve la embarcación.

1.3 Motivación

El motivo de la elección de este Trabajo de Fin de Grado se basa en el interés personal por la mecánica de fluidos y el análisis dinámico de estos, así como, también por la iniciativa de aprender el uso del software CFD. Además, los propulsores waterjets son sistemas de propulsión usados en muchas embarcaciones; por lo tanto, analizar cómo se comporta el fluido y las ventajas que podamos obtener de este análisis sirven para darle un uso práctico en el trabajo de un oficial de la armada.

En las aulas, en asignaturas esenciales del grado de ingeniería mecánica, se aprenden las ecuaciones básicas de la conservación de energía para un fluido; como por ejemplo la ecuación de Bernoulli o la ecuación de Navier-Stokes para fluidos en movimiento. Ecuaciones que para casos muy simples y con muchas consideraciones, que en la vida real no se darían, resultan fáciles de resolver a mano. Sin embargo, cuando queremos analizar o diseñar un sistema ingenieril relacionado con fluidos, existen dos métodos fundamentales para su estudio: la experimentación y el cálculo computacional. La primera consta de la fabricación de modelos a escalas; por ejemplo, túneles de viento, canales hidrodinámicos u otras instalaciones; mientras que el segundo implica resolver ecuaciones diferenciales, ya sea de forma analítica o métodos de aproximación numérica. Es aquí donde entra a en consideración el software CFD (Computational Fluid Dynamics); puesto que, nos permitirá resolver todas las ecuaciones que de forma analítica no se puedan hacer. Será de especial interés comprender que parámetros le podemos dar al programa para que este nos devuelva los resultados lo más parecido a la realidad.

En la actualidad los waterjets, como ya se ha ido mencionando en párrafos anteriores, son usados en muchas aplicaciones civiles o militares. La Guardia Civil utiliza patrulleros clase Duarrry Megatech 12 cabin las cuales cuentan cuenta con 2 motores acoplados a hidrojets. El análisis CFD también es un estudio que se mantiene en vanguardia; por ejemplo, la compañía VICUSdt, empresa de ingeniería naval especializada en CFD, realizó una optimización de un sistema waterjet pequeño, desarrollado por la empresa E-sea [6].

1.4 Objetivos

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es analizar el comportamiento de un fluido en movimiento por un propulsor tipo waterjet, usando técnicas computacionales fluidodinámicas (CFD), con el fin de entender cómo la geometría influye en el comportamiento del fluido y se ve reflejado en el rendimiento y capacidades que pueda tener nuestro propulsor.

Con el fin de alcanzar nuestro objetivo descrito en el primer párrafo, se tienen que cumplir objetivos específicos, los cuales se mencionan a continuación:

- Comprender, analizar y estudiar el funcionamiento de un propulsor waterjet y el trabajo que realiza cada uno de sus componentes.
- Diseñar las partes que componen al waterjet mediante el uso de un software CAD, en este caso Autodesk Inventor.
- Generar el dominio computacional que nos permite analizar nuestro fluido de trabajo.
- Establecer nuestras condiciones de contornos y modelos físicos para la simulación.
- Realizar las simulaciones en CFD para entender el comportamiento del fluido interno.
- Analizar los resultados obtenido en valores de fuerza, energía, presión y velocidad; y si es el caso, compararlo con otros análisis similares.

1.5 Alcances y limitaciones

El presente trabajo se centra en el estudio del comportamiento del fluido interno por la sección del propulsor waterjet de una embarcación de radiocontrol. Para ello; se caracterizará un propulsor waterjet que se tiene en el laboratorio para después utilizar Ansys Fluent; de la suite de herramientas fluidodinámicas computacionales (CFD) de Workbench, que nos permitirá resolver mediante aproximaciones numéricas las ecuaciones diferenciales de Navier-Stokes. Una de las limitaciones es que se realiza el análisis hidrodinámico del sistema propulsor sólo en el modo de avance. No se considera la operación de inversión de la marcha o direccionamiento del chorro para variar el rumbo. Se estudia el propulsor en sí mismo y no el funcionamiento acoplado del propulsor con la embarcación en que va instalado.

No se contempla como alcance del proyecto un diseño completo del propulsor waterjet; puesto que, el trabajo se basa en estudiar el fluido en movimiento que pasa por el interior del hidrojet; por lo tanto, lo importante será establecer correctamente las superficies bañadas por el fluido, las condiciones y parámetros del flujo de trabajo. De manera que, los resultados deben interpretarse a partir de conservación de las ecuaciones de la mecánica de fluidos, de los vectores de velocidad y del estudio de energía mecánica en puntos clave del sistema. El cumplimiento de estos parámetros son importantes para la validación de los resultados.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Waterjet: Fundamentos

2.1.1 Generalidades

Es la forma más antigua de propulsión mecánica, su concepto data de 1661 cuando Toogood y Hays propusieron por primera vez esta forma de propulsión [5]. El sistema consiste en un impulsor o bomba situada en el interior del casco, que aspira agua del exterior y la expulsa a alta velocidad en forma de chorro hacia popa. Con lo cual, el waterjet conceptualmente es similar a una hélice, pero difiere en que en este caso la hélice está ubicada dentro del casco [7].

Las eficiencias máximas de propulsión a velocidades medias y bajas (por ejemplo, por debajo de los 30 nudos) suelen ser menores que las de las hélices convencionales. Sin embargo, debido a que el sistema no presenta apéndices externos al caso, este contribuye de forma creciente a la resistencia a altas velocidades y podrían dañarse en agua pocas profundas [7].

Existen otros sistemas de waterjets entre los que podemos encontrar: El Pump Jet, tiene el impulsor, la carcasa y los álabes guía completamente fuera del casco [8]; el Schottel Pump, tiene una bomba centrífuga montada en el fondo del casco y aspira el agua por su centro y la descarga con un ángulo determinado en su periferia [7]. Sin embargo, en este trabajo se estudiará la forma más común de waterjet, en la que el impulsor se sitúa dentro del casco y el chorro se descarga hacia popa.



Figura 2-1 Sistema de propulsión tipo Waterjet (tomada de [9])

2.1.2 Principio de Funcionamiento

Los sistemas waterjets, tienen un funcionamiento parecido al de las hélices convencionales, genera propulsión impartiendo un momento hacia atrás a una masa de fluido que rodea a la embarcación [7].

Tomando como referencia la Figura 2-2, cual muestra de manera simple e idealizada el esquema de funcionamiento de un waterjet, se observa que el agua ingresaría con una velocidad V_1 y saldría con una velocidad V_2 por un área A_2 . Por lo tanto, la variación de cantidad de movimiento en la dirección de avance a través del waterjet vendría dado por $\rho A_2 V_2 (V_2 - V_1)$; luego, como la fuerza es igual a la variación de cantidad de movimiento, el empuje producido será $T = \rho A_2 V_2 (V_2 - V_1)$. En consecuencia, la potencia del propulsor o potencia de empuje será:

$$P_T = TV_S = \dot{m} V_S (V_2 - V_1)$$

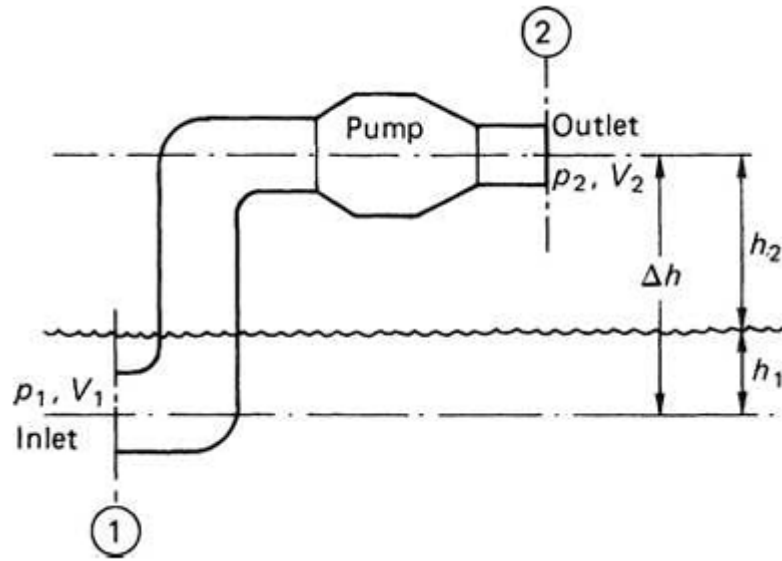


Figura 2-2 Esquema idealizado de un waterjet (tomada de [5])

Donde V_S es la velocidad de la embarcación. Ahora, la potencia transferida por la bomba hacia el agua puede ser expresada en términos de energía por unidad de tiempo como $\dot{m} g H_p$, lo que llega a concluir la siguiente expresión:

$$P_{pump} = \dot{m} \left[\frac{1}{2} (V_2^2 - V_1^2) + g(h_2 + h_{loss}) \right]$$

Con estas dos ecuaciones se puede describir de manera matemáticamente sencilla la potencia que genera un waterjet y la potencia de una bomba; si dividimos la P_{pump} partido de la P_T obtendríamos la eficiencia del waterjet; sin embargo, como se ha dicho anteriormente, estas son solo ecuaciones sencillas que ayudan a comprender el principio básico del propulsor waterjet, en los apartados siguientes se desarrollará de forma más extendida el cálculo de potencia de empuje y la eficiencia del sistema.

Finalmente, el sistema funciona básicamente cuando al girar la hélice esta hace un vacío generando una aspiración y haciendo que fluya el agua desde la toma hasta la zona de descarga; luego de aspirar, la hélice realiza las mismas funciones que la de una bomba, proporcionando energía al fluido.

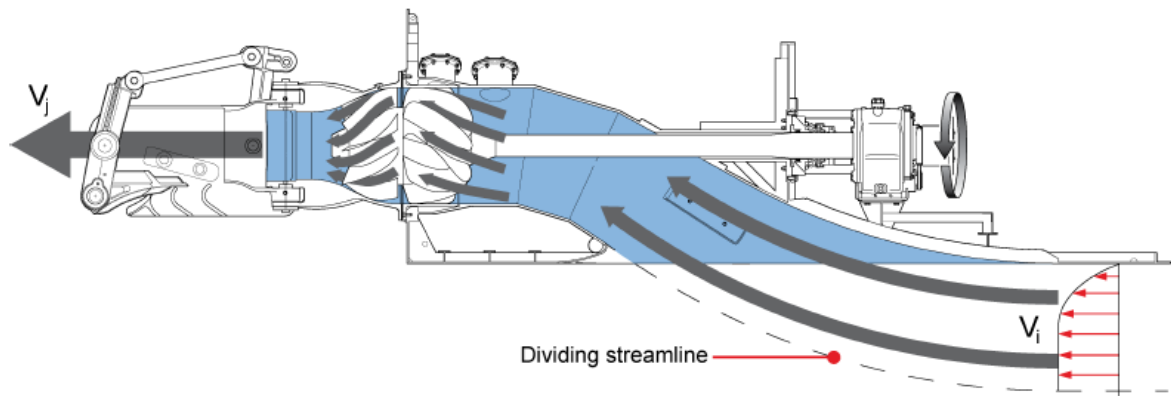


Figura 2-3 Funcionamiento básico de un Waterjet (tomada de [10])

La Figura 2-3 ilustra como el flujo de agua entra por debajo del casco hacia el conducto de entrada mediante una diferencia de presión generada por la bomba. Las líneas discontinuas (Dividing streamline) indican que parte del flujo entra por la toma y otra pasa de largo.

2.1.3 Ventajas y desventajas

Como todo sistema de propulsión, el waterjet presenta ventajas y desventajas con respecto a otros sistemas de propulsión que funcionan de forma distinta. A continuación, se enumeran las ventajas y desventajas de este sistema de propulsión basados en la referencia [7].

Principales ventajas:

- Reducción de la resistencia debido a los pocos apéndices que tiene. Esto influye significativamente en la resistencia del casco en embarcaciones rápidas. Con respecto a la propulsión convencional, los soportes de eje provocan distorsiones en el flujo que entra a la hélice, lo cual se elimina con el hidrojet.
- La maniobrabilidad se logra con un deflector.
- Existen menos daños de los elementos propulsivos bajo el agua; ya que, la hélice se encuentra dentro del caso; esto es beneficioso para operaciones en aguas pocas profundas.
- Seguridad al operar cerca de personas, animales u cualquier objeto flotante. Esto es interesante cuando se trata de operaciones de rescate, por eso las motos acuáticas lo usan.
- Se evita la cavitación en el propulsor debido a que la toma difusora provoca un aumento de presión evitando que se genera un gradiente de presión.

Aunque las ventajas sean considerables, un hidrojet también tiene desventajas, enumeradas a continuación:

- En unidades diseñadas para altas velocidades, la cavitación puede existir en la parte de la toma cuando se trabajan a bajas velocidades o durante el arranque. Estas pueden aparecer en la parte trasera y lateral de la toma, donde se diseñan esquinas pronunciadas para canalizar el flujo a altas velocidades.
- En embarcaciones de baja velocidad, la resistencia de los apéndices no es muy significativa llegando a generar una eficiencia propulsiva global inferior a la que se puede obtener con una hélice convencional.
- Pueden existir pérdidas por fricción significativas al hacer pasar el fluido por conductos extensos.

En embarcaciones de gran tamaño, donde la construcción del conducto debe integrarse con el casco a lo largo de una gran eslora, las limitaciones en la predicción geométrica de la construcción pueden afectar al rendimiento global del sistema.

2.1.4 Usos del propulsor waterjet

Los sistemas de propulsión waterjet son usados principalmente en embarcaciones que operan a altas velocidades, que requieren gran maniobrabilidad y que trabajan en aguas pocos profundas, ya que no tienen apéndices externos, otorgan un mejor control de la dirección y no hacen ruidos [11].

En el ámbito militar y de seguridad, el sistema de chorro de agua, es usado en patrulleras, unidades guardacostas o buques militares como los littoral combat ships [12], ya que ofrecen alta maniobrabilidad en operaciones de ofensiva y defensiva táctica, generan un menor firma acústica (importante en el ámbito militar) y porque se puede operar en aguas someras [11].



Figura 2-4 Vista general de un Littoral Combat Ship (tomada de [12])

También se usa el sistema waterjet en las embarcaciones de rescate y servicios, como barcos de salvamento, ambulancias marítimas y lanchas bomberos debido a que brindan seguridad porque llevan la hélice dentro del casco, permiten acercarse a zonas con poco calado y control de la nave a bajas velocidades [13]. En la Figura 2-5 se puede ver el chorro de agua en popa de la embarcación bombero.



Figura 2-5 Embarcación bombero (tomada de [13])

Otras de las aplicaciones de los sistemas de chorro de agua son en yates y embarcaciones recreativas, como los catamaranes o embarcaciones deportivas por su suavidad en la navegación y por tener un diseño compacto.

Sin embargo, el waterjet no solo se usa en embarcaciones grandes, sino que también se pueden encontrar en motos de agua porque permiten expulsar el agua a altas velocidades y darle velocidades elevadas a la moto acuática. En estos sistemas, el chorro de agua, permite maniobrar con agilidad y eliminan los riesgos de tener hélices externas, por eso se usa mucho para rescatar surfistas en competencias. El ejemplo de la moto de agua es una aplicación clásica y común del uso de waterjets [14].



Figura 2-6 Vista Lateral de una moto de agua (tomada de [15])

Finalmente, los sistemas de propulsión waterjet se usan en barcos de radiocontrol, tanto para competición como para fines recreativos, debido a que pueden navegar en aguas con poco fondo y permiten llegar a velocidades de hasta 50 km/h [16].



Figura 2-7 Barco de Radiocontrol con chorro de agua

Esta última aplicación mencionada es de importante conocimiento puesto que será el tipo de waterjet que se analizará en el presente trabajo de fin de grado.

2.2 Componentes Principales

2.2.1 Toma

Como su propio nombre lo dice, será el lugar por el cual el agua ingresará al sistema. En estos sistemas propulsivos existe una variedad de tipos de entrada; sin embargo, las dos más típicas son la entrada a ras (o flush intake) y la entrada tipo pod (o ram intake). En la Figura 2-8 sólo se observa la entrada tipo a ras.

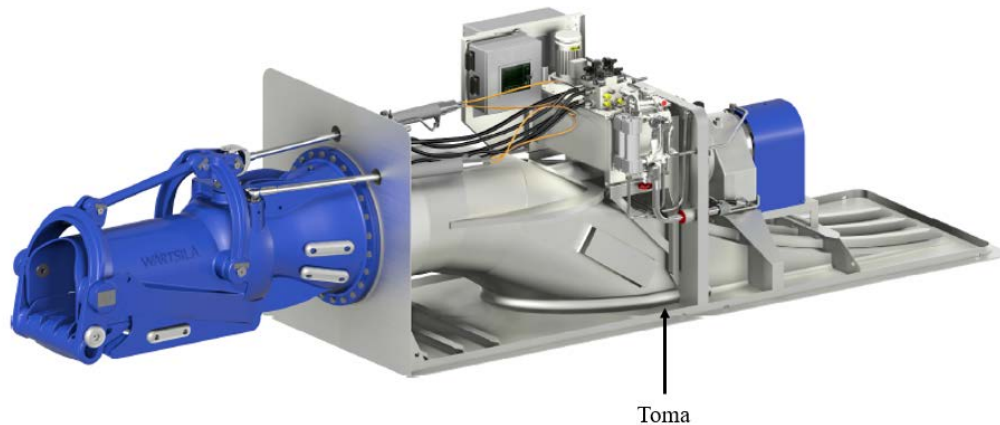


Figura 2-8 Toma tipo flush intake (tomada de [10])

Aunque la entrada tipo pod o ram intake son bastante utilizadas, el tipo de entrada usado por excelencia es la de tipo ras o flush intake, la cual tiene un abertura elíptica o rectangular en el fondo. El objetivo de la toma es conseguir una velocidad de entrada óptima y sin cavitación, pero sobre todo es que sean capaz de recuperar la mayor parte de energía posible del agua. Los bordes del ducto de entrada suelen tener cierta curvatura para evitar turbulencia en la entrada.

Las tomas suelen estar dotadas de unos filtros o rejillas de protección, la finalidad de estos es filtrar cualquier tipo de partícula que pueda entrar al sistema y proteger la hélice, esto normalmente se suele hacer con una rejilla [17]. En la Figura 2-9 se puede observar una entrada común con rejilla de un propulsor waterjet.



Figura 2-9 Rejillas en la toma de un waterjet de radiocontrol

En la anterior figura se puede apreciar la forma casi rectangular que suelen tener las entradas de los waterjets; así como también, las rejillas que sirven como filtro de partículas no deseadas dentro de nuestro ducto.

2.2.2 Impulsor

El impulsor no es más que una bomba, cuya función principal es dotar de energía al fluido. Está ubicado al final del ducto de entrada, entre la toma y el estator. Normalmente suelen ser de tipo mixtas o axiales de velocidad específica alta ya que suministran grandes caudales con moderadas alturas manométricas [17]. En la Figura 2-10 se puede observar las hélices de un impulsor del modelo Steel Waterjet S-4 de la marca de propulsores marinos Kongsberg.



Figura 2-10 Impulsor waterjet marca Kongsberg (tomada de [18])

Al iniciar el arranque del sistema y mediante su giro, la hélice generará un vacío, en cual servirá para succionar el agua por la toma de mar debido a la diferencia de presiones; de tal forma, que esa aspiración se mantenga constante mientras al mismo tiempo se acelera el flujo.

La bomba que se utilice en un propulsor hidrojet debe tener ciertas características, a continuación, se menciona dichas características (estas características han sido transcritas desde la referencia [17]):

- Diámetro exterior mínimo para un determinado tamaño de tobera.
- Bajo peso para un determinado tamaño de tobera.
- Libre cavitación a la velocidad máxima desde la entrada del fondo del casco.
- Funcional en régimen continuo con un poco de cavitación sin que refleje erosión por cavitación de las palas, el estator o la tobera.
- Materiales resistentes a la corrosión.
- Tolerancia con la distorsión del fluido cuando se combina con el ducto de entrada.
- Diseño mecánico superior de los rodamientos, sistemas de lubricación, sellado del eje, etc.

Al estar hablando de una bomba, es importante hablar de la cavitación. Aunque sea un concepto conocido para los estudiantes de ingeniería, se define la cavitación como la aparición de burbujas de vapor de agua en las palas de la bomba, esto se debe a que en las palas se crea un vacío, que puede ser por una mala configuración de los álabes, mala elección de las revoluciones o mala adecuación de la altura en la aspiración. Estas burbujas explotan cuando el vacío desaparece, generando golpes continuos sobre la superficie de la hélice que finalmente la deterioran el material. El parámetro que cuantifica dicha cavitación es el NPSH (Net Positive Suction Head) que es la altura neta positiva de aspiración (energía de presión requerida para evitar formación de burbujas de vapor).

2.2.3 Tobera

Es el elemento que se encarga de proporcionarle la energía cinética al chorro que viene de un aumento de presión proporcionado por el impulsor. Es el último elemento del sistema, normalmente sobre él va montado el deflector que permite cambiar el sentido del chorro. En la Figura 2-11 se observa un tipo común de tobera con su deflector.

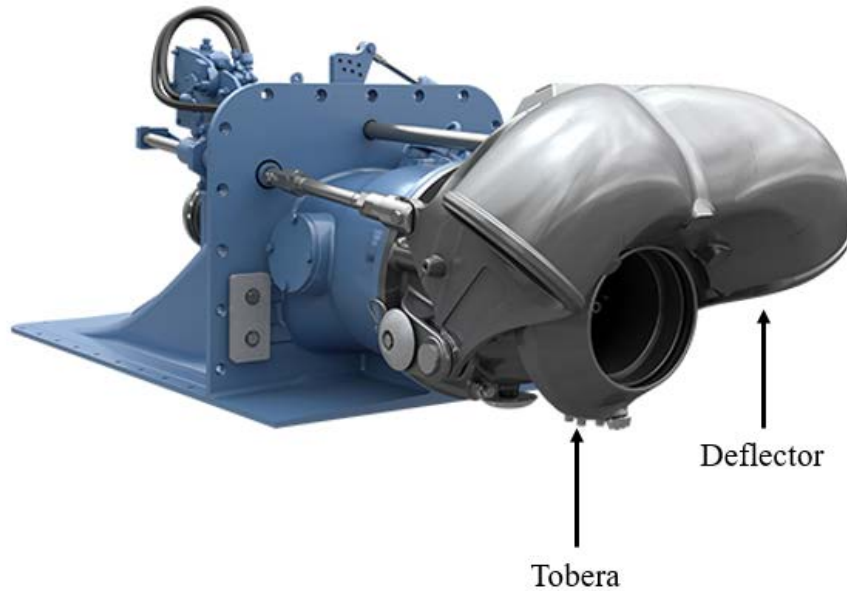


Figura 2-11 Tobera waterjet marca Rolls Royce (tomada de [19])

La entrada de la tobera, que va directamente conectada con la salida del estator, tiene un diámetro mayor que la salida, es así como transforma la energía de presión proveniente de la bomba en energía cinética ya que el caudal se mantiene constante; por lo tanto, al disminuir el diámetro la velocidad del fluido aumenta. Esta variación de la velocidad genera que haya una variación en la cantidad de movimiento, que es lo finalmente termina generando el empuje sobre la embarcación.

2.3 Predicción de Potencia y Eficiencia en Waterjets

Este apartado presenta específicamente los cálculos para la predicción de potencia, eficiencia y diseño inicial de un propulsor tipo waterjet basados en el libro *Marine Powering Prediction and Propulsors* escrito por el profesor de Hidrodinámica Marina Neil Bose [7].

2.3.1 Predicción de Potencia

Las ecuaciones definidas en los apartados anteriores para el cálculo de potencia del propulsor son ecuaciones sencillas que permiten comprender el funcionamiento de waterjet haciendo uso de los conocimientos sobre bombas y de la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento referida a un volumen de control. Sin embargo, el ITTC (International Towing Tank Conference) estableció un grupo de waterjets que propuso el denominado “método posible de predicción de potencia para sistemas waterjet” [20], basado en la consideración de los flujos de energía y momento a través del propulsor. Este método suele denominarse como “método de flujo de momento” (momentum flux method).

El método no es fácil de aplicar en ensayos con modelos ya que cuenta con un gran número de medidas detalladas de velocidad y presión. Por lo contrario, brinda una base común que permite comparar resultados y rendimientos obtenidos mediante ensayos y estudios realizados en distintas instalaciones y por distintos equipos.

El método del flujo de momento define estaciones, las posiciones de estas estaciones se verán en la Figura 2-12 y se mostrará de forma ordenada los niveles de flujo de energía a medida que el fluido atraviesa el waterjet.

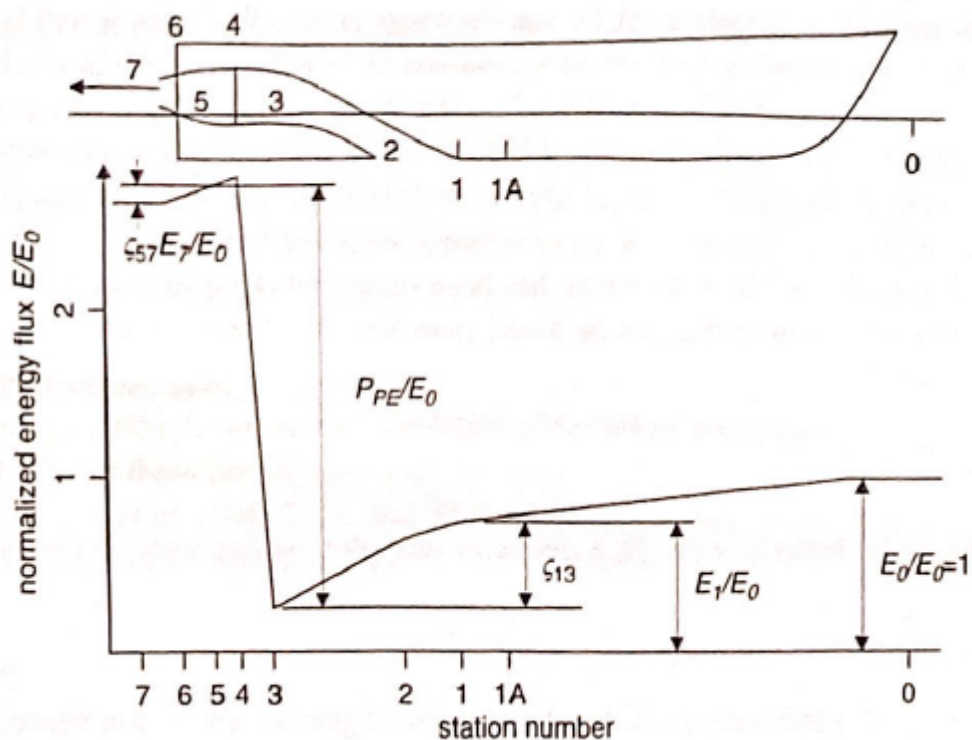


Figura 2-12 Niveles de flujo de energía normalizado y posición de estaciones (tomada de [7])

Con respecto a la embarcación, E_0 (vatios) es la energía cinética del flujo libre por unidad de tiempo; es decir, el flujo de energía. De forma análoga, E_i es el flujo total de energía (cinética más presión a la misma altura potencial) en cualquier estación i . Ambas energías dependen directamente de la velocidad de la embarcación, la densidad del agua y el caudal volumétrico a través del chorro.

Las definiciones de las estaciones se establecen en la Tabla 2-1.

Número de Estación	Localización
0	Flujo sin perturbaciones delante de una corriente libre de vehículos
1A	Ancho de entrada por delante del punto de tangencia en el extremo delantero de la entrada
1	Punto de tangencia en el extremo delantero de la entrada
2	Normal al flujo interno en el labio trasero de la admisión
3	Justo delante de la bomba – cara de la bomba
4	Entre la bomba y el estator – punto interno a la bomba
5	Detrás del estator – salida de la bomba
6	En el plano de salida de la boquilla
7	Punto detrás de la boquilla donde el coeficiente de presión estática en el chorro es cero – vena contracta

Tabla 2-1 Definiciones de las estaciones por puntos a través del waterjet (tomada de [7])

La energía del flujo decrece a medida que entra en la capa límite del recipiente de tal manera que en una ubicación delante del chorro, sugerida de ser tomada un ancho de entrada por delante del punto de tangencia del extremo delantero de la entrada del chorro [21], el valor de la energía del flujo se puede encontrar partiendo de la integración de mediciones de velocidad local y presión estática sobre la extensión del tubo de corriente que entrar en el chorro. A esta estación se la denominó 1A, aunque en el presente desarrollo se le llamará estación 1.

El tubo de corriente se suele asumir de sección rectangular o elíptica, adoptándose un ancho supuesto; ya que, se ha comprobado que los errores tanto en el ancho como en la forma tienen una pequeña influencia sobre la potencia pre calculada. Por ejemplo, un error del 20% en el ancho de una sección rectangular produce solo un error del 1% en la potencia, para profundizar más estas variaciones ver la referencia.

En consecuencia, la potencia efectiva del sistema de chorro P_{JSE} podrá determinarse a partir de la tasa de incremento de energía (flujo de energía) entre las secciones 1 y 7.

$$P_{JSE} = E_7 - E_1$$

La potencia efectiva de la bomba P_{PE} , viene dada por:

$$P_{PE} = \rho g Q_j H_{35}$$

Donde H_{35} es el incremento total de carga a través de la bomba. La potencia en el eje del chorro suministrada al elemento de la bomba es:

$$P_D = \frac{P_{PE}}{\eta_p \eta_{inst}}$$

Donde η_p es la eficiencia del elemento de la bomba y η_{inst} es la eficiencia de instalación del waterjet. La tasa de variación del momento axial o el flujo de cantidad de movimiento, a lo largo del sistema es:

$$\Delta M = M_7 \cos \alpha - M_1$$

Donde α es el ángulo entre la línea central del chorro y la horizontal. En la ecuación antes mostrada M_1 es la componente axial del momento debido a la velocidad en la estación 1; lo mismo para M_7 . Finalmente, tomando ΔM como el empuje, la eficiencia propulsiva puede ser expresada como:

$$\eta_t = \frac{\text{Effective power}}{\text{Delivered power}} = \frac{P_E}{P_D} = \frac{\Delta MV}{P_{PE}} \eta_P \eta_{inst}$$

Esta ecuación define la eficiencia de nuestro propulsor, según el método de flujo de momento. Sin embargo, para el diseño inicial de un waterjet se pueden realizar algunas simplificaciones con respecto a las ecuaciones vistas ya que existen ciertos factores que tienen menos influencia que otros en la predicción del rendimiento de potencia; estas simplificaciones se verán en el siguiente subapartado.

2.3.2 Diseño Inicial y Simplificaciones

Para el diseño inicial de un waterjet, como se mencionó en el subapartado anterior, resulta importante hacer consideraciones ya que al inicio no se tiene información suficiente; además, estas consideraciones o simplificaciones permiten obtener una mejor comprensión del funcionamiento de la unidad propulsora.

Los factores que pueden aproximarse o despreciarse en la etapa inicial de diseño se ven reflejadas en la Tabla 2-2.

Factores Despreciables

Distribución de velocidades en la estación 1
Pérdidas en la salida o la eficiencia de la tobera
Eficiencia de instalación
Altura del chorro sobre la superficie libre
Ángulo del chorro respecto a la horizontal
Rotación del flujo
Distribución de velocidades en el chorro

Tabla 2-2 Factores a considerarse despreciables

Estas consideraciones tendrán un efecto sobre la predicción de la potencia, pero ayudarán a calcularla en una etapa inicial cuando no se tienen suficientes datos.

La eficiencia de toma η_i , puede ser definida como

$$\eta_i = \frac{E_3}{E_1}$$

Esto está relacionado directamente como el facto de pérdidas en la entrada, y debido a nuestras simplificaciones generará una potencia efectiva de la bomba igual a:

$$P_{PE} = \frac{1}{2} \rho Q_J \{V_J^2 - \eta_i V^2\}$$

En consecuencia, de nuevo con nuestras simplificaciones, obtendríamos una eficiencia propulsiva de la siguiente forma:

$$\eta_t = \frac{2\eta_P \left(\left(\frac{V_J}{V} \right) - 1 \right)}{\left(\frac{V_J}{V} \right)^2 - \eta_i}$$

Los valores obtenidos en esta ecuación, para una eficiencia del elemento de bomba de 0,85 y diferentes valores de eficiencia de entrada, se ven reflejados en la Figura 2-13. Todas las curvas presentan eficiencia nula para una relación de velocidades del chorro $\frac{V_j}{V} = 1$. Para valores prácticos de eficiencia de entrada inferiores a 1, aparece un valor máximo de eficiencia propulsiva para una relación de velocidades del chorro superior a 1. Por otro lado, a relaciones bajas de velocidad del chorro; por ejemplo, menos de 1,4; la eficiencia propulsiva es muy sensible con la de entrada y menos sensible a relaciones elevadas.

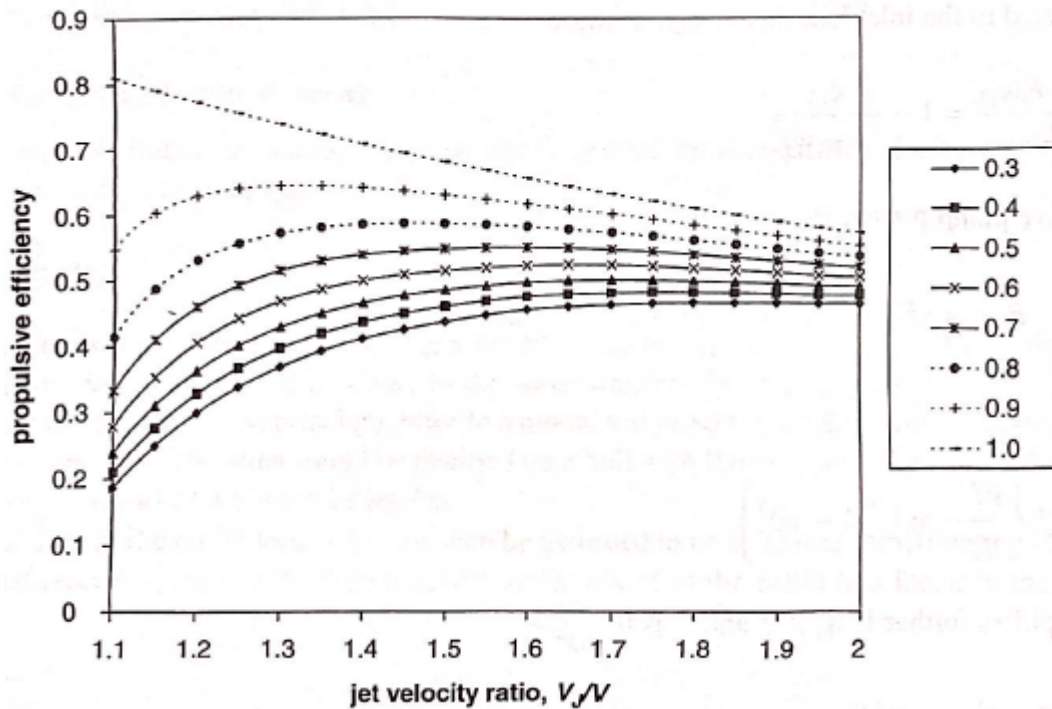


Figura 2-13 Eficiencia propulsiva vs relación de velocidades del chorro V_j/V (tomada de [7])

Donde V_j se define como la velocidad media a través del impulsor y V como la velocidad en la entrada de la toma. Las curvas se han trazado para una eficiencia del elemento de bomba $\eta_p = 0,85$ y para distintos valores de eficiencia de entrada que se indican en la leyenda a la derecha de la figura.

2.4 Fundamentos de hélices navales

El apartado anterior enfoca un análisis detallado acerca del cálculo de potencia y rendimiento específicamente para los sistemas de propulsión tipo waterjet. En el presente apartado se trata acerca de los coeficientes adimensionales y curvas de rendimientos de hélices navales convencionales; este apartado es importante puesto que el sistema de propulsión waterjet lleva un impulsor dentro de su configuración; por lo tanto, es importante estudiar su comportamiento como una hélice.

2.4.1 Coeficientes adimensionales

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores, el waterjet funciona como cualquier otro impulsor; con la única diferencia que, en nuestro caso, la hélice va situada dentro del casco [3]. Por ello para el análisis de la hélice se tendrá que usar las mismas características de rendimiento de una hélice.

Para estudiar el comportamiento de una hélice de forma general y permitir la comparación entre diferentes tamaños (análisis a escala), regímenes de operación y condiciones de flujo, se emplean coeficientes adimensionales, que nos permitirán describir el rendimiento hidrodinámico de las hélices independientemente de sus dimensiones, siendo muy utilizados tanto en ensayos experimentales a escala

como en simulaciones numéricas (como los estudios computarizados de fluidos en movimiento). Las fuerzas y momentos producidos por una hélice son expresados en función de dichos números adimensionales [5].

Estos números, han sido introducidos en relación con el diámetro d , el ratio de revolución n y la densidad de masa de agua ρ [22]. Uno de los parámetros fundamentales es el de coeficiente de avance, que viene definido como:

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

Donde V es la velocidad del fluido, para un paso de hélice determinado, el coeficiente de avance expresa el ángulo del flujo de agua entrante con respecto a las palas de la hélice. Para una hélice y un paso dado, saber el coeficiente de avance es suficiente para determinar el empuje, el par y la eficiencia de la hélice en cualquier condición [22]. Partiendo de lo anterior, se define el coeficiente de empuje como:

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 d^4}$$

Donde T es la fuerza de empuje, es común encontrarlo en otras fuentes como C_T . Este coeficiente nos permite evaluar la capacidad de la hélice para generar empuje en función de su tamaño y velocidad de giro.

Continuando con los números adimensionales, definimos el coeficiente de torque como:

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 d^5}$$

Donde Q ($Q = P/(2\pi n)$) es el par transmitido por la hélice, este número adimensional esté relacionado directamente con la potencia requerida por el sistema de propulsión; con lo cual, resulta fundamental para evaluar la eficiencia energética del conjunto motor-hélice.

Con estos parámetros, resulta conveniente expresar la eficiencia de la hélice en función del número de avance J , así como del coeficiente de empuje y par no dimensional. Por lo tanto, se define la eficiencia de la hélice como:

$$\eta = \frac{K_T J}{K_Q 2\pi}$$

Dependiendo de la carga y el diseño de la hélice, se suele alcanzar una eficiencia entre 0,55 y 0,70.

Como se observan en los coeficientes adimensionales anteriores, estos guardan relación entre ellos, y esto permite la obtención de las denominadas curvas de rendimiento (las cuales serán desarrolladas con más énfasis en el siguiente apartado) que permiten identificar el rango de operaciones óptimo de la hélice y evaluar su comportamiento en distintos puntos de funcionamiento.

2.4.2 Curvas de Rendimiento

Las curvas de rendimiento son una herramienta fundamental para la caracterización hidrodinámica de hélices marinas, ya que permiten describir su comportamiento de trabajo.

Estas curvas representan la variación del coeficiente de empuje (K_T), el coeficiente de par (K_Q) y el rendimiento propulsivo (η) en función del coeficiente de avance (J), proporcionando una imagen general del comportamiento de la hélice.

En la Figura 2-14, se muestra el diagrama típico en aguas abiertas para un conjunto de hélices de paso fijo que trabajan en un entorno sin cavitación con un coeficiente de avance positivo. El diagrama es general en el sentido de que, sujeto a efectos de escala, es aplicable a cualquier hélice con la misma forma geométrica que aquella para la que se derivaron las curvas características, pero la hélice en cuestión puede tener un diámetro o una relación de escala diferente y puede funcionar en cualquier otro fluido, sujeto a ciertos efectos del número de Reynolds [5].

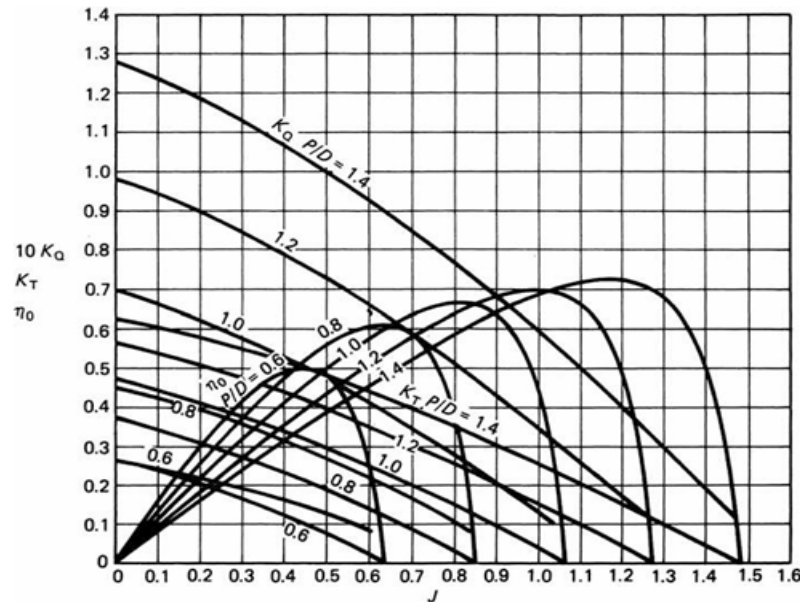


Figura 2-14 Curvas de Rendimiento de aguas abiertas (tomada de [5])

Como se observa en la figura anterior las curvas están directamente relacionadas con los coeficientes adimensionales mencionados en el subapartado anterior. Cabe mencionar que para el uso de estas curvas se debe realizar la relación paso-diámetro, que exclusivamente para la Figura 2-14 está referida como P/D .

2.5 Dinámica de Fluidos Computacional

2.5.1 Introducción a CFD

Existen dos formas fundamentales para diseñar y estudiar los sistemas de ingeniería que involucren flujos en movimiento: la experimentación y el cálculo. El primero por lo general conlleva a la creación de modelos a escala para la simulación de distintos eventos, un ejemplo claro de ello son los túneles de viento; mientras que el segundo implica resolver ecuaciones diferenciales ya sea de forma analítica (que por lo general son muy complicadas de resolver) o computacional [23].

La dinámica de fluidos computacional o CFD (Computational Fluid Dynamics) es el análisis de sistemas que presentan fluidos en movimiento, transferencia de calor y fenómenos asociados como las reacciones químicas. Esta técnica es muy potente y comprende una amplia gama de procesos industriales y no industriales. A continuación, se muestran algunos ejemplos de áreas de aplicación [24]:

- Aerodinámica de aeronaves y vehículos: sustentación y resistencia.
- Hidrodinámica de barcos.
- Plantas de Propulsión: combustión en sistema de combustión interna y turbinas de gas.
- Turbomaquinaria: flujo dentro sistemas rotatorios.
- Ingeniería marina: cargas en estructuras marinas.
- Hidrología y oceanografía: flujos en ríos, estuarios, océanos.

Las ecuaciones de movimiento que se pueden resolver mediante CFD para el caso de un flujo estacionario, incompresible, laminar de un fluido newtoniano con propiedades constantes y sin efectos de superficies libre son las ecuaciones de continuidad y las de cantidad de movimiento en los 3 ejes cartesianos.

2.5.2 Procedimiento de solución

Con el fin de resolver de manera numérica las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento, se tienen que seguir los siguientes pasos, este orden es intercambiable [23]:

1. Se selecciona un dominio computacional y se genera una malla o red de nodos; este dominio se divide en varios elementos pequeños llamados celdas. Para dominios de dos dimensiones (2-D), las celdas son áreas, mientras que para dominios tridimensionales (3-D) las celdas son volúmenes, que estarán compuestos por tetraedros, hexaedros, pirámides [25]. En la Figura 2-15 se muestran algunos tipos.

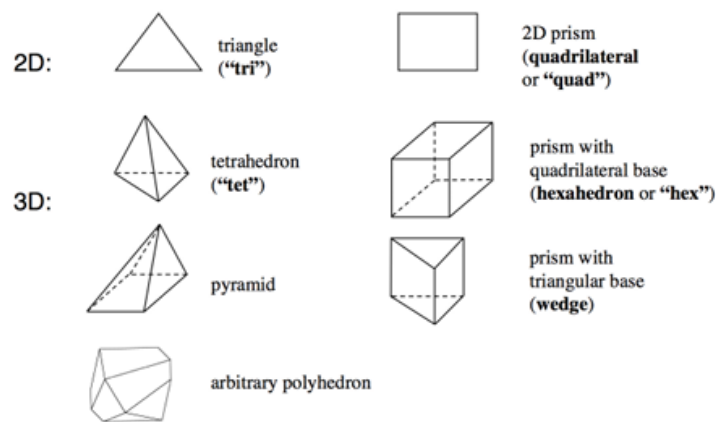


Figura 2-15 Tipos de celdas que componen una malla (tomada de [26])

2. Las condiciones de frontera se especifican en cada cara del dominio computacional.
3. Se especifica el tipo de fluido (agua, aire, entre otros), junto con las propiedades del fluido. La mayoría de los paquetes CFD ya tiene integrada una base de datos con los fluidos más comunes.
4. Se seleccionan los parámetros numéricos y los algoritmos de solución.
5. Los valores de primera aproximación para las variables de campo de flujo se especifican para cada celda; estas son condiciones iniciales, que podrías ser correctas o no, pero son un punto de partida para el proceso de iteración.
6. Al empezar con los valores de la primera aproximación, las formas discretizadas de las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento se resuelven por iteración, por lo general en el centro de cada celda. Muchas veces se repiten cientos o miles de soluciones para que la solución converja.
7. Cuando converge la solución, las variables de campo de flujo como la velocidad y la presión se trazan y analizan de manera gráfica.
8. Las propiedades globales del campo de flujo, como la caída de presión y las propiedades integrales, como las fuerzas y los torques que actúan sobre un cuerpo, se calculan a partir de la solución que se obtiene de la convergencia.

Este es el orden intercambiable (especialmente del 2 al 5) que se sigue para un análisis CFD.

2.6 Ecuaciones de Gobierno

En el apartado anterior se describió de manera clara y sencilla cómo es que trabaja un software de análisis de fluidos; sin embargo, no se explicó que resuelven estos programas. En los siguientes subapartados se explicarán las principales ecuaciones de la mecánica de fluidos, las cuales gobiernan el comportamiento de un fluido.

2.6.1 Continuidad

La conservación de la masa (continuidad) es uno de los principios más fundamentales de la naturaleza. Para el caso de un sistema cerrado que pasa por un cambio se expresa que $m_{sist} = constante$ o $dm_{sist}/dt = 0$; es decir que la masa del sistema permanece constante durante un proceso [23]. Para nuestro caso de estudio, un volumen de control (VC), la transferencia neta de masa hacia dentro un volumen de control, o hacia fuera de éste, durante un intervalo Δt , es igual al cambio neto (aumento o disminución) en la masa total que está dentro de ese volumen en el transcurso de Δt [23]; es decir, y expresado en tasas:

$$\dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sal} = dm_{VC}/dt$$

2.6.2 Conservación cantidad de movimiento

El momento lineal o cantidad de movimiento se define como el producto de la masa m y la velocidad de un cuerpo $\vec{V}$; es decir, $m\vec{V}$; por lo tanto, la segunda ley de Newton se puede enunciar que la razón de cambio de la cantidad de movimiento de un cuerpo es igual a la fuerza neta que actúa sobre él [23]. En consecuencia, en la mecánica de fluidos se hará referencia a la ecuación de cantidad de movimiento lineal como la segunda Ley de Newton.

De la segunda Ley de Newton se puede deducir que la suma de todas las fuerzas externas que actúan sobre un sistema es igual a la razón de cambio respecto al tiempo de la cantidad de movimiento lineal de ese sistema [23]. Por lo tanto, de forma general, la ecuación de la cantidad de movimiento lineal que se aplica a los volúmenes de control fijos, en movimiento o en deformación, es:

$$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt} \int_{VC} \rho \vec{V} dV + \int_{SC} \rho \vec{V} (\vec{V}_r \cdot \vec{n}) dA$$

Donde $\vec{V}_r$ es la velocidad relativa entendida como la diferencia entre la velocidad del fluido menos la velocidad del contorno del volumen de control. De la ecuación se interpreta que la suma de todas las fuerzas externas que actúan sobre un VC es igual a la razón de cambio respecto al tiempo de la cantidad de movimiento lineal del contenido del VC más el flujo neto del momento lineal hacia fuera de la superficie de control por el flujo de masa; es decir, que las fuerzas externas que actúan sobre el volumen de control es igual a la variación temporal del momento dentro del volumen de control más el flujo neto de cantidad de movimiento que entra y sale del sistema.

2.6.3 Ecuación de Navier-Stokes

En este subapartado se describe la ecuación diferencial de la segunda Ley de Newton (ecuación de Navier-Stokes) para el caso de fluidos de movimiento. Esta ecuación se aplica a cada punto en el campo de flujo y por ende permiten resolver los detalles de flujo en todas partes del dominio [23].

La ecuación de Navier-Stokes nace con el fin de escribir las componentes del tensor de esfuerzo en términos del campo de velocidad y del campo de presión, la ecuación describe un grupo de ecuaciones que son conocidas como ecuaciones constitutivas y permiten resolver las incógnitas del tensor de tensiones [23].

Esta ecuación tiene una deducción muy larga; sin embargo, para los fines de este trabajo solo se presentará la ecuación ya desarrollada y en coordenadas cartesianas. A continuación, se muestra la ecuación de Navier-Stokes para flujo isotérmico incompresible y viscosidad constante:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \rho\vec{g} + \mu\nabla^2\vec{V}$$

La ecuación anterior se muestra de forma vectorial que es válida en cualquier sistema de coordenadas ortogonales. La ecuación recibe el nombre en honor al ingeniero Louis Marie Henri Navier y al matemático inglés sir George Gabriel Stokes, quienes desarrollaron los términos viscosos, aunque lo hicieron de forma independiente.

Esta ecuación diferencial parcial de segundo orden, no lineal y no estacionaria es la base de la mecánica de fluidos [23]. La ecuación es muy complicada de resolver analíticamente, es por eso que se utilizan medios computacionales para resolverla.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Caracterización con Autodesk Inventor

3.1.1 CAD de Piezas

Con el objetivo de realizar el análisis del comportamiento del fluido, se tomó como modelo un propulsor waterjet para barcos de radiocontrol el cual se compró para el laboratorio de diseño para fines de estudio. Ver Anexo IV: Descripción técnica del propulsor MSQ 50 mm 7075 2 palas. Se utilizó un pie de rey para tomar las medidas de las distintas piezas y mediante el uso del programa Autodesk Inventor se caracterizaron las distintas piezas.



Figura 3-1 Propulsor waterjet MSQ 50 mm 7075 2 palas

Se desmontó el propulsor y se hizo la separación de todas las piezas; entre las cuales podemos encontrar: un deflector, una tobera, un estator, un cuerpo principal (que incluye la zona de aspiración y cavidad de la hélice), y una hélice. Estas dos últimas piezas además de caracterizarse en Autodesk Inventor, se escanearon para poder comprobar su geometría; esto será explicado en el apartado 3.1.2. A continuación, se mostrará mediante figuras las piezas del waterjet y sus respectivas caracterizaciones.

Deflector:



Figura 3-2 Deflector

Durante la caracterización de la pieza, la ubicación de los orificios de las uniones no se mantuvo coincidentes con respecto a la de la pieza; se ubicaron dichos orificios en otras partes de la pieza; sin embargo, esto no alteró la funcionalidad del sistema, ni mucho menos el análisis fluido dinámico.

Tobera:



Figura 3-3 Tobera

La toma de medidas de esta pieza resultó sencilla debido a que todas las secciones eran circulares y concéntricas. Si bien se hizo el corte en la parte inferior de la tobera para mantener la similitud con la pieza real, dicho corte podrá no ser considerado en el análisis ya que esa zona se tomará como una superficie cilíndrica completa.

Estator:



Figura 3-4 Estator

En la caracterización del estator no se consideró el diseño de las entradas de refrigeración que se pueden observar en la pieza real puesto que no influiría en el estudio del comportamiento del flujo cuando pasase por dicha sección.

Cuerpo Principal:

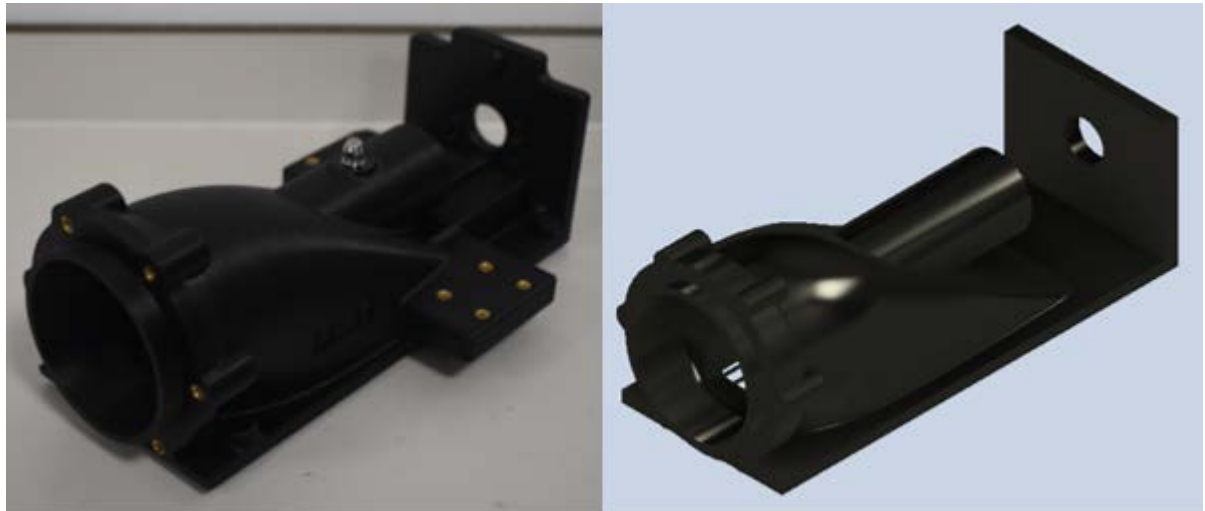


Figura 3-5 Cuerpo Principal

Esta fue pieza importante de caracterizar ya que sería la que se fijaría en el ensamblaje y nos serviría como origen inicio para futuros estudios (como el establecer como origen el centro de la misma). Es por ello que en el apartado posterior se cuenta el escaneo que se le hizo con el objetivo de tener la geometría y las medidas lo más parecida posible.

Hélice:

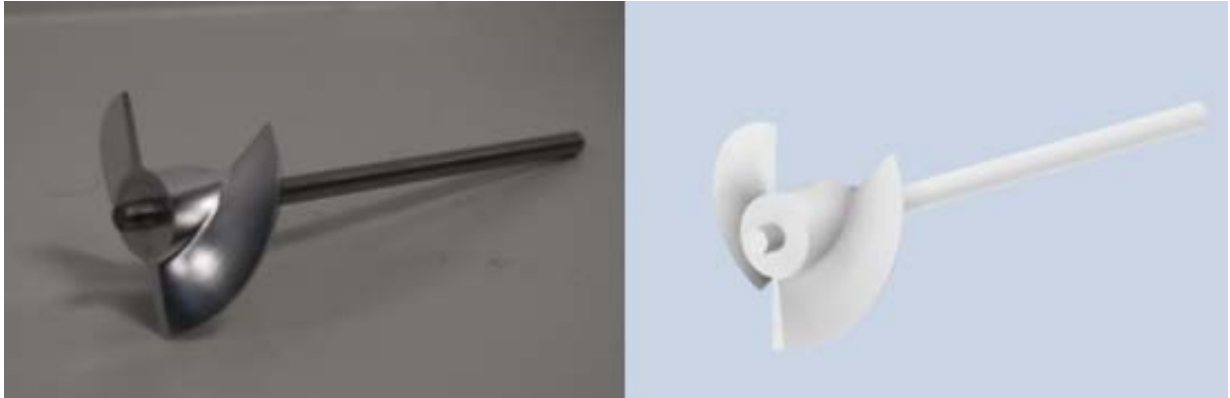


Figura 3-6 Hélice

La caracterización de esta pieza fue importante porque se tuvo que mantener el paso y el diámetro ya que su diseño influiría en el comportamiento del fluido y por ende en los resultados. Es uno de los motivos por el cual se explicó los coeficientes adimensionales utilizados en las hélices, ya que influye mucho su diseño. Además, será nuestro elemento en rotación cuando se analice con CFD.

3.1.2 Comprobación CAD mediante escáner 3D y Ensamblaje

Durante la caracterización, la hélice y el cuerpo principal fueron componentes de geometría compleja; con lo que, se hacía complicado tomar las medidas de sus dimensiones. Por lo tanto, aparte del uso del pie de rey para la toma de ciertas medidas, se escaneó la hélice y el cuerpo principal para usarlo como referencia y poder crear una nube de puntos y tener puntos de partida para curvas complejas.

Este concepto se conoce como ingeniería inversa y se usa para ver cómo es que funciona un objeto, con la intención de mejorarlo o duplicarlo [27]. Los objetivos de la ingeniería inversa son conseguir la mayor información técnica de un objeto, en conclusión, se trata de un proceso de aprendizaje hacia atrás [28]. El escaneo de piezas para obtener medidas o formas de geometría es un tipo de ingeniería inversa, y ha sido utilizado en Trabajos de Fin de Grado para los mismos fines. Se utilizó el escáner Artec Space Spider, debido a que ya se ha sido utilizado en Trabajos de Fin de Grados y ha dado resultados satisfactorios, este programa procesa los datos que envía el escáner y genera los modelos de las piezas mediante algoritmos de digitalización [29].

Durante los primeros escaneos, se observó que las partes metálicas de los objetos no se podían escanear correctamente debido a la reflectividad del material, para ello se buscó en la página oficial de Artec Studio y recomendaban utilizar un spray para opacar la superficie brillante. Se buscó en internet y en la página de Artec Studio el spray recomendable para el escaneó; finalmente, se utilizó el spray AESUB Blue ya que tiene grandes aportes para la mejora de escaneo en piezas reflectantes y cavidades profundas y además porque es evaporable [30]. En la Figura 3-7 y la Figura 3-8, se puede observar las partes de los elementos bañados con el spray.



Figura 3-7 Hélice bañada con spray AESUB



Figura 3-8 Cuerpo principal bañado con spray AESUB

Como se observan en las dos figuras previas, se rociaron con spray las partes metálicas y con mayor complejidad de diseño; por ejemplo, en el caso de la hélice solo fue necesario bañar la parte de los álabes porque el eje tenía un diámetro fácil de medir, y en el caso del cuerpo principal se priorizó el eje interno y las rejillas.

Cuerpo Principal:

Se creó un ensamblaje, del cual primero se obtuvo la curva que seguía el cuerpo principal; se observa en la Figura 3-9 la línea de color lila, esa línea se usó para hacer una elevación y obtener el interior y exterior del cuerpo. Posteriormente; en dicho ensamblaje se insertaron el escáner del cuerpo principal y el diseño hecho previamente en Inventor. En la Figura 3-9 se observan las dos geometrías cargadas.

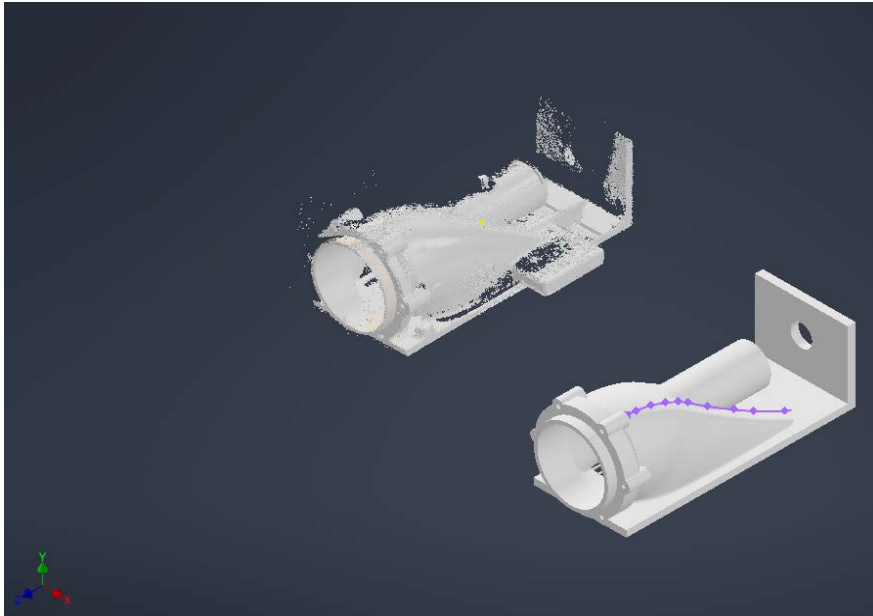


Figura 3-9 Ensamblaje de comparación del cuerpo principal

Posteriormente, se hicieron coincidir los centros y el plano inferior de ambas figuras, con el fin de buscar la unión de ambas piezas.

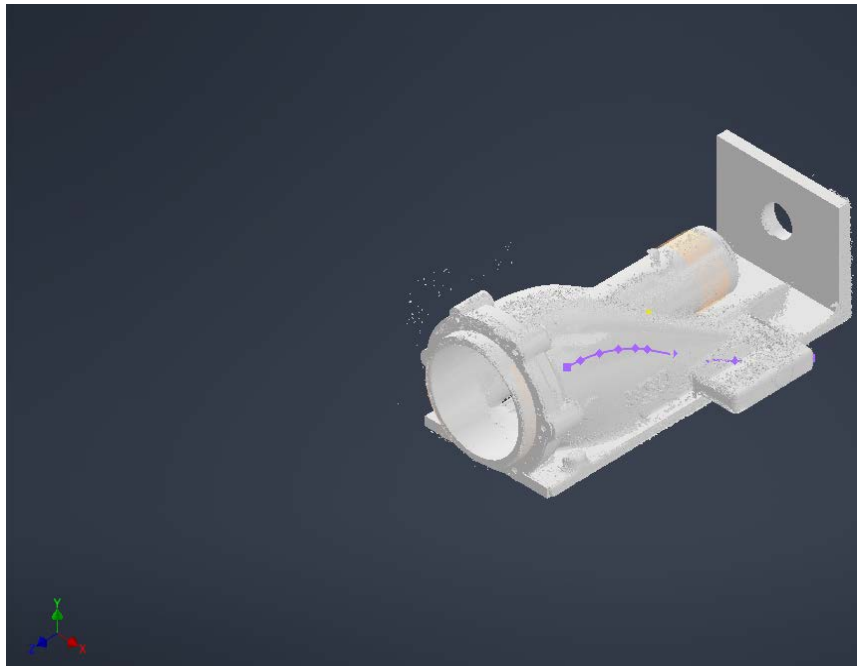


Figura 3-10 Comparación de la caracterización del cuerpo principal

Finalmente, como se observa en la Figura 3-10, podemos concluir que la caracterización que se hizo, se acerca bastante al modelo que se tiene.

Hélice:

Se realizó el mismo procedimiento con la hélice, se creó un ensamblaje, en el cual se insertaron el escáner de la hélice y el CAD creado. En la Figura 3-11 se pueden observar ambos elementos.



Figura 3-11 Ensamblaje de comparación de la hélice

Posteriormente se hicieron coincidir centros, con el fin de corroborar que la hélice caracterizada tenía las mismas dimensiones y el mismo paso que la hélice del waterjet del laboratorio. La coincidencia se observa en la Figura 3-12.

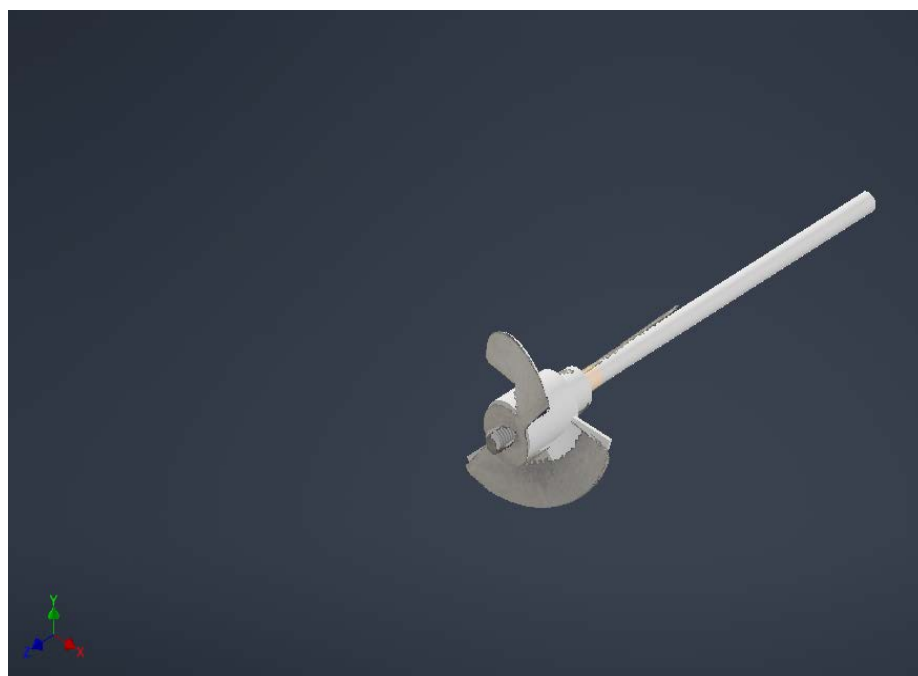


Figura 3-12 Comparación de la caracterización de la hélice

Finalmente, con esta última comparación se pudo dar la validez de la geometría de hélice caracterizada.

Después de haber caracterizado todas las piezas y comprobado su geometría, se realizó el ensamblaje de todas ellas. Con el ensamblaje, se finaliza la etapa de obtener el sólido. Posteriormente, a partir de él se obtendrá la superficie interior que se convertirá en nuestro fluido de análisis en Ansys Fluent. Se observa en la Figura 3-13 el ensamblaje final de la caracterización.

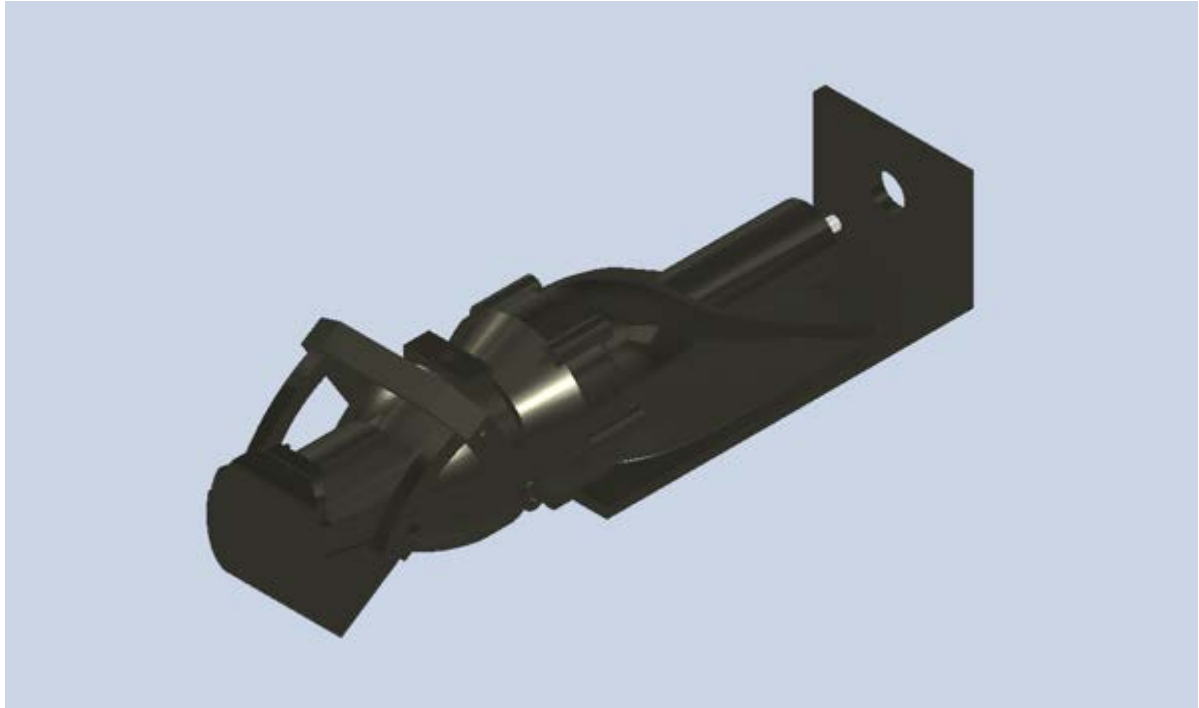


Figura 3-13 Ensamblaje final waterjet

La etapa de diseño es una etapa importante puesto que como se ha dicho en el párrafo anterior, nos permitirá obtener la superficie interna por el cual pasará el flujo. Es importante tener esta superficie interna porque será la que encierre nuestro volumen de trabajo; por tal motivo, se hará una limpieza de la geometría que consistirá, básicamente, en la obtención de dicha superficie interna. En el siguiente apartado se explicará este proceso.

3.1.3 Limpieza de la geometría

Para la limpieza de la geometría, se realizó un nuevo ensamblaje. Este ensamblaje solo incluye las partes por el cual el fluido pasa; es decir, solo nos quedamos con el cuerpo principal, el estator, la tobera y la hélice. Nos quedamos con estas partes porque sus superficies estarán mojadas por fluido durante todo el proceso; por lo tanto, son objeto de interés para el análisis.

Debido a que la hélice se encuentra en rotación, se diseñó un elemento más; este es una especie de “cono truncado” que envolverá la hélice. La función de este “cono truncado” se explicará y entenderá mejor en el apartado de análisis CFD, pero básicamente será el dominio que se haga rotar en la simulación. En la Figura 3-14 se observa la pieza creada y en la Figura 3-15 se observa la pieza creada con la hélice en su interior.

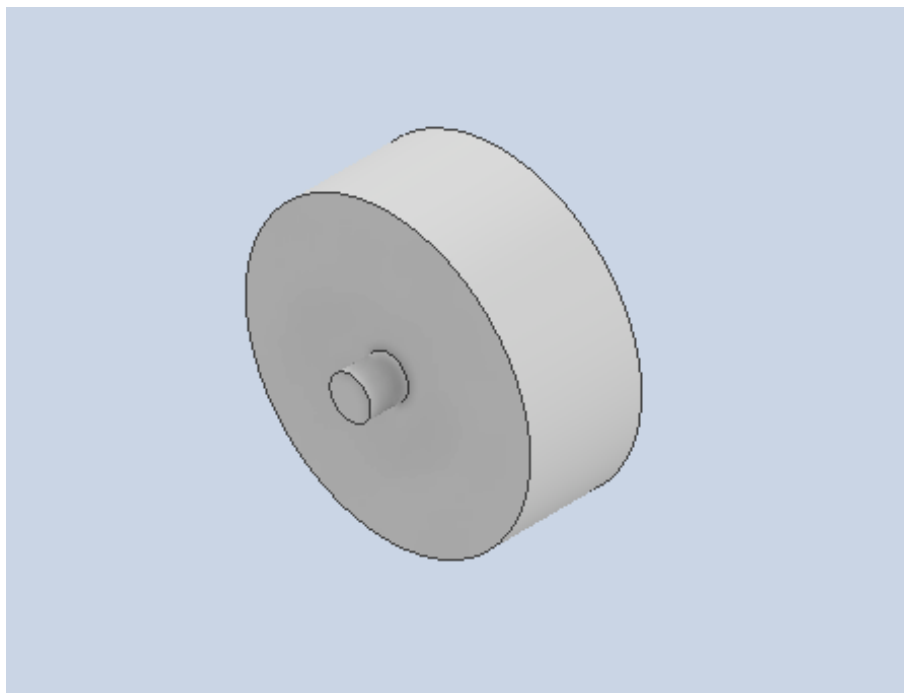


Figura 3-14 “Cono truncado”



Figura 3-15 “Cono truncado” con hélice en su interior

Como se observa en las figuras anteriores, la forma del “cono truncado” es tal que pueda envolver a la hélice y para las dimensiones se tomó como referencia las dimensiones de la hélice.

Después de la creación de dicha pieza, se procede al ensamblaje de todos los elementos bañados por fluido, incluido el “cono truncado”. En la Figura 3-16 se observa en ensamblaje final y en la Figura 3-17 se puede observar un corte transversal de dicho ensamblaje, donde se puede ver el “cono truncado”.

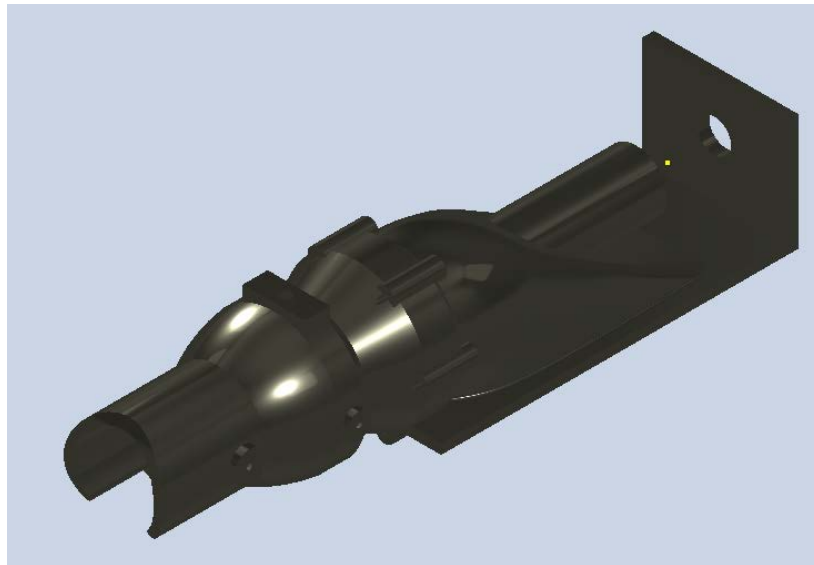


Figura 3-16 Ensamblaje de piezas bañadas por el fluido

Como se observa en la figura anterior no se ha incluido el deflector ni los elementos de unión entre la tobera y el deflector.

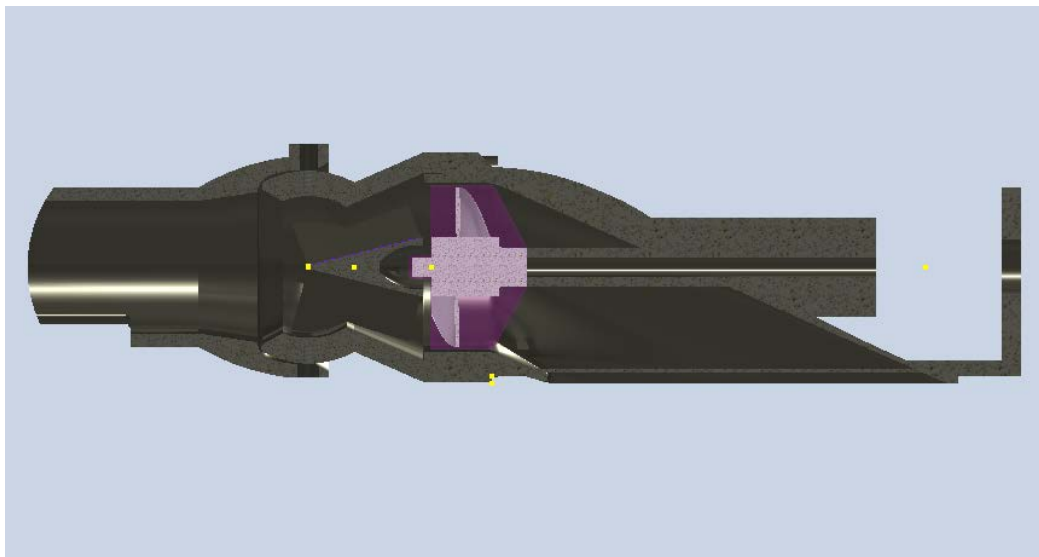


Figura 3-17 Corte transversal del ensamblaje de piezas bañadas por el fluido

Una vez obtenido todos nuestros elementos de interés, se procede a la limpieza de la geometría; esta limpieza se realizó mediante el uso de la herramienta de extracción de superficies. El proceso consistió en extraer todas caras interiores de los elementos por donde el fluido pasa y moja la superficie. Este proceso es importante porque estas superficies encerrarán los volúmenes de control. En la Figura 3-18 se observa el resultado de la limpieza de la geometría.

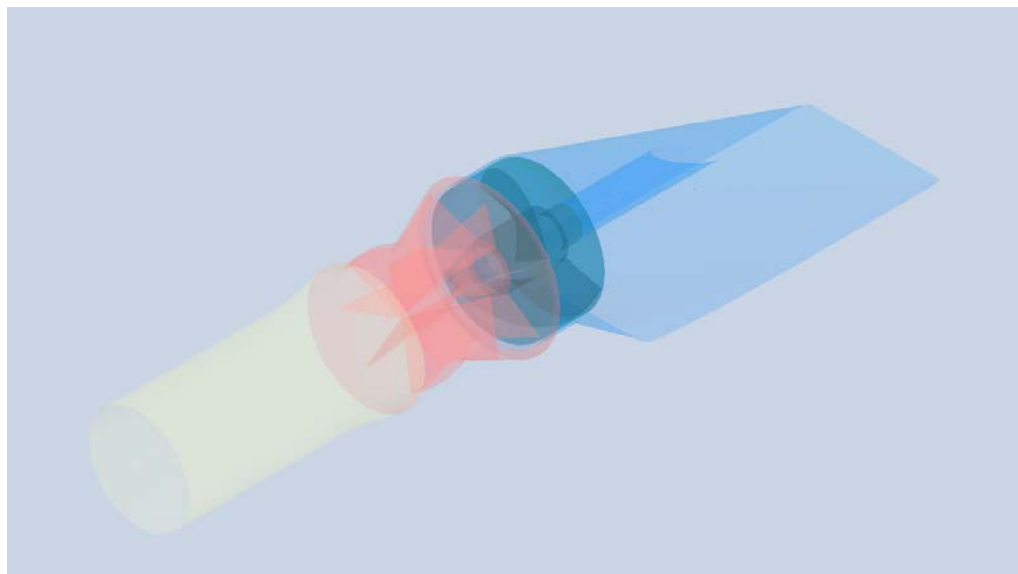


Figura 3-18 Superficie limpia

En la Figura 3-18 se observan en colores distintos las distintas zonas bañadas por el fluido. De color amarillo se puede distinguir la tobera; de magenta, el estator y de azul el cuerpo principal. Además, se puede distinguir entre la tobera y el cuerpo principal, las paredes de la hélice y del “cono truncado”. La parte final de la tobera no es exactamente como la de la pieza inicial (la cual tenía un corte en la parte inferior), se decidió alargarla puesto que dicho corte no influye en nuestro análisis ya que solo se estudiará cuando el chorro solo va en la dirección axial hacia popa; además, esto también facilita el mallado en la etapa de análisis.

Después de obtener la superficie de interés, se cierran mediante la creación de tapas en la toma y la salida de tobera, esto se realiza con la herramienta de superficie de contorno ubicado dentro del bloque de herramientas de superficies. Se cierra la superficie porque al analizarlo en Ansys Fluent, se le debe de importar sólidos; estos sólidos se crearán con las superficies cerradas. En la Figura 3-19 se observa la superficie limpia con las tapas en la toma y en la salida de la tobera.

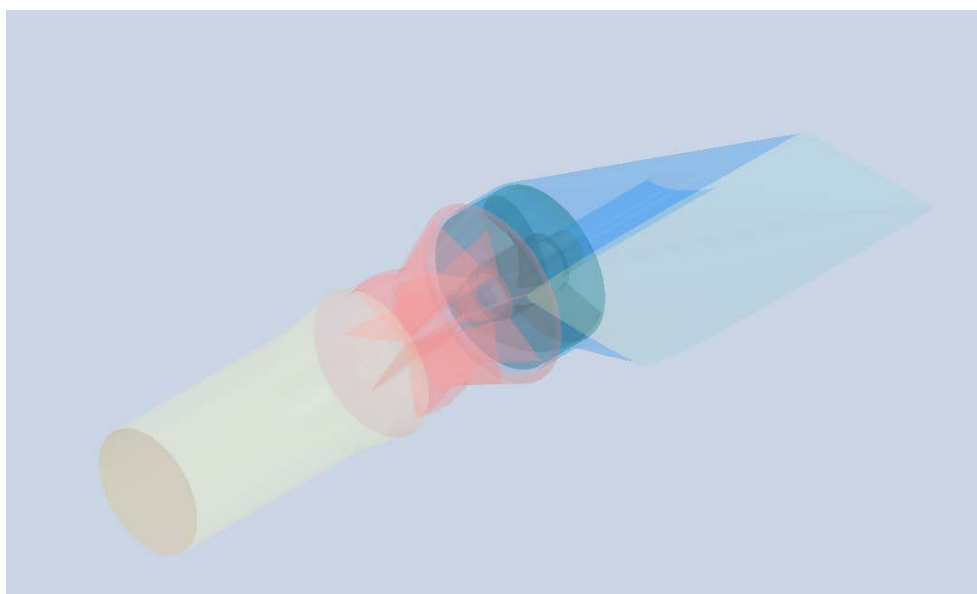


Figura 3-19 Superficie limpia con tapa en la toma y en la salida de la tobera

Una vez obtenida la superficie limpia con tapas, el siguiente paso será crear los volúmenes de trabajo. Este proceso será explicado en el siguiente apartado.

3.2 Análisis CFD

Se probaron distintos métodos de mallado para la simulación y mediante la búsqueda en la página web Innovation Space de Ansys, se concluyó que el método final de mallado es el Watertight Geometry Workflow [31]. Este método permite simplificar el proceso de generación de mallas y ayuda al usuario a completar un proceso completo de simulación.

Antes de empezar el proceso de generación de volúmenes de trabajo y mallado del fluido, se debe plantear la forma con la cual se analizará el propulsor. Los sistemas de propulsión o las hélices se ensayan experimentalmente mediante prototipos en canales hidrodinámicos, un propulsor waterjet también. En la Figura 3-20 se puede ver un ensayo experimental realizado en un canal hidrodinámico [32].



Figura 3-20 Ensayo experimental de un propulsor waterjet (tomada de [32])

Para la simulación en CFD solo se considera el sistema propulsor, sin considerar la embarcación ni el canal hidrodinámico y se crea un dominio debajo de la toma. A la pared opuesta a la salida de la tobera se le impone una velocidad de entrada que será la velocidad a la que la embarcación se esté moviendo. En la Figura 3-21 se observa una representación gráfica del dominio y las dimensiones que debe de tener [33].

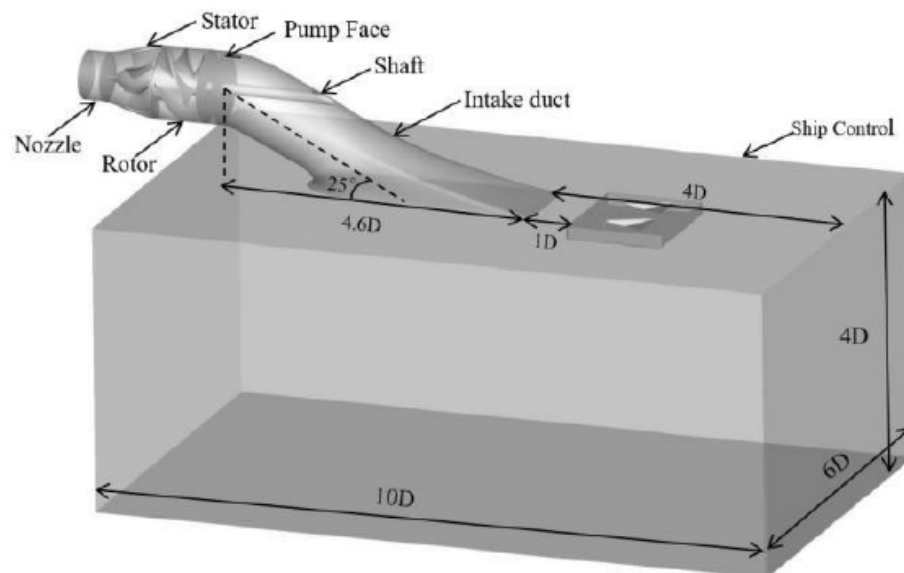


Figura 3-21 Modelo CFD de un propulsor waterjet (tomada de [33])

Con estos parámetros ya establecidos se pasa a la etapa de generación de la geometría, la cual se ve en el siguiente subapartado.

3.2.1 Geometría

Este proceso consiste en generar los volúmenes de trabajo que serán llevados al flujo de trabajo Watertight Geometry. Primero se crea el prisma que está situado debajo de toma; con un diámetro de hélice igual a 47,78 mm que se aproximó a 48 mm con el fin de tener dimensiones con cifras enteras se obtuvo un cubo con 192 mm de alto, 288 de ancho y 480 mm de largo. En la Figura 3-22, se observa el diámetro de la hélice en Autodesk Inventor.

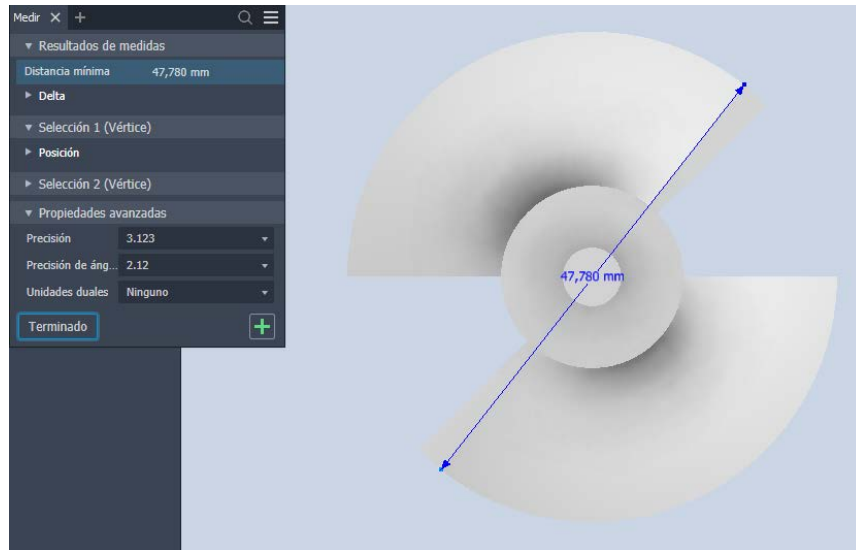


Figura 3-22 Diámetro impulsor del sistema waterjet de estudio

Con estas dimensiones se graficó el prisma y se añadió a la superficie limpia de la Figura 3-19. Posteriormente, mediante la operación coser de las herramientas de superficie de Inventor se cerraron todas las superficies extraídas y creadas generando volúmenes de trabajo. Se tienen 3 volúmenes de trabajo:

Volumen rotatorio: Este volumen será al cual se le dará rotación (mediante la opción 'frame motion') en Ansys Fluent. Se crea a partir de restar el volumen del "cono truncado" menos el volumen de la hélice. En la Figura 3-23 se puede observar el volumen creado.

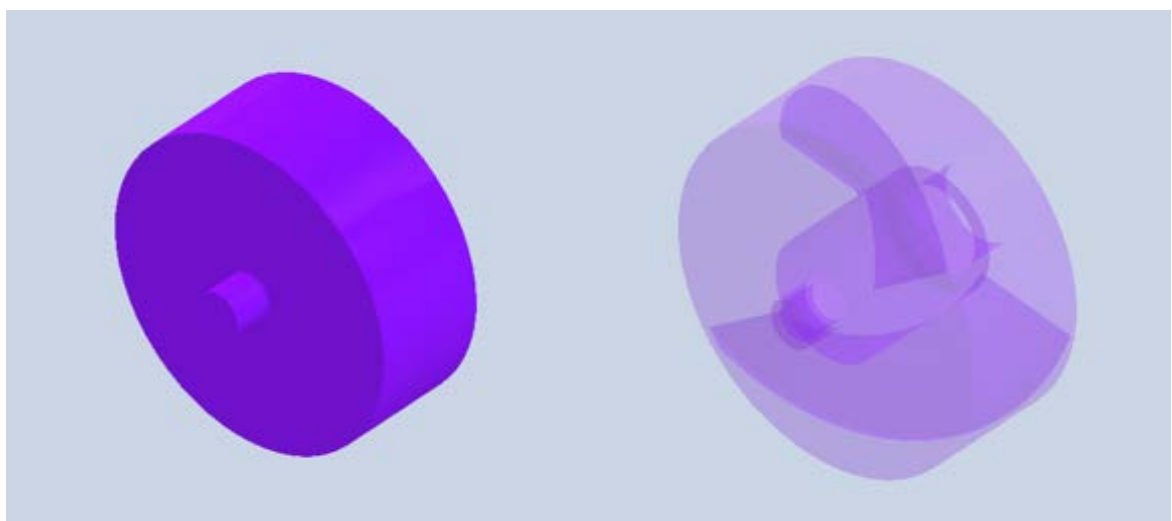


Figura 3-23 Volumen rotatorio

Volumen fijo: Este volumen es creado al restar el volumen creado por las superficies interiores de la tobera, el estator y el cuerpo principal menos el volumen del “cono truncado”. Se le considera volumen fijo puesto que en la simulación no se le dará ningún tipo de movimiento. En la Figura 3-24 observa el volumen creado.

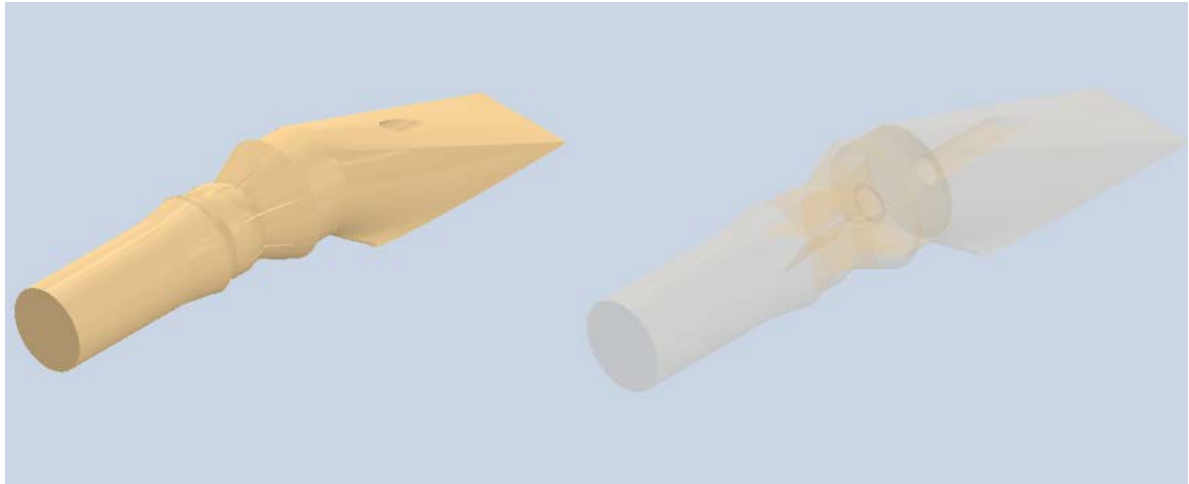


Figura 3-24 Volumen fijo

Volumen Previo: Este volumen corresponde al prisma creado para la simulación el cual va debajo del waterjet.

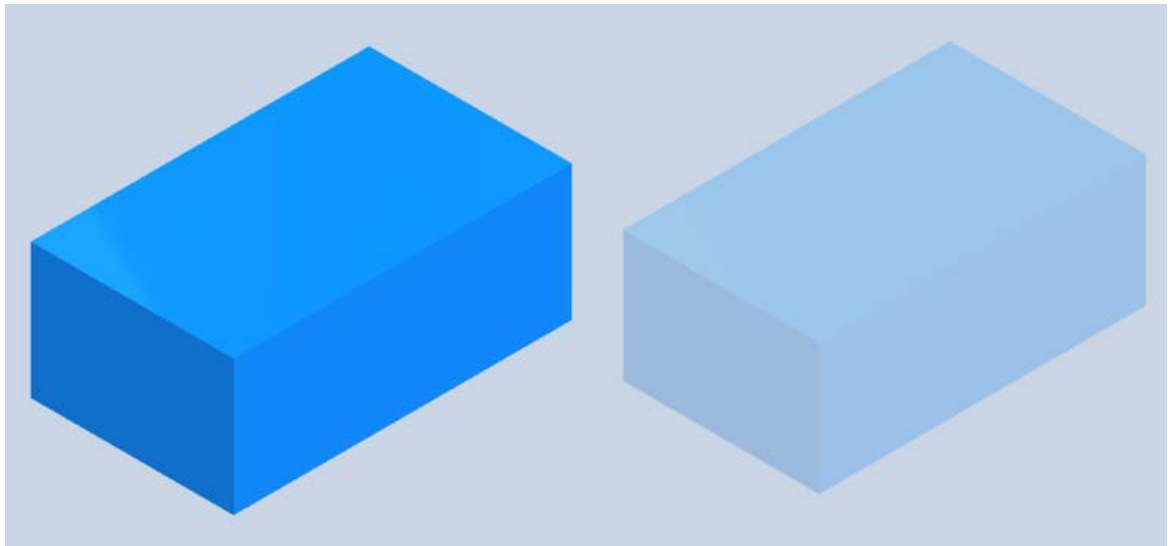


Figura 3-25 Volumen previo

Con los volúmenes ya creados se procede a guardar los CAD's en formato STEP (.stp). Hasta este punto del proyecto se trabajó con Autodesk Inventor, el siguiente paso consiste en importar todas las geometrías a Ansys Fluent.

3.2.2 Ansys Discovery

Una vez guardado los volúmenes en el formato correcto, estos se importan a Ansys Discovery (herramienta de Workbench que prepara la geometría para el mallado). En la Figura 3-26 se puede ver la geometría importada a la cual, mediante la opción 'Check Geometry', se comprueba que no haya ningún error y se encuentre lista para ser mallada.

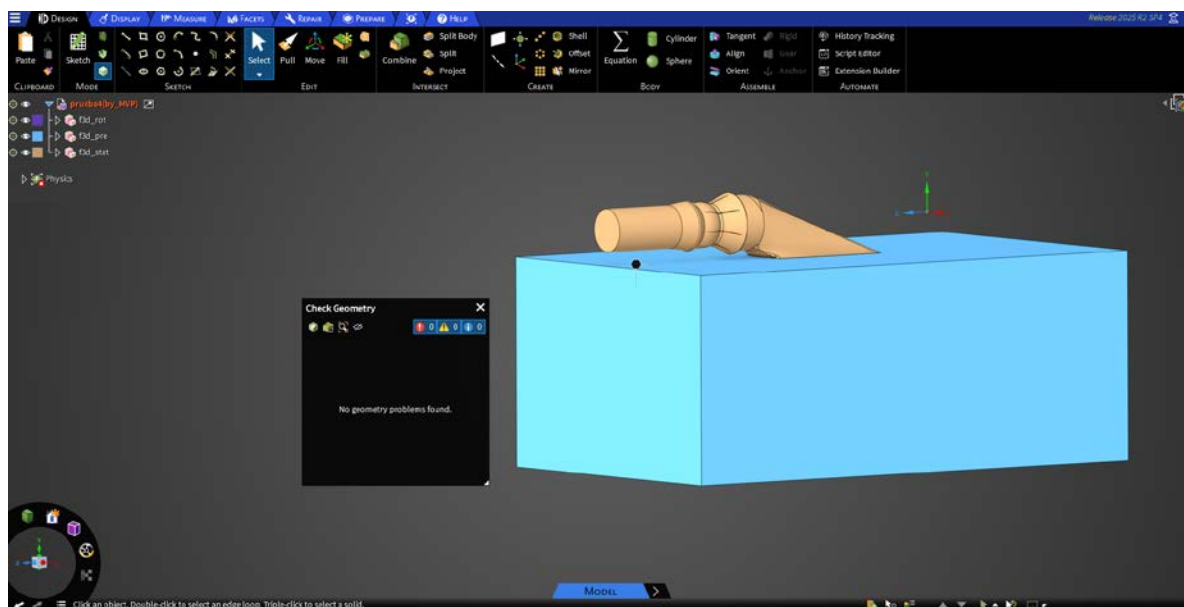


Figura 3-26 Geometría en Ansys Discovery

Se definen los volúmenes de trabajo como se muestra en la Tabla 3-1:

Volumen	Denominación
Rotatorio	f3d_rot
Fijo	f3d_stat
Previo	f3d_pre

Tabla 3-1 Denominación de los volúmenes de trabajo

Para una mejor visualización de los volúmenes, mediante la opción 'Section Mode', se hace un corte transversal. En la Figura 3-27 se puede ver dicho corte y además en la parte izquierda marcado con un cuadro amarillo el árbol de los volúmenes.

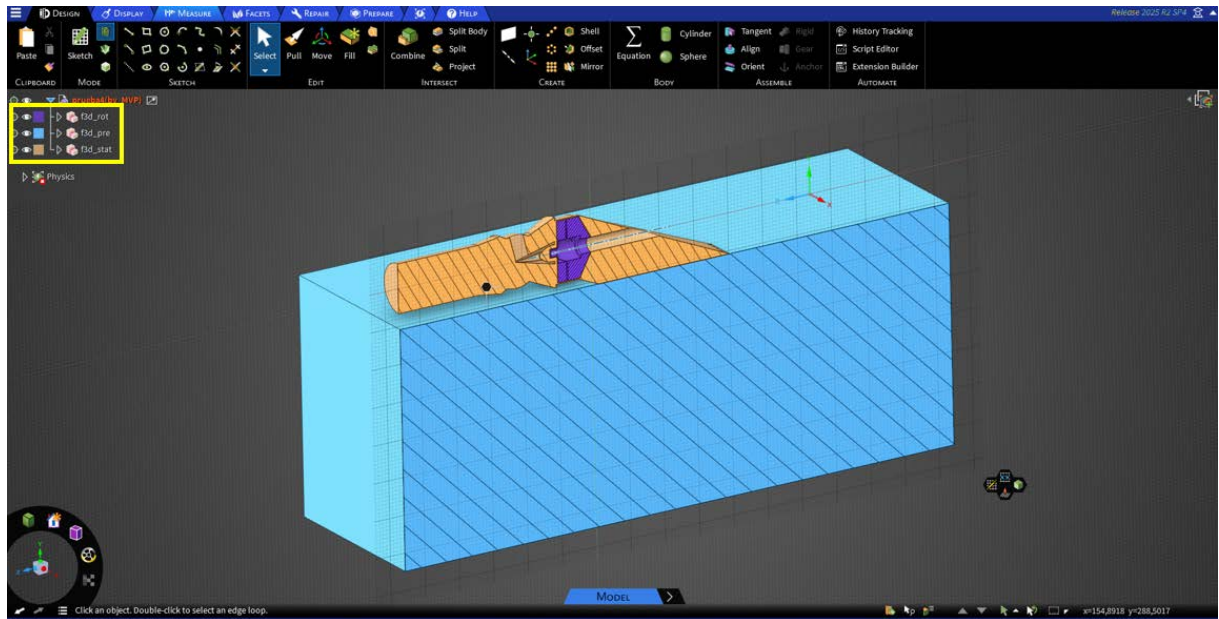


Figura 3-27 Corte transversal de la geometría en Ansys Discovery

Después de haber denominado los volúmenes y revisado la geometría se realiza la operación de topología compartida. Esta operación se realiza con la operación ‘Share Topology’ que se encuentra dentro de las herramientas de ‘Prepare’. A continuación, en la Figura 3-28 se muestran los resultados de la operación.

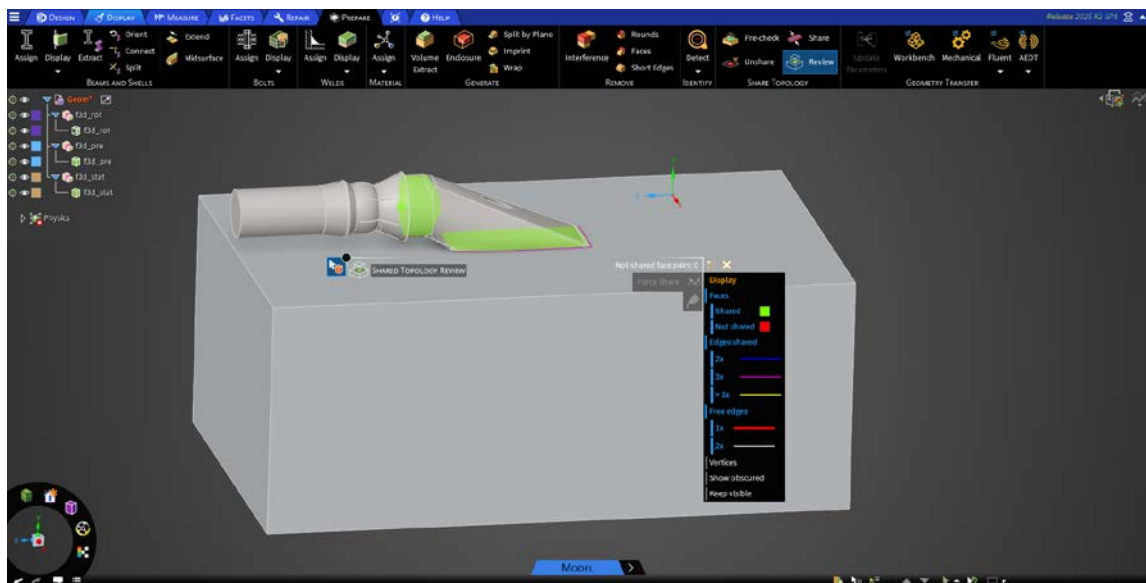


Figura 3-28 Resultado del ‘Share Topology’

Se puede observar en color verde aquellas caras con topología compartida. Los resultados son los esperados ya que el f3d_pre comparte una cara con el f3d_stat, y el f3d_rot comparte caras con el f3d_rot.

Finalmente, con el fin de tener un mejor control de los parámetros durante la simulación, se le da nombres a todas las paredes y volúmenes de la geometría. Este proceso se hizo mediante la herramienta ‘Named Selection’ de Discovery. Las secciones nombradas son las siguientes: f3d_rot, f3d_stat, f3d_pre, w_inlet, w_stb, w_port, w_bottom, w_outlet, w_top, int_body, outlet_tobera, w_tobera, w_stator, w_body, int_2, int_cil, int_1, w_propeller. Ver Anexo III: Secciones nombradas en Ansys Discovery.

3.2.3 Mallado mediante Watertight Geometry Workflow

Este proceso consiste en generar la malla de estudio, para ello se utilizará, como ya se había mencionado, el método de trabajo de flujo Watertight Geometry. Aquí se sigue un conjunto de pasos que el programa ya tiene configurado [34]. En los pasos se realizan preguntas al usuario, en algunas se responden dejando la respuesta predeterminada y en otras se hacen modificaciones. En este apartado se explicará todo el proceso de mallado y se mostrará la malla final.

Los pasos del método Watertight Geometry se observan en la Tabla 3-2.

Pasos	Interpretación
Import Geometry	Importa Geometría
Add Local Sizing	Añade tamaño de celda en zonas de interés
Generate the Surface Mesh	Genera la malla de las superficies
Describe Geometry	Tipo de Geometría
Enclosed Fluid Regions	Genera fluido en base a sólidos
Create Regions	Número de regiones
Update Regions	Tipo de regiones (fluido o sólido)
Add Boundary Layers	Añade capas límites en cara compartidas
Generate the Volume Mesh	Genera malla del fluido

Tabla 3-2 Pasos Watertight Geometry Workflow

Según la anterior tabla el primer paso es la importación de la geometría. En la Figura 3-29 se puede observar el primer paso realizado y además remarcado en un cuadro amarillo los siguientes pasos del método a seguir.

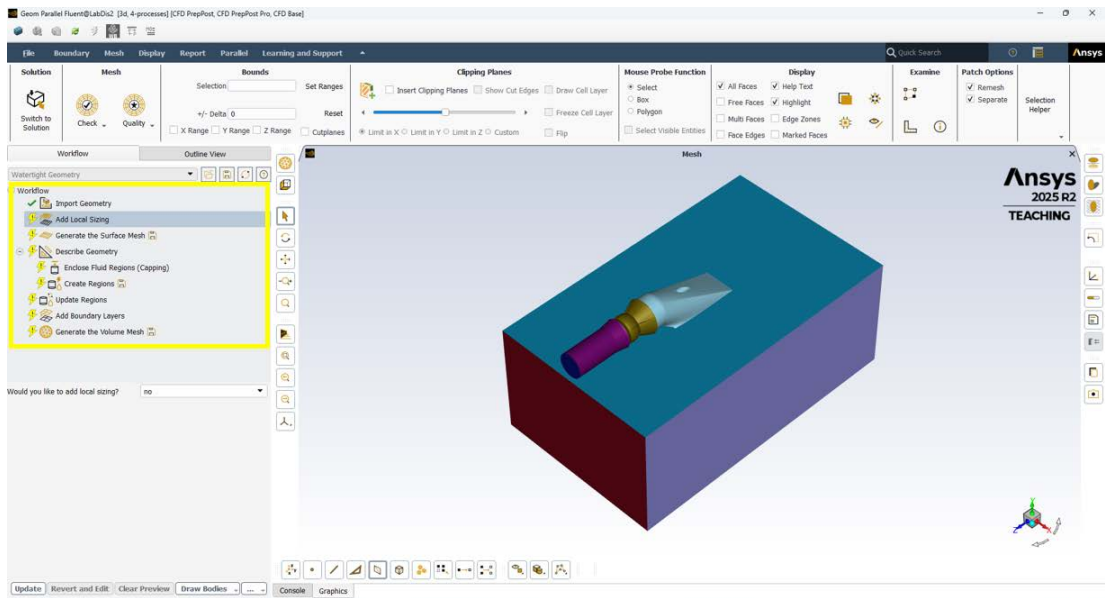


Figura 3-29 Pasos y geometría importada en el Watertight Geometry Workflow

Como se observa, el programa ya es capaz de distinguir por colores las distintas caras o paredes, a las cuales se le dieron nombre en Discovery.

Después de importar la geometría, continúa el paso de ‘Add Local Sizing’. En este paso no se añade el local sizing porque dejamos que el programa, en base a sus tamaños máximos y mínimos de celda y curvatura de la geometría, refine la malla como vea conveniente; luego se procede al paso de ‘Generate the Surface Mesh’. En el ‘Generate the Surface Mesh’, se mantiene los tamaños de las celdas y no se varía ningún parámetro debido a que el programa proporciona el tamaño correcto de la malla superficial, se le da a la opción de generar el mallado superficial y se pasa al paso de ‘Describe Geometry’. En la Figura 3-30 se puede observar el resultado del mallado superficial y con mayor detalle en la Figura 3-31.

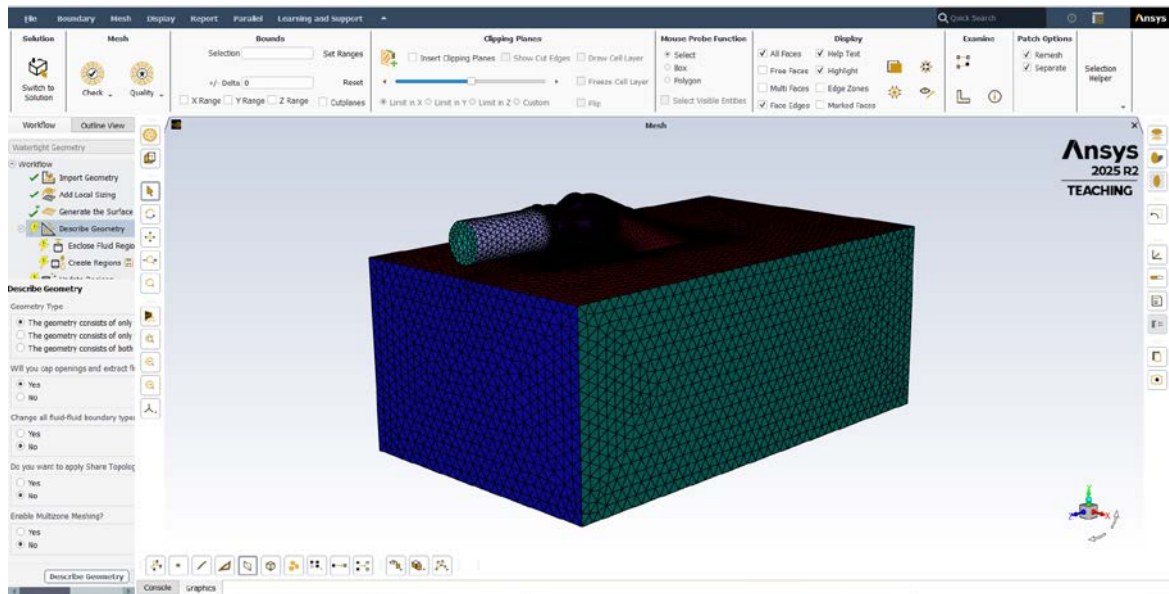


Figura 3-30 Resultado mallado superficial

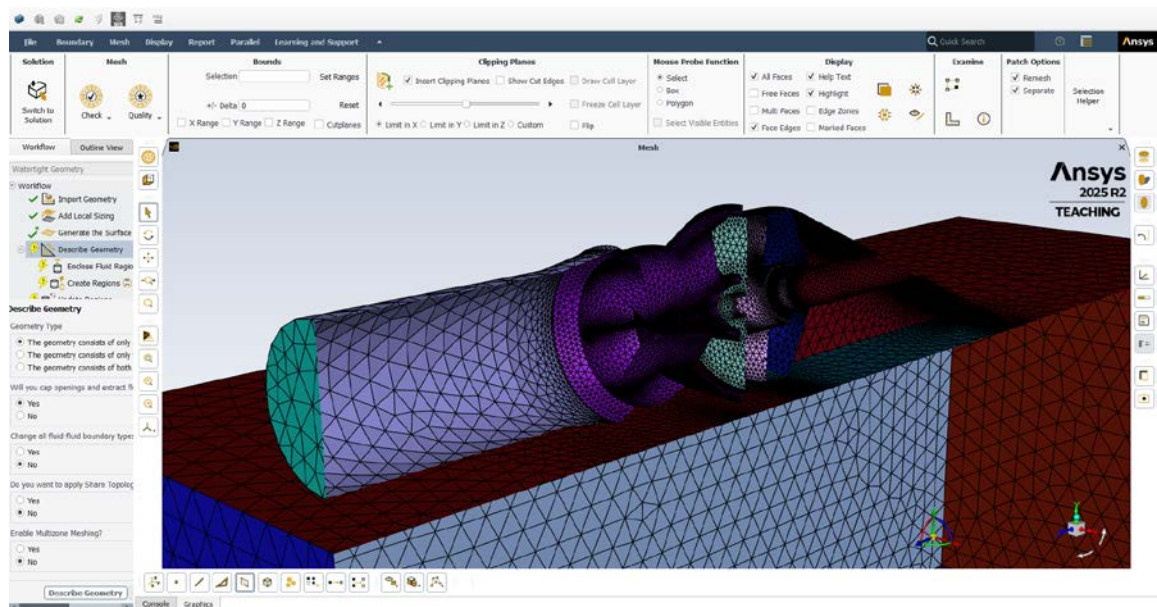


Figura 3-31 Corte transversal del mallado superficial en la sección del waterjet

Como se puede observar en la Figura 3-31 en las zonas donde la geometría tiene curvaturas o variaciones la malla se refina para mejores resultados.

En el paso de ‘Describe Geometry’, como el nombre lo dice, se describe la geometría. En esta etapa solo se cambia la primera respuesta predeterminada. Se selecciona que la geometría consta de regiones fluidas y sólidas y/o vacíos, puesto que es el tipo de geometría que se tiene, ya que tenemos como fluido

al flujo de agua y como sólido a la hélice. En la Figura 3-32 se muestra la configuración que del ‘Describe Geometry’.

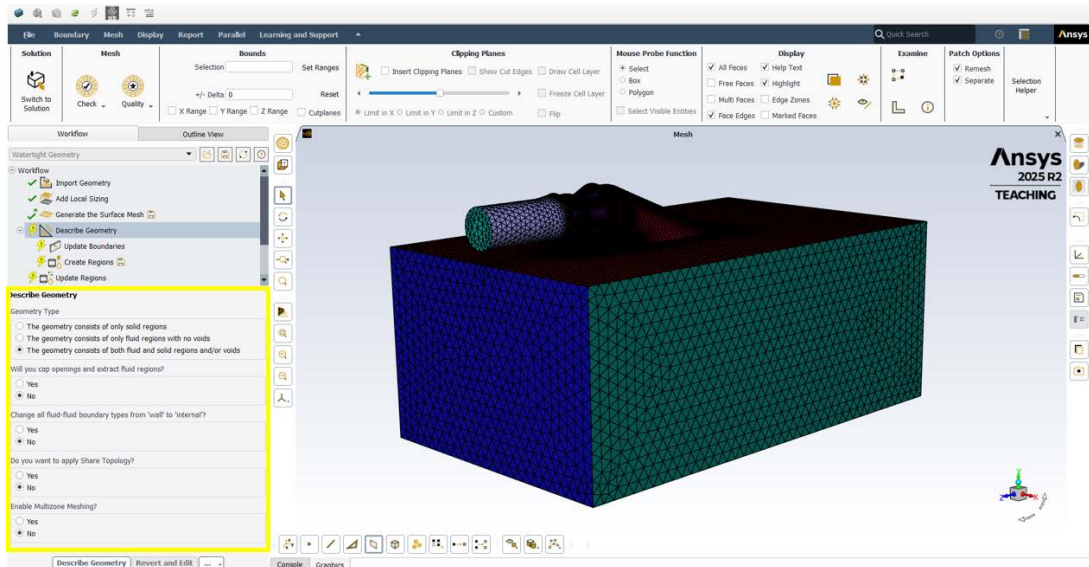


Figura 3-32 Configuración de ‘Describe Geometry’

Después de realizar la configuración, se pasa a la etapa de ‘Update Boundaries’. Este paso es importante porque se definirá el tipo de frontera que es cada cara que se nombraron el Discovery. Las caras que se editan son: int_1, int_2, int_cil, int_body; para estas caras se selecciona la opción de ‘internal’ ya que son caras internas en el flujo. El resto de caras se mantienen con la configuración predeterminada por el mallador debido a que este es capaz de interpretar los tipos de frontera.

En la Figura 3-33 se observa la configuración de este paso.

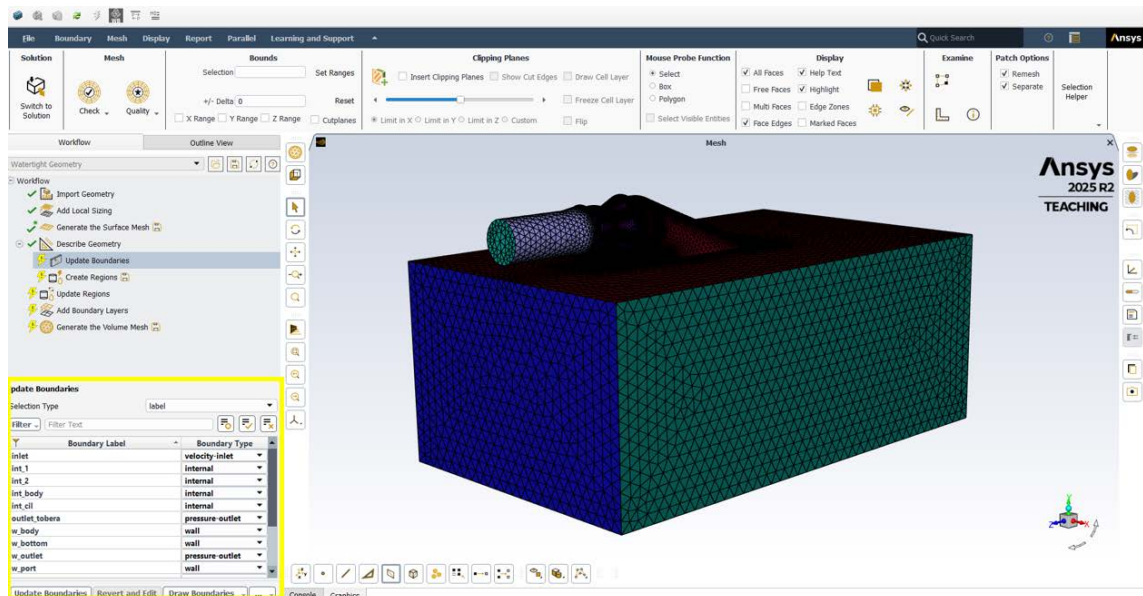


Figura 3-33 Configuración de ‘Update Boundaries’

El siguiente paso es ‘Create Regions’, aquí se inserta al mallador el número de regiones que se tienen, que para nuestro caso de estudio son 3: f3d_rot, f3d_stat y f3d_pre. Después, se pasa al ‘Update Regions’, se mantiene la configuración predeterminada, la cual indica que las 3 regiones son fluidos, lo cual es correcto. Posteriormente, en el paso de ‘Add Boundary Layers’, no se le pide que añada capas

límites. Finalmente, en el paso final de ‘Generate the Volume Mesh’, se genera el mallado del fluido. En la Figura 3-34 se observa un corte transversal del resultado final del mallado del fluido.

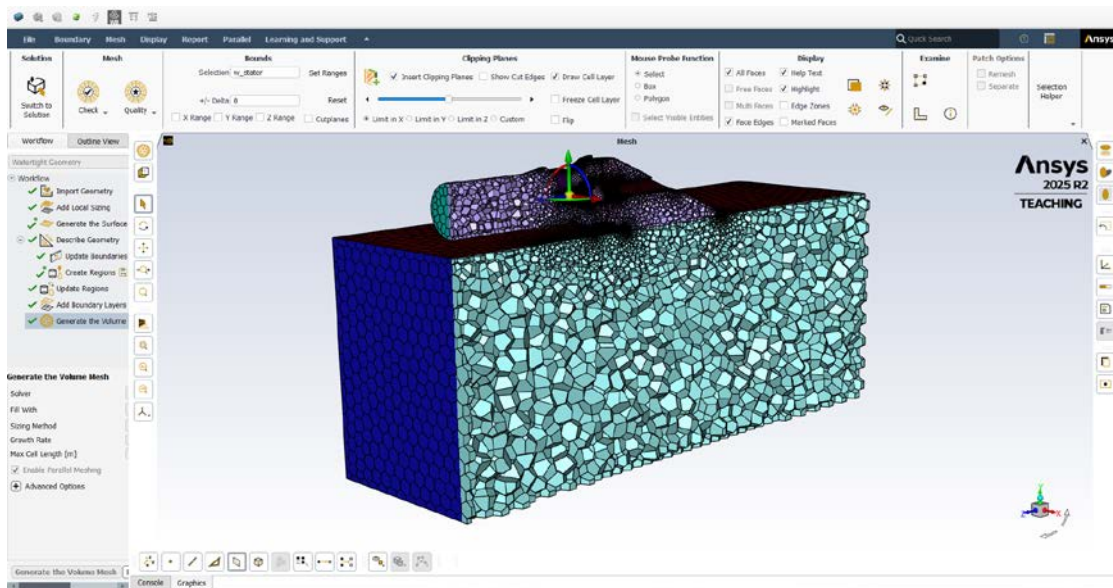


Figura 3-34 Resultado final del mallado del fluido

En la Figura 3-35 se realiza un zoom en la zona del propulsor waterjet, en la que se observar como la malla se refina en las curvas o donde la geometría es compleja de analizar.

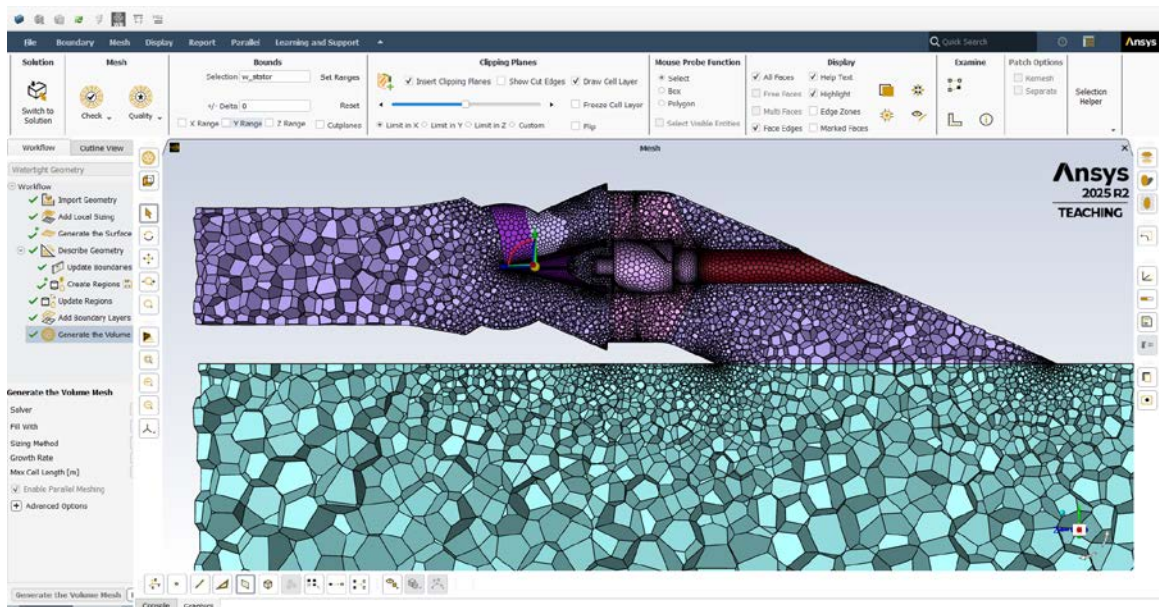


Figura 3-35 Zoom del mallado en la zona del waterjet

Una vez generado la malla, se pasa a la siguiente etapa del análisis, la cual corresponde a las configuraciones que se le dará al fluido de estudio como, por ejemplo, la velocidad de entrada, velocidad de rotación para el solucionador resuelva las ecuaciones de gobierno y se obtengan resultados.

3.2.4 Configuraciones

En esta etapa se comprueban las celdas que se tienen, las caras internas, paredes y volúmenes que trabajo o celdas. También, se le da al programa el tipo de fluido con el cual se está trabajando (agua) y se configuran los parámetros de velocidad de entrada y velocidad de rotación de hélice, el cual será impuesto como velocidad de rotación del volumen rotatorio (f3d_rot).

Según las descripciones técnicas del waterjet del laboratorio (Anexo IV), el sistema trabaja bien con un motor 5684/5694/56104, con KV500 a 1000, con baterías LiPo de 6S a 8S.

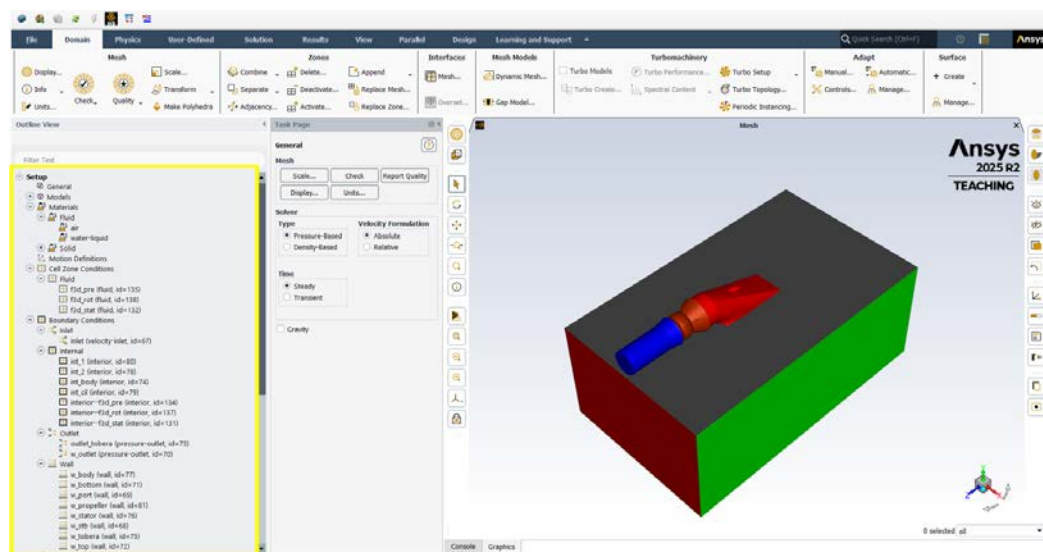
KV significa el número de RPM/voltio; es decir, $RPM = KV \times voltaje$ [35]. Las baterías LiPo XS significa 3,7 voltios por celda [36]. Por lo tanto, tendremos un rango de velocidades angulares para el volumen rotatorio (f3d_rot) reflejados en la Tabla 3-3:

Motor/batería	Velocidad angular (rpm)
KV500 LiPo 6S	11,100
KV500 LiPo 8S	14,800
KV1000 LiPo 6S	22,200
KV1000 Lipo 8S	29,600

Tabla 3-3 Rango de velocidades del volumen rotatorio

El waterjet está diseñado para modelos de Jet Boat de embarcaciones de Radio Control. Estas embarcaciones de radio control suelen alcanzar velocidades desde 50 km/h hasta 150 km/h (14 m/s a 42 m/s). Este rango de velocidades será impuesto como velocidad de entrada en la pared 'w_inlet' del volumen previo. Con estos parámetros se configura el Ansys Fluent.

Se procede a abrir 'Setup' en Ansys Fluent' y se corrobora que todo lo impuesto en Ansys Discovery y durante el mallado se mantenga, esto sirve para tener un mayor control de la simulación. En la Figura 3-37 se observa la interfaz de las configuraciones con las celdas (volúmenes), caras, fronteras y paredes enmarcados en el recuadro amarillo.



Ahora se establece que el volumen rotatorio tiene rotación, para ello entramos en f3d_rot y editamos los parámetros. Establecemos que el tipo de fluido es agua y que tiene 'Frame Motion'. Le damos una velocidad de rotación de 11,100 rpm y eje de rotación el eje Z positivo.

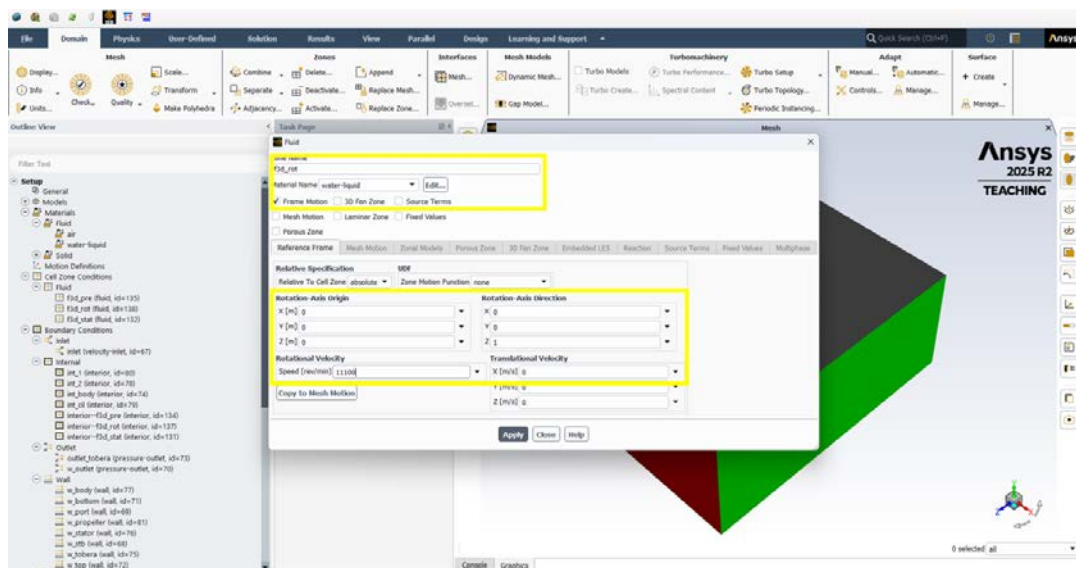


Figura 3-37 Configuración del volumen rotatorio

Ahora se le impone una velocidad de entrada en la pared de inlet. Para un primer análisis se le otorga una velocidad de 14 m/s.

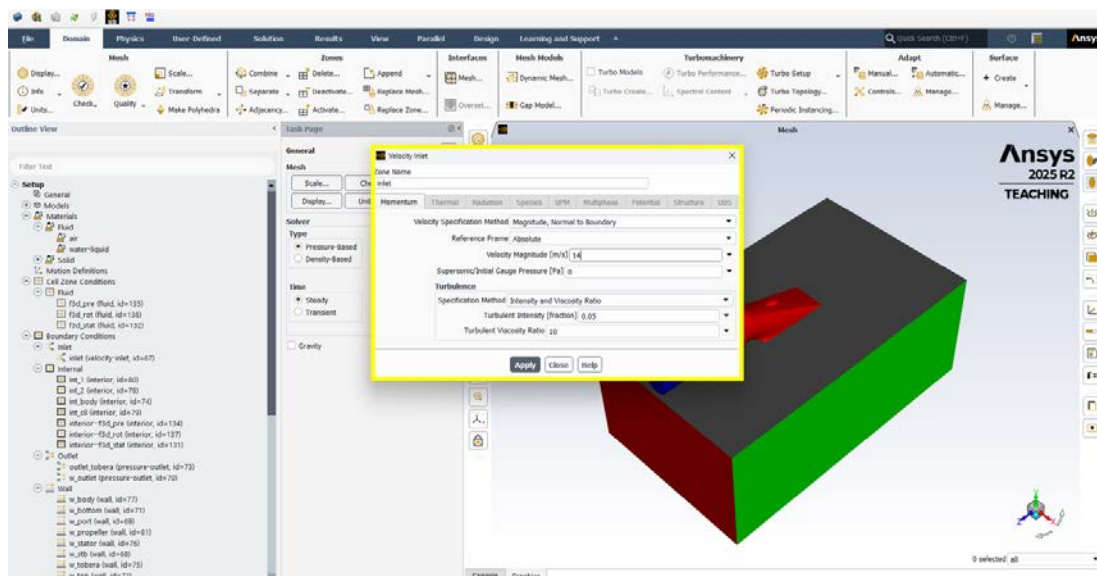


Figura 3-38 Configuración velocidad de entrada en la pared inlet

Una vez impuesta estos dos parámetros, se inicializa un primer cálculo, que permite al programa crear valores de partida para un tiempo $t=0s$. Finalmente, damos el número de iteraciones para la cual el programa resolverá las ecuaciones de gobierno y le damos a calcular.

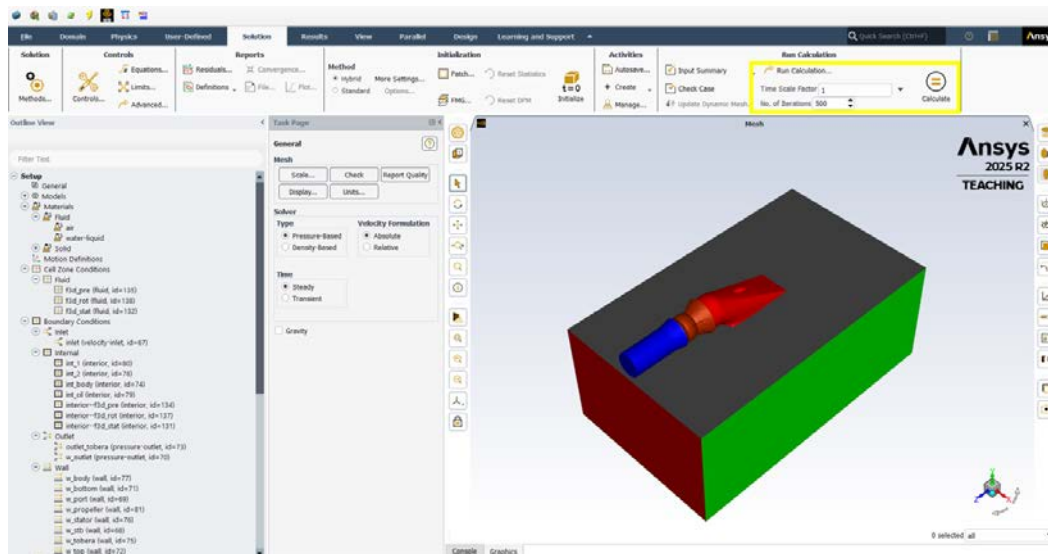


Figura 3-39 Proceso final del ‘Setup’

Una vez realizado este proceso, el programa ya es capaz de dar cualquier tipo de datos tales como fuerza, velocidad, presión o par. Los valores usados para las condiciones iniciales sirven para explicar cómo se realiza la configuración de Fluent; sin embargo, para la obtención de resultados se usarán otros valores que se encuentren dentro de un rango válido. Antes de obtener los resultados de la simulación, se tiene que observar que las soluciones converjan. Esto se explica en el siguiente subapartado.

3.2.5 Soluciones

En este subapartado se comprueban que las soluciones de las distintas iteraciones converjan. Este resultado lo muestra Ansys Fluent mediante el Historial de Residuos (Scaled Residuals). Los residuos son una medida del error numérico de cada iteración que se genera cada vez que Ansys Fluent resuelve una ecuación de gobierno. Se espera que en cada iteración los errores disminuyan; por lo tanto, se busca que los residuos tengan a disminuir con cada iteración que haga. En la Figura 3-40 se muestra el plot del historial de residuos para las 500 iteraciones realizadas para nuestros parámetros iniciales.

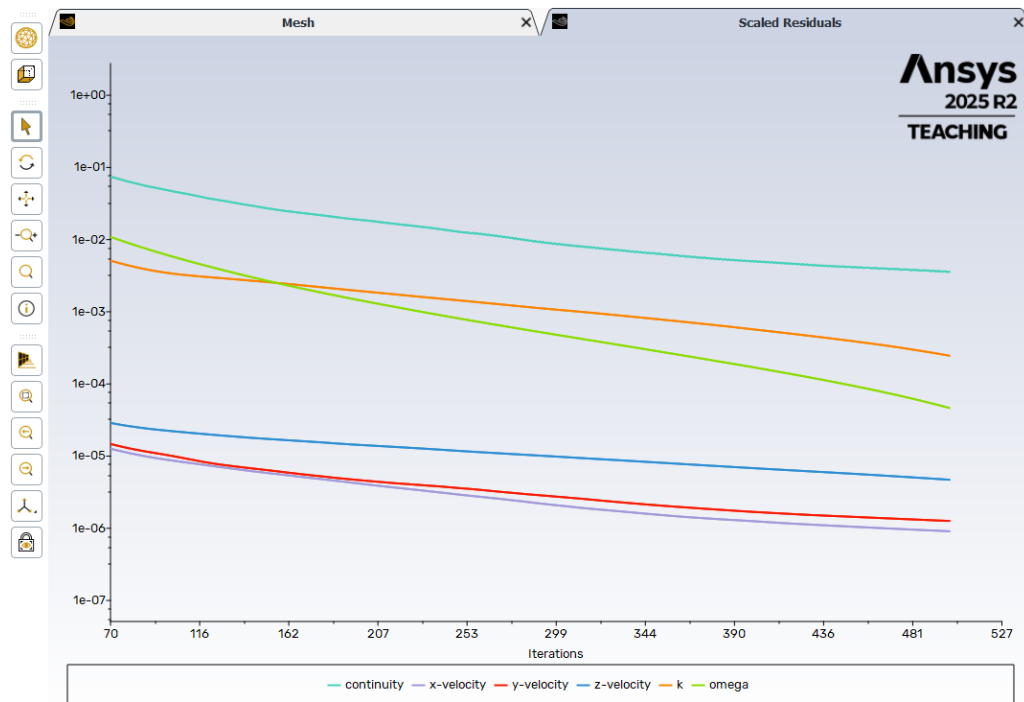


Figura 3-40 Historial de Residuos

En el eje Y se encuentran los residuos en escala logarítmica, en el eje X se tiene el número de iteraciones. En color turquesa se muestra la curva de la continuidad (conversación de masa); en color lila, rojo y azul se reflejan las velocidades en los ejes X, Y y Z respectivamente (cantidad de movimiento) y color naranja y verde se observan los modelos de turbulencia (que en el presente trabajo no se explican)

Como se observan en la Figura 3-40 las curvas de los residuos de cada ecuación de gobierno tienden a disminuir en cada iteración; por lo tanto, se concluye que las soluciones convergen. Una vez obtenida la convergencia de las soluciones, se puede solicitar al programa los resultados deseados los cuales se verán en el siguiente apartado.

4 RESULTADOS

4.1 Contornos de Presión y vectores de velocidad

En este apartado se encontrarán los resultados obtenidos por parte de las gráficas de presión y vectores de velocidad. Se comprobará que el impulsor este aumentando la energía del fluido, esto mediante la observación del contorno de presiones totales. Se explicará el comportamiento de los vectores de velocidad y como estos se cambian de dirección y magnitud con respecto a la rotación de la hélice.

Según la Figura 2-12 entre las estaciones 3, 4 y 5 se observa como hay un aumento de la energía. Esto es debido a que el impulsor otorga energía mecánica al fluido. La energía mecánica del fluido, en Ansys Fluent, se puede estudiar mediante la observación de las presiones totales, ya que éstas consideran la energía potencial asociada a la presión del fluido (altura de presión), energía cinética y potencial gravitatoria.

Para la obtención de resultados se decidió establecer como condiciones de contorno que la velocidad de rotación de la hélice sería la máxima posible, la cual la otorga un motor tipo KV1000 con batería LiPo 8S; es decir, 29600 rpm y una velocidad de embarcación (velocidad de la cara 'inlet') de 14 m/s. Para este contexto se realizaron 5000 iteraciones, con el fin de obtener menores residuos y resultados con mayor precisión.

Parámetro	Valor
Velocidad angular	29600 rpm
Velocidad de entrada	14 m/s
Iteraciones	5000

Tabla 4-1 Parámetros iniciales de cálculo para obtención de resultados

En la Figura 4-1 se observa la distribución de presiones, mediante colores, en la cara de hélice.

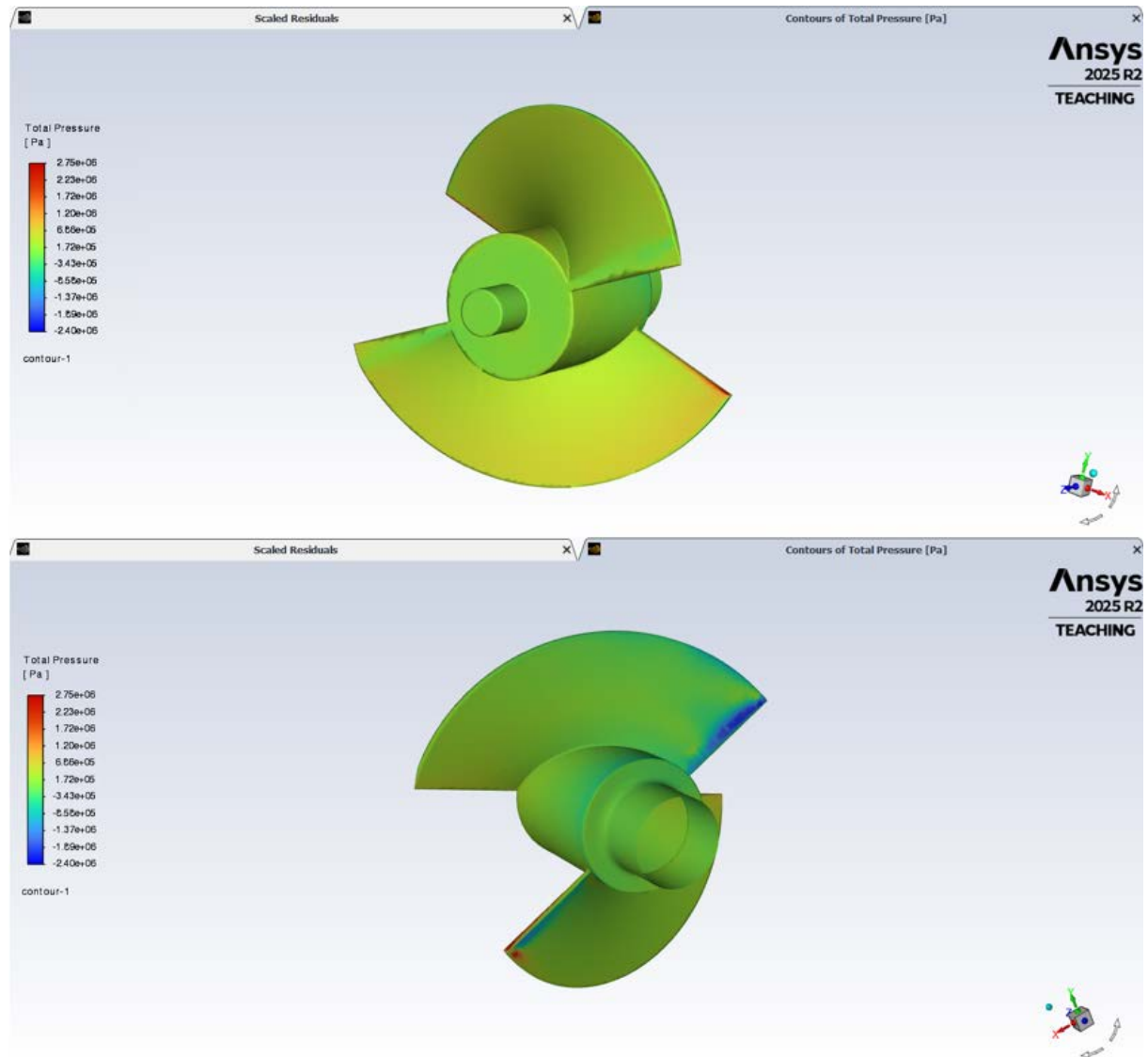


Figura 4-1 Contorno de Presiones

En la Figura 4-1 se observa en la lado izquierdo una escala de presiones según colores; siendo el color rojo presiones altas y el color azul presiones bajas. La cara de succión o aspiración se ve representada por una escala de colores verdes e incluso se pueden observar algunas partes con tonalidades de color azul; mientras que, en la cara de expulsión se puede ver que la escala de colores aumenta acercándose a tonalidades amarillas o naranjas, incluso en algunas secciones se puede observar alguna parte con tonalidades rojizas. Con lo cual, se observa que hay un aumento de la presión de un lado de la hélice con respecto a otro. Esto significa que la hélice está funcionando de manera correcta, ya que la cara de expulsión experimenta mayor presión que el lado expuesto y se ve reflejado en la escala de colores de la Figura 4-1. Además, se puede corroborar que el sentido de rotación (+Z) impuesto en las configuraciones iniciales es el correcto.

Continuando con los resultados, en la Figura 4-2 se presenta el comportamiento del fluido mediante el uso de vectores de velocidad absoluta.

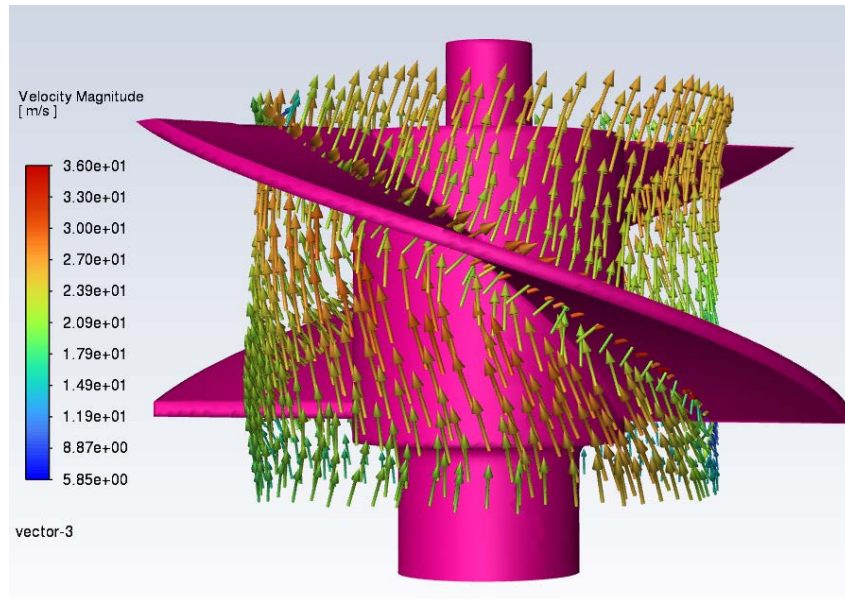


Figura 4-2 Vectores de velocidades absoluta

Observando el comportamiento de los vectores de velocidad absoluta, se puede ver como el fluido, antes de pasar a través de la hélice, tiene una dirección axial proveniente del ducto de aspiración del waterjet, pero al atravesar la hélice se observa como intenta evitar el obstáculo cambiando su dirección. En adición se observa como los colores de los vectores cambian, debido al paso por la hélice, indicando un aumento de la energía cinética.

También se recogieron los datos de velocidad axial y circunferencial absolutas, mostrados a continuación:

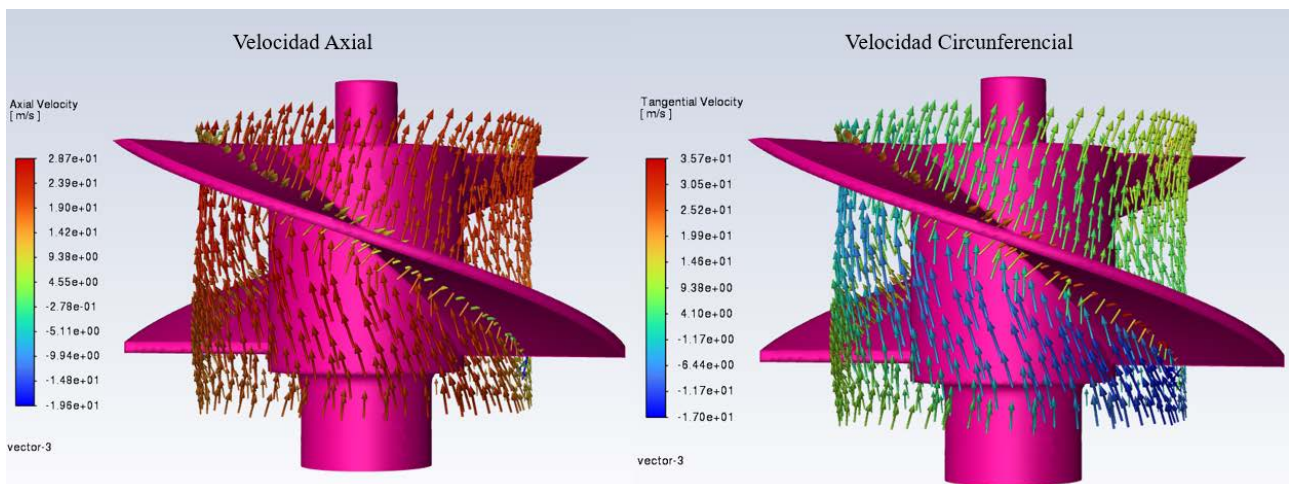


Figura 4-3 Vectores de velocidad axial y circunferencial absoluta

En la Figura 4-3 se pueden ver los vectores de velocidad coloreados por la componente axial (izquierda) y la componente circunferencial (derecha). La componente axial está asociada con el caudal, por tal motivo se observa que la magnitud (de color rojo) se mantiene constante, ya que esta sigue el flujo del caudal que llega por el conducto de entrada. Por otro lado, la componente circunferencial aumenta de magnitud (de abajo hacia arriba pasa de color azul a verde) debido a que la hélice le otorga momento cinético y además se observa cómo cambia la dirección del vector en el sentido de rotación de la hélice.

4.2 Conservación de la masa y cantidad de movimiento

Como se mencionó en el apartado 2.6 el software CFD se encarga de resolver las ecuaciones de gobierno de la mecánica de fluidos. Por lo tanto, los principios de conservación de la masa y cantidad de movimiento se deben de cumplir para cualquier caso. En este apartado se comprueba que la continuidad y la cantidad de movimiento se conservan, para ello se solicita a Ansys resultados tales como flujos másicos, velocidades y fuerzas.

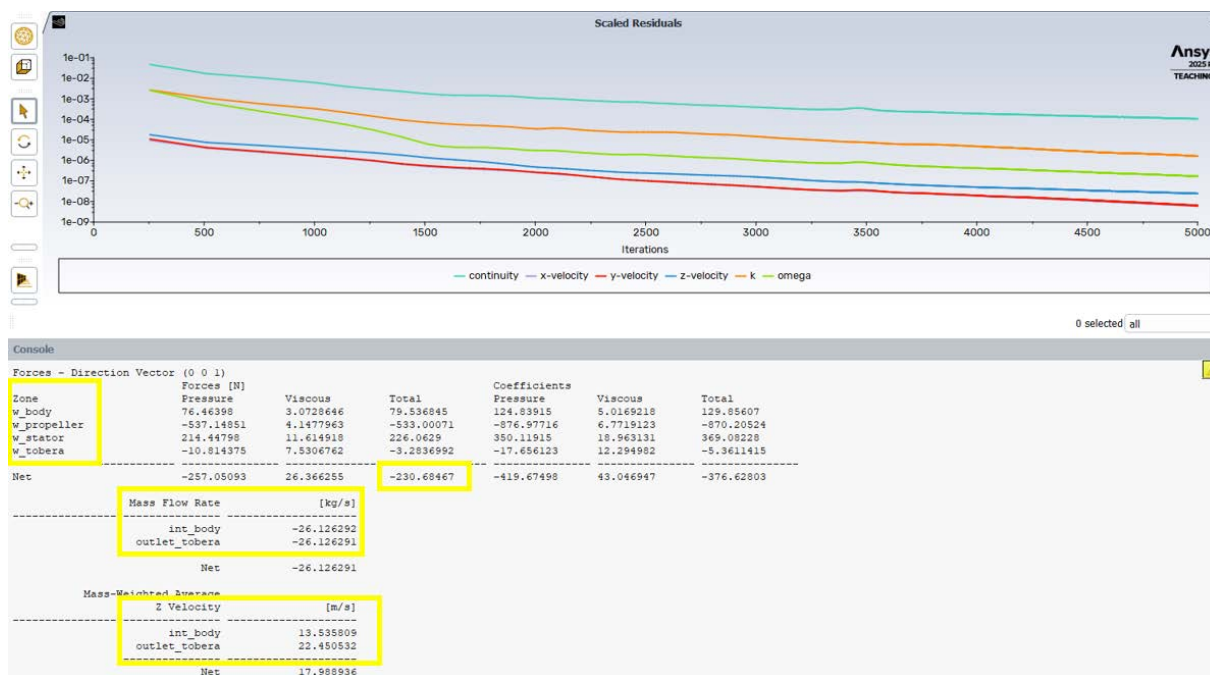


Figura 4-4 Datos de fuerza, velocidad y flujo másico solicitados a Ansys Fluent

En la Figura 4-4 se pueden observar, enmarcados en amarillo, los datos que se solicitaron a Ansys Fluent para comprobar la conservación de la masa y de la cantidad de movimiento. Se solicitó la fuerza total neta resultante en el eje Z que ejerce el fluido sobre el sistema de propulsión, el cual está conformado por las paredes del cuerpo principal (w_body), de la hélice (w_propeller), del estator (w_stator) y de la tobera (w_tobera). También, se recogieron los valores de flujo másico en la entrada del waterjet (int_body) y en la salida del mismo (outlet_tobera). Finalmente, se obtuvo las velocidades en el eje Z en la entrada y salida del hidrojet. Estos resultados se muestran ordenados en la Tabla 4-2, que se muestra a continuación:

Parámetro	Valor	Unidad
Fuerza Neta sobre el sistema	230,68467	N
Flujo másico entrada waterjet	26,126292	Kg/s
Flujo másico salida waterjet	26,126292	Kg/s
Velocidad entrada waterjet (eje Z)	13,535809	m/s
Velocidad salida waterjet (eje Z)	22,450532	m/s

Tabla 4-2 Valores usados para validación de la continuidad y cantidad de movimiento

Conservación de la masa (Continuidad):

La comprobación de la continuidad se realiza mediante el balance de flujo másico que entra y sale del sistema. Para nuestro caso de estudio solo existe una entrada y una salida; por lo tanto, toda la cantidad de masa por unidad de tiempo que entra al sistema debe ser igual a la que sale de la misma. Los datos se sacan directamente de la Tabla 4-2, obteniéndose como resultados que el flujo másico de entrada y de salida es 26,13 kg/s; en consecuencia, se conserva la masa.

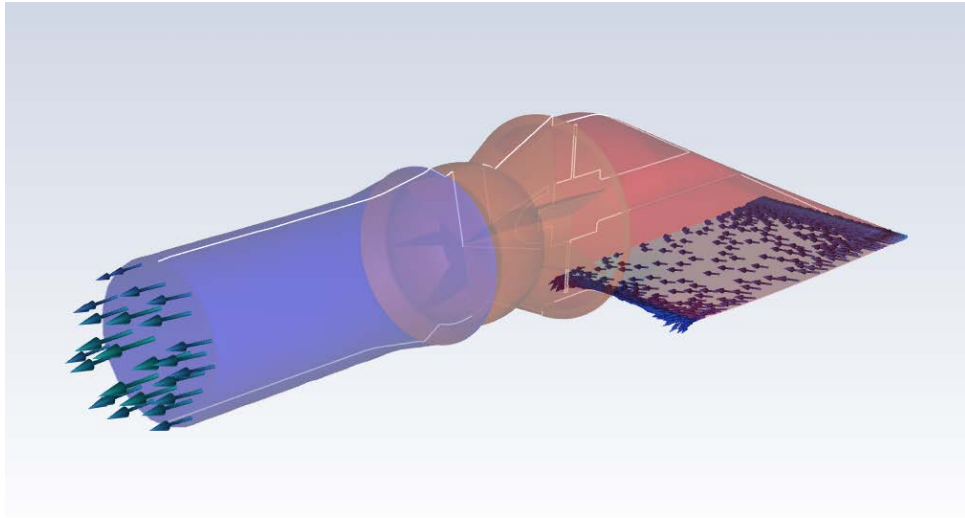


Figura 4-5 Flujos másicos de entrada y de salida del waterjet

En la Figura 4-5 se puede ver de manera gráfica los flujos másicos de entrada y de salida del waterjet y comprender el principio de conservación de masa.

Conservación de la cantidad de movimiento (Segunda Ley de Newton):

Para analizar la conservación de la cantidad de movimiento, se parte de la ecuación planteada en el apartado 2.6.2. Esta ecuación nos dice que el sumatorio de fuerzas externas que actúan sobre nuestro dominio de control es igual a la suma de la variación temporal del momento dentro del volumen más el flujo neto de cantidad de movimiento que entra y sale.

Debido a que estamos trabajando en régimen estacionario, podemos asumir que la componente de la variación temporal del momento ($\frac{d}{dt} \int_{VC} \rho \vec{V} dV$) es cero ya que no existe acumulación de cantidad de movimiento dentro del volumen de control. Para simplicidad de cálculo, hacemos una proyección de las velocidades en el eje Z (velocidades axiales) para trabajar con un flujo unidimensional, considerando que la velocidad es uniforme en las secciones y de que solo tenemos una entrada y una salida; por lo tanto, el término de flujo ($\int_{VC} \rho \vec{V} (\vec{V}_r \cdot \vec{n}) dA$) se convierte en $\dot{m}V_{sal} - \dot{m}V_{ent}$. Finalmente, como se ha comprobado anteriormente, el flujo másico es constante; en consecuencia, la ecuación de conservación de movimiento queda reducida a:

$$\sum_{ext} F = \dot{m}(V_{sal} - V_{ent})$$

En la Figura 4-6 se puede observar, con una línea de color blanco, el contorno del dominio de control; además, se puede encontrar marcadas por líneas amarillas la entrada y la salida del waterjet.

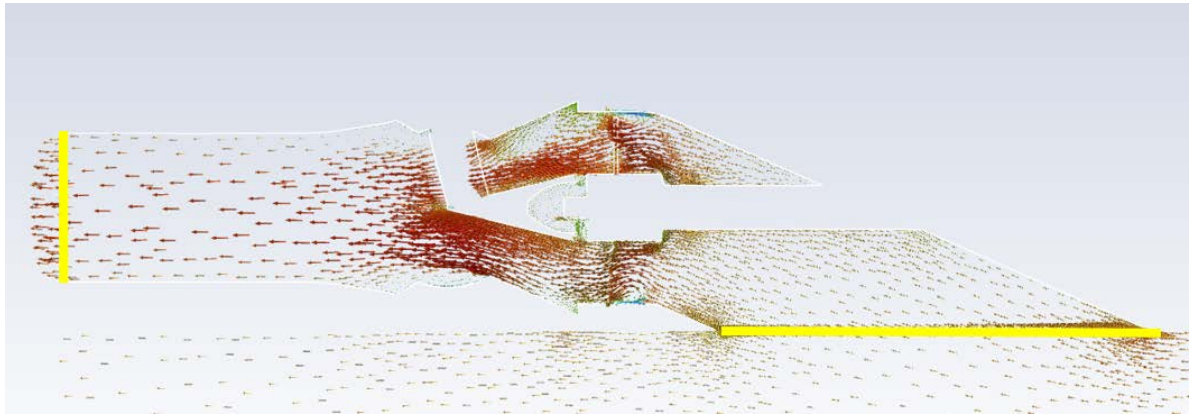


Figura 4-6 Contorno del dominio de control en 2D

Los datos para la comprobación de la cantidad de movimiento se obtienen de la Tabla 4-2, obteniéndose la siguiente solución para la ecuación de la cantidad de movimiento reducida:

$$\sum_{ext} F = \dot{m}(V_{sal} - V_{ent})$$

$$\sum_{ext} F = 26,126 (22,450 - 13,536)$$

$$\sum_{ext} F = 232,887 \text{ N}$$

De la anterior ecuación se concluye que la sumatoria de todas las fuerzas externas que se ejerce sobre el fluido tiene un valor igual a 232,887 N. Este valor es razonable ya que, según la Tabla 4-2, la fuerza que ejerce el fluido sobre las paredes del waterjet es igual a 230,685 N. En consecuencia, se conserva la cantidad de movimiento.

4.3 Gráficas de Presión y de Fuerzas de Empuje

Como se observa en la Figura 2-12 del apartado 2.3.1 la energía del fluido, que entra por la toma del waterjet (estación 2), disminuye ligeramente hasta llegar al propulsor (estación 3). Después de pasar por la hélice, el fluido aumenta su energía de forma drástica, debido a que el impulsor se la proporciona. Finalmente, al salir por la tobera (estación 7) la presión disminuye por efecto de la tobera.

En Ansys se puede estudiar la energía del fluido mediante la presión total ya que esta presión incluye la energía cinética, potencial gravitatoria y potencial de presión (Bernoulli). Se recogieron los datos de presión, en las estaciones mencionadas en el anterior párrafo, para los parámetros iniciales de cálculos en la obtención de resultados (Tabla 4-1), los resultados se muestran en la Tabla 4-3:

Caras (estaciones)	Presión Total (Pa)
int_body (2)	88149,95
int_1 (3)	77270,672
int_2 (5)	403382,46
outlet_tobera (7)	260593,660

Tabla 4-3 Presión total en distintas caras (velocidad de embarcación de 14 m/s)

Con estos datos, se graficó una distribución de presiones normalizada (dividiendo por la presión de la estación 2), el resultado final se muestra a continuación:

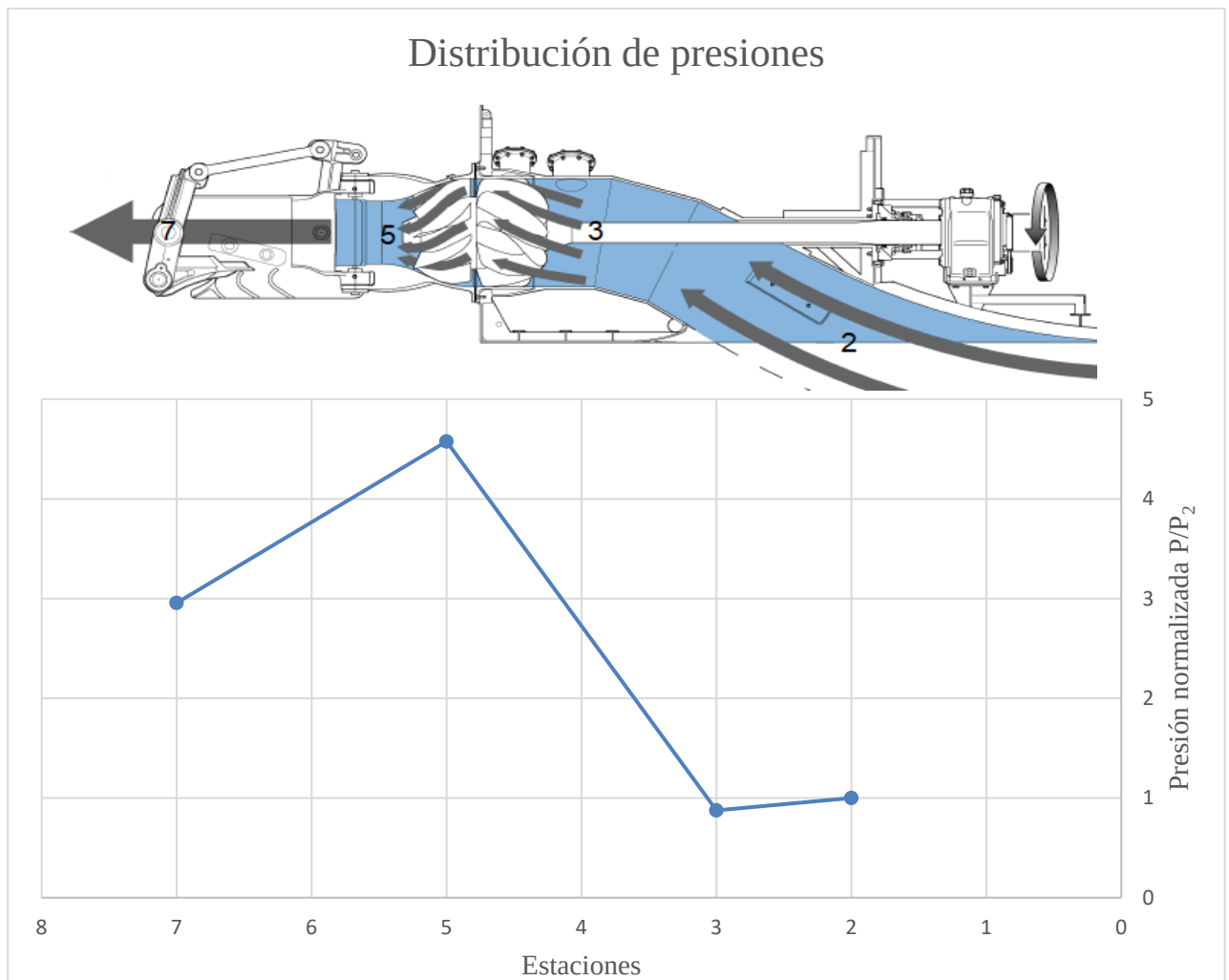


Figura 4-7 Gráfica de distribución de presiones normalizadas según estaciones

Como se observa en la Figura 4-7 la energía del fluido se comporta según lo esperado (Figura 2-12), aumentando drásticamente en su paso por el impulsor y disminuyendo en su paso por la tobera.

Continuando con los resultados, se realizó un ‘plot’ de los valores de la fuerza de empuje que Ansys da como resultado en cada iteración. En la Figura 4-8 se puede ver la curva con todos los valores que se obtienen por cada iteración que va resolviendo el programa.

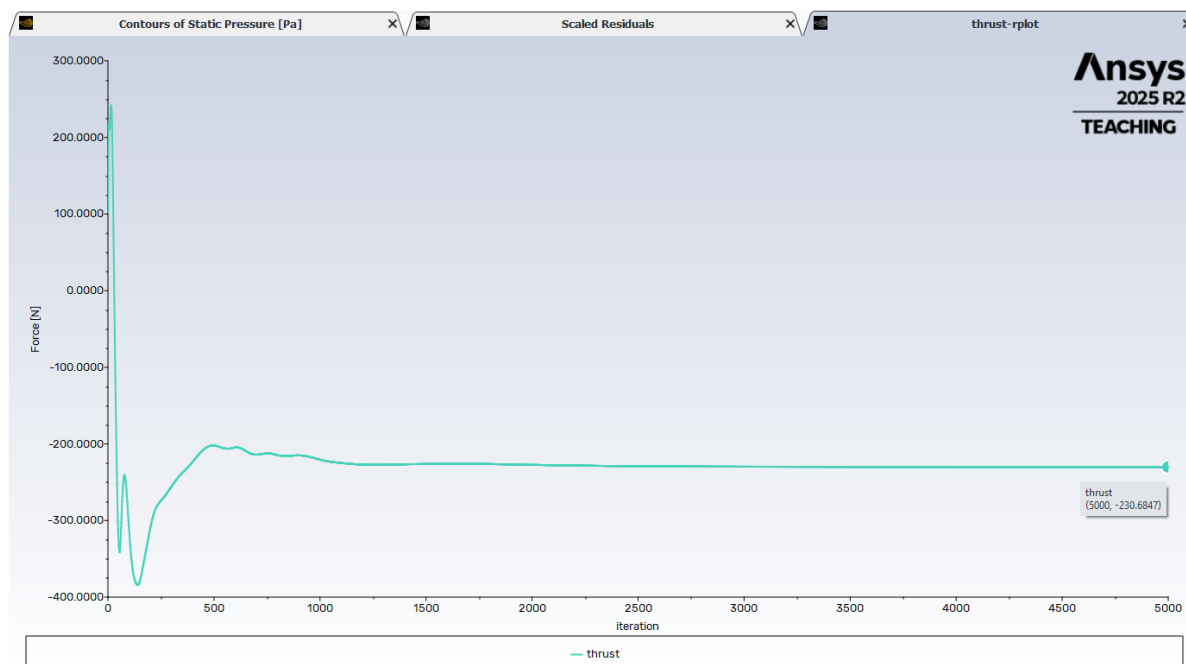


Figura 4-8 Curva de valores de fuerza de empuje

De la Figura 4-8 se puede interpretar que a partir de las 3000 iteraciones, la curva de resultados se mantiene constante, no varía; en consecuencia, con 3000 iteraciones podemos estar seguros que el programa dará valores correctos para los resultados que pidamos.

Finalmente, se obtuvieron los valores de fuerza de empuje (fuerza neta en el eje Z), velocidades de entrada y de salida (eje Z) del sistema de propulsión para diferentes velocidades de embarcación a girando la hélice a una revolución constante de 29600 rpm; para estos casos se realizaron 3000 iteraciones. También, con estas mismas condiciones, se recogieron los datos de presión total en la entrada y salida del impulsor. Los datos se muestran en la Tabla 4-4 y en la Tabla 4-5, la cuales se presentan a continuación:

Velocidad de embarcación (m/s)	Fuerza Empuje (N)	Velocidad Z-Entrada waterjet (m/s)	Velocidad Z-Salida waterjet (m/s)
14	-230,685	13,536	22,450
20	-117,182	19,008	23,910
26	+30,880	23,962	25,323
32	+190,738	28,798	27,444
38	+355,281	33,701	30,293

Tabla 4-4 Fuerza de empuje y velocidades para distintas velocidades de embarcación

El sentido negativo de la fuerza de empuje indica que la fuerza va en el sentido negativo del eje Z, el cual es el sentido de avance de la embarcación. Se observa en la Tabla 4-4 que hasta los 20 m/s la fuerza de empuje es negativa, lo cual quiere decir que el fluido está empujando las paredes del sistema en el sentido de Z negativo. Esto es correcto porque nuestra embarcación se mueve en ese sentido. Esto también se comprueba observando las velocidades de entrada y de salida, se puede ver que las velocidades de salida son mayores que la de entrada; esto significa que el fluido aumenta su energía cinética. Aunque a 26 m/s la velocidad de salida sea mayor que la de entrada, al ser positiva la fuerza de empuje, quiere decir que el sistema ya aporta avance a la embarcación. Se observa que de 32 a 38 m/s las velocidades no aumenta, sino que disminuyen; esto significa que el fluido ya no está generando empuje. Lo último se verifica observando el signo de la fuerza de empuje, que a partir de 32 m/s es positiva, lo que significa que el sistema propulso no tendría la capacidad de producir fuerza de empuje en la dirección de avance de la embarcación para esas velocidades.

Aunque el sistema ya no esté generando empuje a partir de 26 m/s (51 nudos), el propulsor sigue entregando energía al fluido, esto se ve reflejado en la Tabla 4-5, donde se puede ver que la presión en la salida del propulsor siempre es mayor que la entrada. En consecuencia, la hélice está trabajando en el sentido de giro correcto y apartándole energía al fluido.

Velocidad de embarcación (m/s)	Presión total (Pa) entrada impulsor (int_1)	Presión total (Pa) salida impulsor (int_1)
14	77270,672	403382,46
20	170641,02	441804,90
26	299228,90	489072,72
32	461292,56	572773,44
38	653710,32	701785,55

Tabla 4-5 Presión total en las caras del impulsor para distintas velocidades de embarcación

El resultado de que el empuje a partir de 26 m/s sea en el sentido de Z positivo, no es debido a la hélice, porque como ya se ha visto en la Tabla 4-5, esta realiza correctamente su trabajo. Un posible motivo por el cual ya no se genera empuje puede ser debido a que la tobera no le está aportando energía cinética al fluido. Con el fin de obtener el punto en el cual el sistema ya no genera una fuerza de empuje en el sentido de avance de la embarcación (es decir una fuerza de empuje positiva) se realizaron simulaciones variando la velocidad del barco de 0 a 26 m/s, los resultados se pueden ver en el Anexo V: Resultados de distintos parámetros para un rango de velocidad de embarcación.

4.4 Curvas de Rendimiento del impulsor

Como se mencionó en el apartado 2.4 el sistema del waterjet cuenta con un impulsor en su interior, que es una hélice, que cumple la función de una hélice naval convencional. Por lo tanto, se realizaron las curvas de rendimiento y coeficiente de empuje vs coeficiente de avance. Las curvas se hicieron usando las ecuaciones del apartado 2.4.1 y con los datos de la Tabla A5 0-1 (Ver Anexo V: Resultados de distintos parámetros para un rango de velocidad de embarcación. Los valores utilizados para los parámetros constantes son los siguientes:

- Densidad: $998,2 \text{ kg/m}^3$ (Obtenida de la base de datos de Ansys-Fluent)
- Diámetro hélice: $0,04778 \text{ m}$ (Figura 3-22)
- Revoluciones: $494,333 \text{ rps}$ (29660 rpm)

Con estos valores se realizaron las curvas que se muestran a continuación:

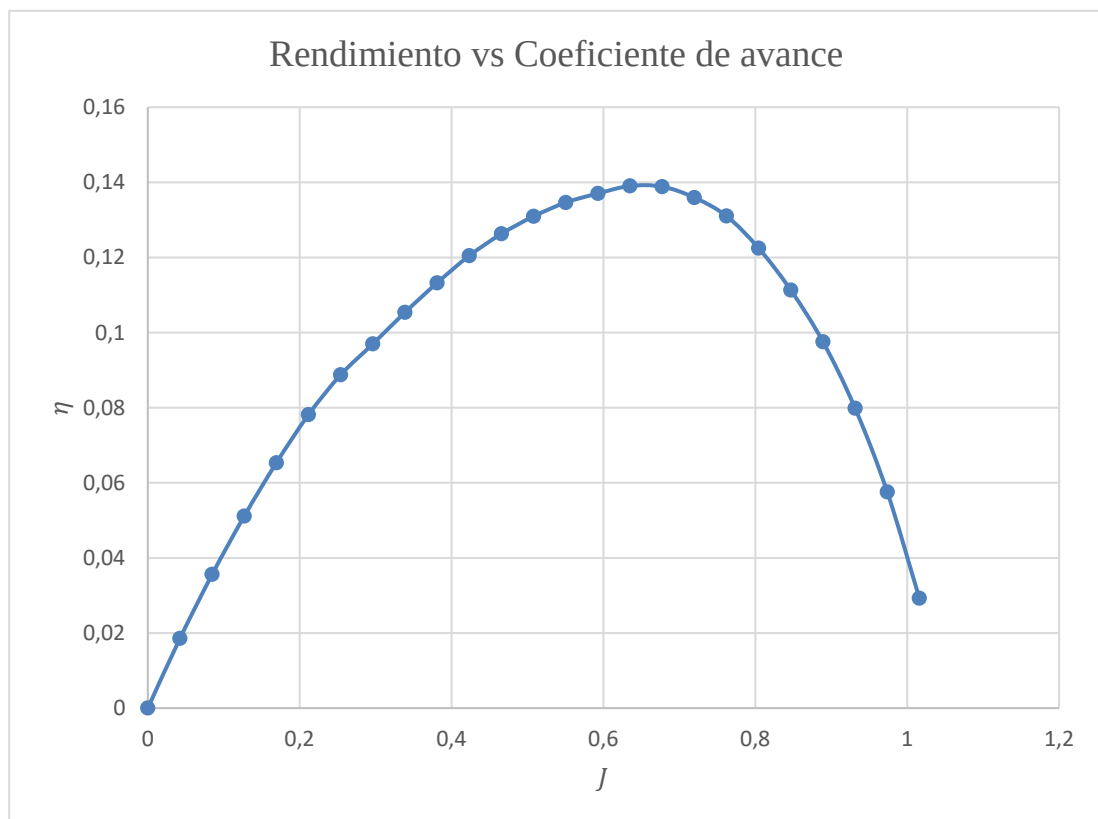


Figura 4-9 Curva de rendimiento vs coeficiente de avance

En la Figura 4-9 se puede ver como el rendimiento de la hélice aumenta hasta su punto de máxima eficiencia (a 18 m/s) para luego disminuir conforme la velocidad aumenta.

Por otro lado en la Figura 4-10 se observa como el coeficiente de empuje disminuye mientras que el coeficiente de avance aumenta. Aumenta hasta llegar prácticamente a 0 punto donde el sentido de la fuerza de empuje cambia y deja de aportar empuje en el sentido de avance de la embarcación.

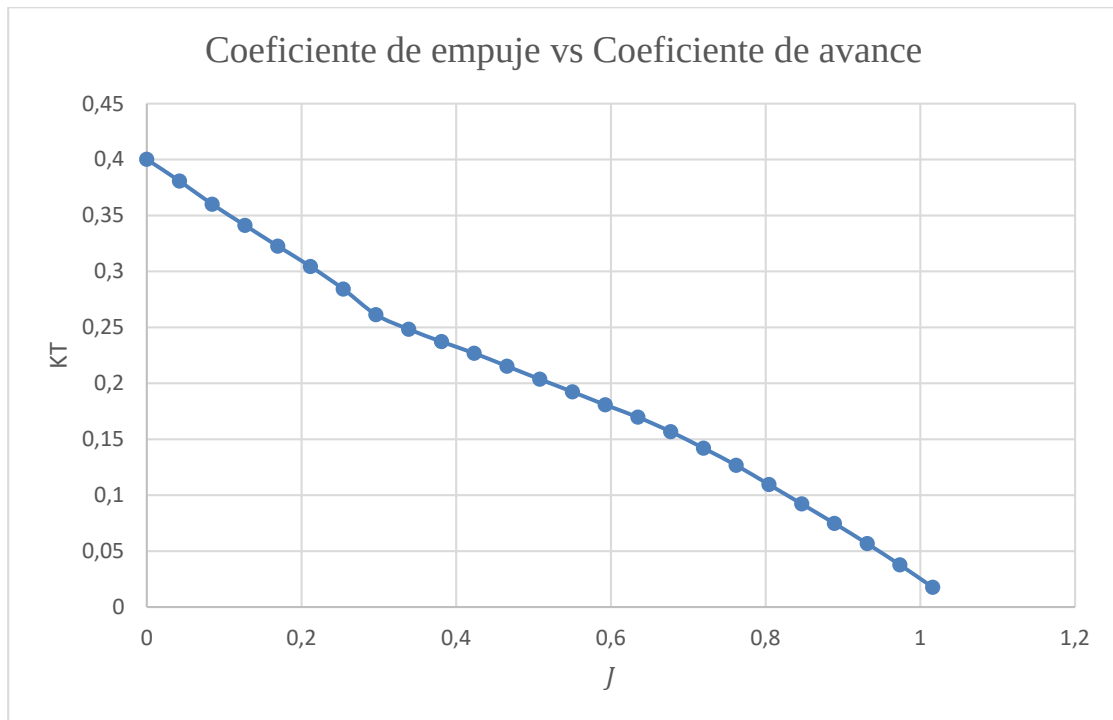


Figura 4-10 Curva coeficiente de empuje vs coeficiente de avance

Ambas figuras anteriores cumplen con el comportamiento de una hélice naval convencional, vistas en la Figura 2-14.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Partiendo de los resultados de contornos de presión y vectores de velocidad (Figura 4-1, Figura 4-2 y Figura 4-3), se llega a la conclusión de que el sentido de giro (eje Z positivo) introducido en la etapa de configuración del software CFD es el correcto, ya que si el hélice (que va incluida dentro del volumen rotatorio al cual se le da el movimiento angular) rotase en el sentido contrario, el programa daría como resultado un ‘reverse flow’ que significa que el fluido no está saliendo por la pared propuesta ($w_{propeller}$). Aunque el cambio de sentido de rotación no se presenta en el presente trabajo, durante las simulaciones realizó dicho cambio, obteniendo como resultado lo que se esperaba: un ‘reverse flow’. Con los vectores de velocidad se concluye que el sistema efectivamente aumenta la velocidad en el sentido axial, proporcionando la variación de la cantidad de movimiento que se ve reflejada en una fuerza de empuje; en adición, el estator cumple la función de rectificar la dirección del fluido después de su paso por el propulsor, esto con el objetivo de lograr una mayor componente de velocidad en el eje Z (axial).

Al conservarse la cantidad de movimiento y la continuidad, podemos concluir que no existen fugas internas en nuestro volumen importado a Ansys Fluent; por lo tanto, la caracterización realizada del waterjet es buena y eficiente para nuestro análisis. Además, podemos deducir que nuestros valores de condiciones de contorno introducidos son los correctos y que el mallado fue desarrollado de manera correcta, permitiendo que los resultados sean válidos y se puedan hacer estudios e interpretaciones del fluido con logros satisfactorios. De la Figura 4-8 podemos obtener el número de iteraciones necesarias para que los alcances obtenidos tengan el menor error posible; concluyendo que el número necesario de iteraciones son 3000 para garantizar la validez de los datos recogidos para el estudio del comportamiento del fluido.

En base a la Figura 4-7, en la que se puede ver como la energía mecánica (usando los valores de la presión total) tiene la misma tendencia que el de la Figura 2-12; concluyéndose que la eficiencia del propulsor waterjet se basa en una correcta selección del impulsor (elemento generador de altura) y el diseño correcto de la tobera (elemento que varía la velocidad drásticamente para generar una variación considerable en la cantidad de movimiento); en consecuencia, ambos elementos deben estar integrados correctamente. En adición, se puede comprobar el análisis del comportamiento del fluido mediante el método de flujo de momento es correcto.

En base a la Tabla 4-4, donde se registran los datos de la fuerza de empuje que realiza el fluido sobre las paredes del waterjet y las velocidades de entrada y salida del sistema, podemos deducir que la velocidad máxima de la embarcación (girando la hélice a 29600 rpm) a la cual el sistema trabaja correctamente y genera una fuerza de empuje que impulsa al bote de radiocontrol es de 26 m/s, que

equivale a 50 nudos. Esta velocidad coincide con las velocidades de crucero de este tipo de naves, las cuales fluctúan entre 50 km/h a 100 km/h o más.

En referencia a los valores registrados en la Tabla 4-5, podemos deducir que aunque el sistema a partir de cierta velocidad ya no es eficiente ya que no genera fuerza de empuje en el sentido de avance, el propulsor siempre trabaja de manera correcta; es decir, aportando energía sobre el fluido; por lo tanto, se puede afirmar que el hecho de que la velocidad de salida sea menor que el de la entrada, es debido al diseño de la tobera, podemos concluir que si se disminuye el diámetro de salida de la tobera, se puede navegar a mayores velocidades. En adición, observando la Tabla A5 0-1, se concluye que la velocidad a partir de la cual el sistema ya no genera la fuerza de empuje en el sentido de avance es 24 m/s.

Finalmente, en base a los resultados y conclusiones anteriores podemos concluir que el estudio sistema de propulsión waterjet con software CFD es el correcto y que tenemos soluciones satisfactorias; cumpliendo con el objetivo del presente trabajo de fin de grado.

5.2 Líneas Futuras

Se propone como primera línea futura el refinamiento de la malla en zonas con geometrías complicadas y liberar de refinamiento en zonas de geometría simple, esto conllevaría añadir tamaños locales de celdas en la etapa de 'Add Local Sizing' durante el mallado, pero concentraría el análisis en zonas de interés y la obtención de mejores resultados. Como segunda línea futura se plantea la validación experimental de los resultados; se propone, mediante el uso de un dinamómetro, calcular las distintas fuerzas de empuje que genera el waterjet al hacer girar la hélice a distintas revoluciones, para comparar estos resultados experimentales, se tendría que hacer una simulación con una velocidad de embarcación de 0 m/s y variando las revoluciones del volumen rotatorio. La tercera línea futura se enfoca en la incorporación del deflector, en este trabajo de fin de grado se ha enfocado en estudiar el comportamiento del fluido a la salida de la tobera, pero una característica importante de un waterjet es poder invertir el sentido de avance usando un el deflector, entonces incluir las paredes del deflector y observar como este afecta la magnitud y sentido de la fuerza empuje es relevante para futuros estudios. Como complemento de la anterior línea futura, se añade el estudio del chorro de agua con distintas direcciones.

Finalmente, se busca que haya un mayor número de resultados de fuerzas, velocidades, etc.; para ello se debe de aumentar el número de simulaciones para tener mayor data de análisis.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Rengel Ortiz, «Terranea,» Terranea, [En línea]. Available: <https://blog.terranea.es/primer-barco-de-vapor-historia/>. [Último acceso: 18 Enero 2026].
- [2] L. de Mazarredo Beutel, Evolución de Propulsión Naval Mecánica, Colegio Oficial de Ingenieros Navales, 1992.
- [3] A. Lara, «Ingeniero marino,» [En línea]. Available: <https://ingenieromarino.com/sistema-de-propulsion-waterjet/>. [Último acceso: 24 febrero 2026].
- [4] New Zealand Maritime Museum, «Jet unit, Hamilton 'Quinnat',» [En línea]. Available: <https://collection.maritimemuseum.co.nz/objects/2226/jet-unit-hamilton-quinnat>. [Último acceso: 15 marzo 2026].
- [5] J. Carlton, Marine Propellers and Propulsion, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2019.
- [6] VICUSdt, «CFD optimización mini waterjet,» VICUSdt, [En línea]. Available: <https://vicusdt.com/caso/cfd-optimization-mini-waterjet/>. [Último acceso: 24 marzo 2026].
- [7] N. Bose, Marine Powering Prediction and Propulsors, New Jersey: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2008.
- [8] J. van Manen y P. van Oossanen, «Propulsion,» de *Principles of Naval Architecture*, New Jersey, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988.
- [9] Kongsberg, «Kongsberg Maritime Kamewa Waterjets,» Kongsberg, [En línea]. Available: <https://www.kongsberg.com/maritime/products/propulsors-and-propulsion-systems/waterjets/>. [Último acceso: 23 marzo 2026].
- [10] Wärtsilä, «Wärtsilä Midsize Waterjet Product Guide,» Wärtsilä Netherlands B.V., 2017.
- [11] S. Jia, Y. Guo, Y. Liu, D. Wei, C. Qu y L. Ma, «Modeling and Analysis of Actuators in Multi-Pump Waterjet Propulsion Systems,» *Journal of Marine Science and Engineering*, Basel, 2025.

- [12] Lockheed Martin , Lockheed Martin, [En línea]. Available: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/littoral-combat-ship-lcs.html>. [Último acceso: 15 marzo 2026].
- [13] Moose Boats, «M1 Diesel Waterjet Catamaran Boats,» Moose Boats, [En línea]. Available: <https://mooseboats.com/boats/m1-diesel-waterjet-catamaran/>. [Último acceso: 15 marzo 2026].
- [14] Marine Luxury , «Cómo funciona una moto de agua,» Marine Luxury, [En línea]. Available: <https://marineluxury.es/como-funciona-una-moto-de-agua/>. [Último acceso: 15 marzo 2026].
- [15] Boat-Ed, «Vista lateral y desde el operador de las partes de una PWC,» Boat-Ed, [En línea]. Available: https://www.boat-ed.com/spanish/studyGuide/Vista-lateral-y-desde-el-operador-de-las-partes-de-una-PWC/102099_149607/. [Último acceso: 15 marzo 2026].
- [16] Coches RC, «Barco teledirigido,» Coches RC, [En línea]. Available: <https://www.cochesrc.com/barco-teledirigido/>. [Último acceso: 15 marzo 2026].
- [17] V. Iñesta i Solà, «Estudio del Sistema Propulsivo Waterjet,» Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2014.
- [18] Kongsberg Maritime, «Steel Waterjet S-4,» Kongsberg Maritime, [En línea]. Available: <https://www.kongsberg.com/maritime/products/propulsors-and-propulsion-systems/waterjets/steel-waterjets/s-4/>. [Último acceso: 15 marzo 2026].
- [19] Rolls Royce, «Rolls-Royce unveils new waterjet range for workboat sector,» 28 noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2018/28-11-2018-rr-unveils-new-waterjet-range-for-workboat-sector.aspx>. [Último acceso: 15 marzo 2026].
- [20] C. Kruppa, G. Dyne, B. Lamberti y K. J. Minsaas, «Report of the waterjet group,» de *Proceeding of the 21st International Towing Tank Conference*, 1996.
- [21] T. van Terwisga, J. G. Hoyt , M. Zangeneh, G. -I. Choi, N. Oloffson, D. Ranocchia y D. Sadovnikov, «Report of the specialist committee on validation of waterjet procedures,» de *Proceedings of the 23rd International Towing Tank Conference*, Venice, 2002.
- [22] MAN Energy Solution, Basic principles of ship propulsion, Copenhagen: MAN Energy Solution, 2023.
- [23] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, Fluid Mechanics. Fundamentals and applications, New York: McGraw-Hill Education Global Holdings LLC, 2018.
- [24] H. K. Versteeg y W. Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volumen Method, Harlow: Pearson Education, 2007.
- [25] J. M. de Vehí Sarrazin, «Mallado de geometrías complejas mediante CFD,» Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2016.
- [26] A. Bakker, «Lectures on Applied Computational Fluid Dynamics,» 2008. [En línea]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.bakker.org/Lectures-Applied-CFD.pdf>. [Último acceso: 20 Febrero 2026].

- [27] «Ingenieros Asesores,» 26 Julio 2022. [En línea]. Available: <https://ingenierosasesores.com/actualidad/ingenieria-inversa-concepto-aplicaciones/>. [Último acceso: 18 Febrero 2026].
- [28] G. Candía, «Diseño e impresión 3D de empuñaduras personalizadas,» Repositorio institucional del CUD en la ENM , Vigo, 2019-2020.
- [29] Y. López Rey, «Diseño de atalaje para la sujeción de visores nocturnos al casco COBAT mediante ingeniería inversa,» Repositorio institucional del CUD en la ENM , Vigo, 2021-2022.
- [30] AESUB, «Ficha técnica: AESUB Blue-espray de escaneo evaporable,» AESUB, 2021.
- [31] Ansys, «Ansys Innovation Space,» Ansys, 2026. [En línea]. Available: <https://innovationspace.ansys.com/product/ansys-fluent-meshing-watertight-workflow/>. [Último acceso: 20 febrero 2026].
- [32] A. Eslamdoost, The Hydrodynamics of Waterjet/Hull Interaction, Gothenburg: Chalmers Reproservice, 2014.
- [33] X. Du, «A numerical investigation of using vortex generators to improve a flush waterjet performance,» University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 2024.
- [34] Navarro y Soler CAD-PLM Software, «Workflow Watertight en Fluent Meshing | Guías rápidas de Ansys Fluent,» 5 abril 2023. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=xUZ7ghpOwOw>. [Último acceso: 5 marzo 2026].
- [35] HWAMUNG, «Expert Guide 2026: What is kV on a Brushless Motor & 3 Costly Mistakes to Avoid,» HWAMUNG, 4 febrero 2026. [En línea]. Available: <https://www.hmzjmotor.com/it/what-is-brushless-motor-kv/>. [Último acceso: 12 marzo 2026].
- [36] K. Hardy, «Lander Lab #5: Lithium Polymer Batteries,» Marine Technology, 28 diciembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.marinetechologynews.com/news/lander-lithium-polymer-batteries-624909>. [Último acceso: 12 marzo 2026].
- [37] J. de Cock, T. van Beek, L. Muilwijk, R. Verbeek y J. Poelmann, «Wärtsilä waterjets offer powerful and versatile propulsion solutions,» Wärtsilä Technical Journal, 2011.
- [38] M. Altosole, G. Benvenuto, M. Figari y U. Campora, «Dimensionals Numerical Approaches for the Perfomance Prediction of Marine Waterjet Propulsion Units,» International Journal of Rotating Machinery, 2012.

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

La finalidad del presente Trabajo de Fin de Grado es realizar el análisis fluidodinámico de un sistema de propulsión tipo waterjet (chorro de agua) mediante el uso de herramientas CFD. Aunque el estudio se desarrolla a nivel teórico y computacional, presente implicaciones en el ámbito social, económico y ambiental.

En el ámbito ambiental, los sistemas hidrojet presentan ventajas frente a los sistemas convencionales de hélice, como la reducción de daños en la fauna marina ya que el sistema no presenta apéndices externos rotativos. Sin embargo, el aumento de la velocidad puede tener cierto impacto como la generación de alteraciones locales en el entorno acuático y posibles incrementos del ruido subacuático. Asimismo, el uso de herramientas computacionales permite optimizar diseños sin necesidad de ensayos experimentales intensivos, minimizando consumo de materiales.

En cuanto a las implicaciones económicas, el uso de herramientas CFD permite reducir significativamente los costos en materiales frente a estudios experimentales que requieren una gran inversión en prototipos y maquinarias. Esto supone una mejora en la eficiencia del proceso de diseño en la industria naval. En el ámbito industrial, este tipo de investigaciones contribuye al desarrollo de tecnologías más eficientes y competitivas en el sector marino y naval, lo cual permite una mejora en el rendimiento energético y sostenibilidad.

Finalmente, desde el punto de vista de seguridad, los sistemas waterjet son sistemas que presentan una mayor seguridad operativa que reduce el riesgo de accidentes en operaciones con personas, debido a que no presentan hélices expuestas.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

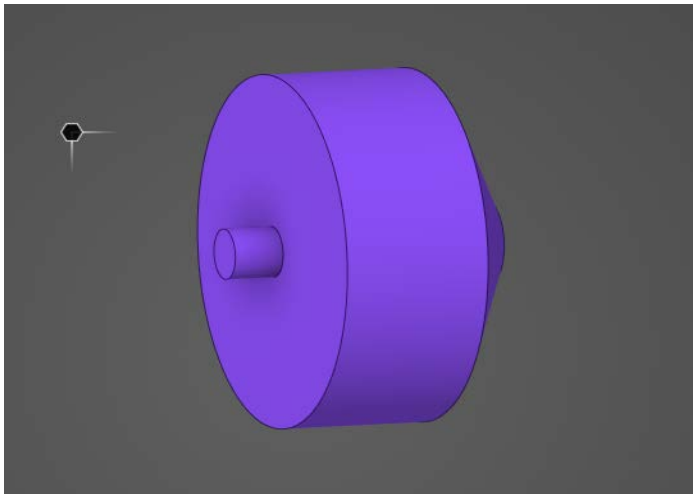
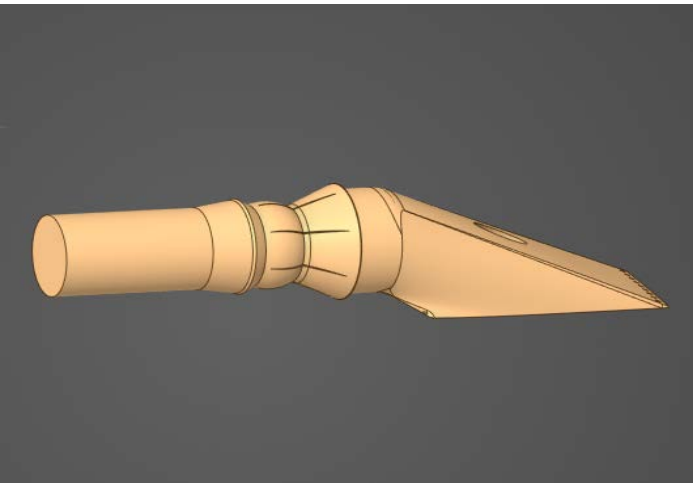
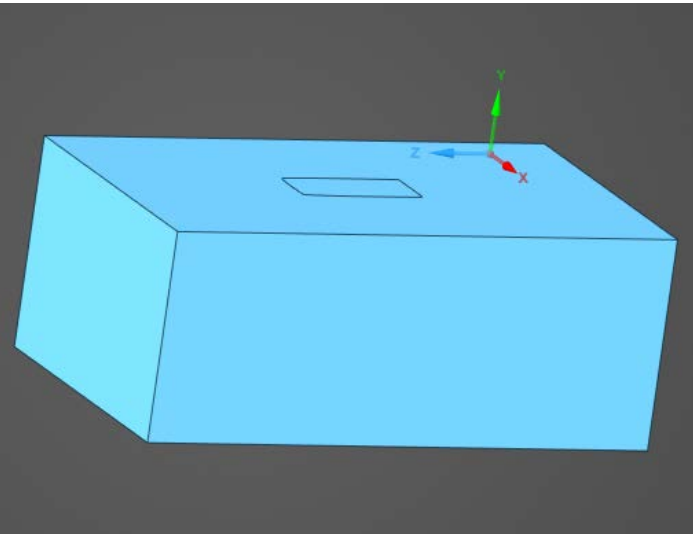
El desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado implica el uso de herramientas computacionales avanzadas para el análisis del comportamiento de fluidos en sistemas de propulsión naval. Desde el punto de vista ético, es importante garantizar que los resultados recogidos mediante las simulaciones computacionales sean interpretados de forma rigurosa y responsable, evitando conclusiones erróneas. De la misma manera, el uso de estas herramientas conlleva la responsabilidad de comprender las limitaciones de los modelos de simulación, como simplificaciones geométricas, condiciones de contorno, que pueda afectar la precisión de los resultados.

Desde un punto de vista social, el desarrollo de sistemas de propulsión más eficientes contribuye a la reducción del consumo energético y; por tanto, a la disminución en el impacto medioambiental debido al transporte marítimo. Además, el uso de waterjets mejora la seguridad en determinadas aplicaciones como su uso en embarcaciones de rescate o recreativas.

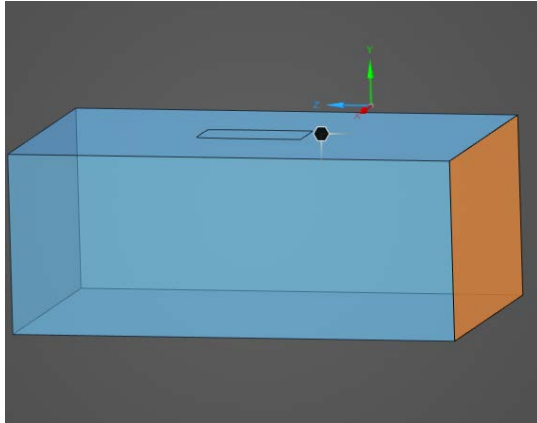
Para finalizar, el presente trabajo pone de manifiesto la importancia de la formación técnica y ética del ingeniero, quien debe tener la capacidad de aplicar sus conocimientos de forma responsable, teniendo en cuenta no solo aspectos técnicos sino también las consecuencias sociales.

ANEXO III: SECCIONES NOMBRADAS EN ANSYS DISCOVERY

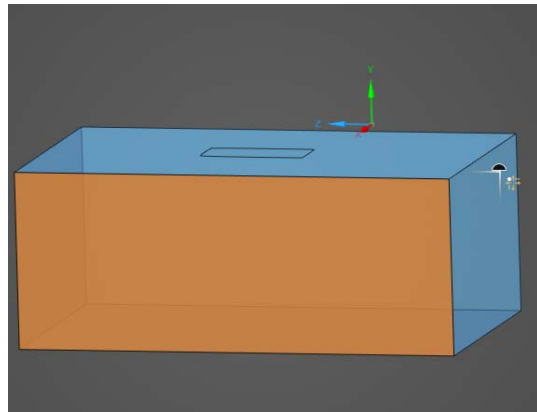
En este Anexo se muestran las imágenes y el tipo de sección de todas las secciones nombradas en la etapa de geometría realizada en Ansys Discovery.

Sección	Tipo	Imagen
f3d_rot	Volumen	
f3d_stat	Volumen	
f3d_pre	Volumen	

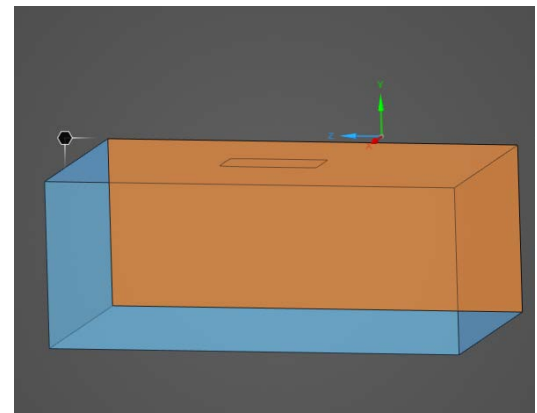
w_inlet Superficie



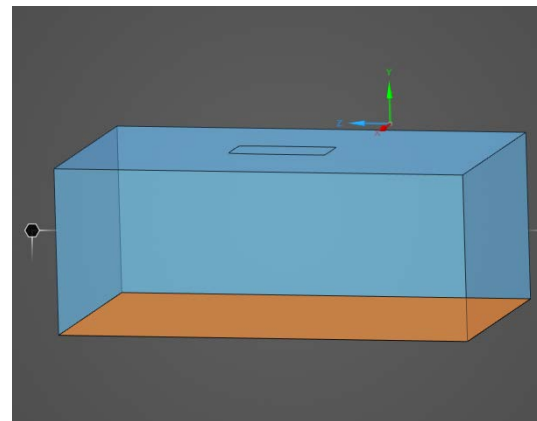
w_stb Superficie



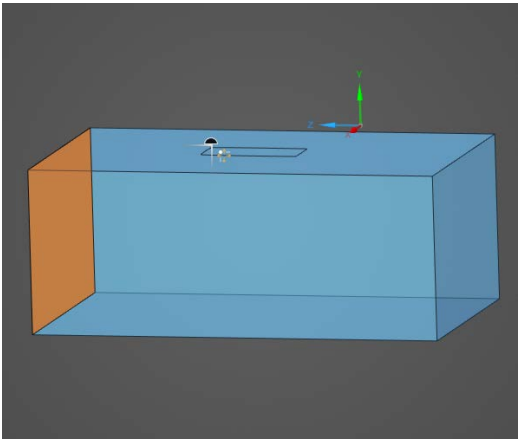
w_port Superficie



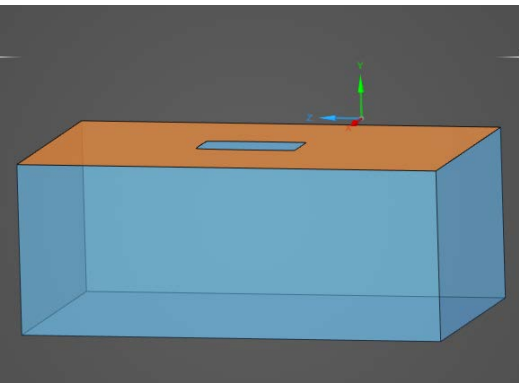
w_bottom Superficie



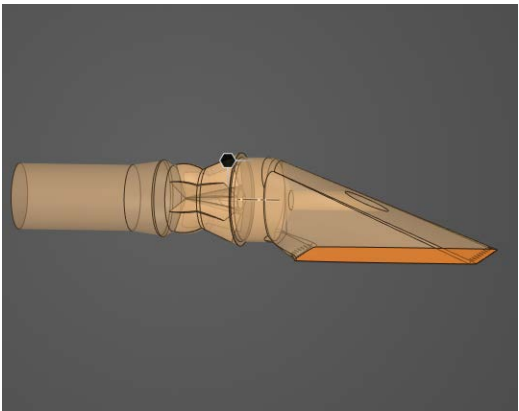
w_outlet Superficie



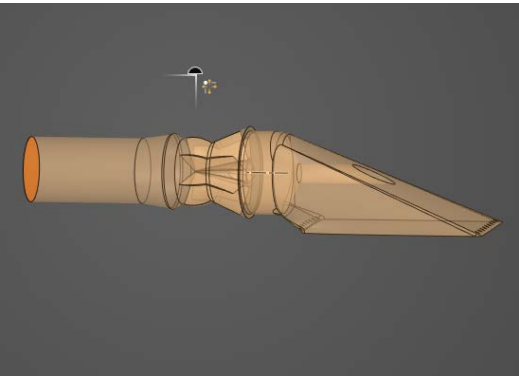
w_top Superficie



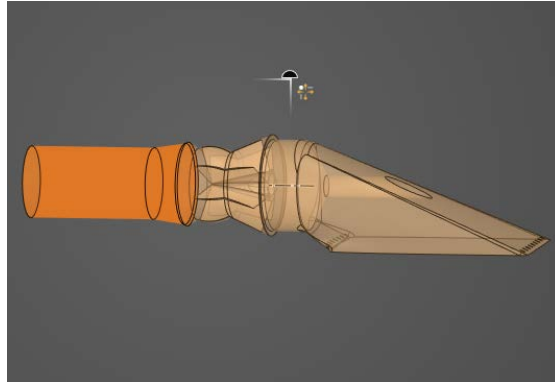
int_body Superficie



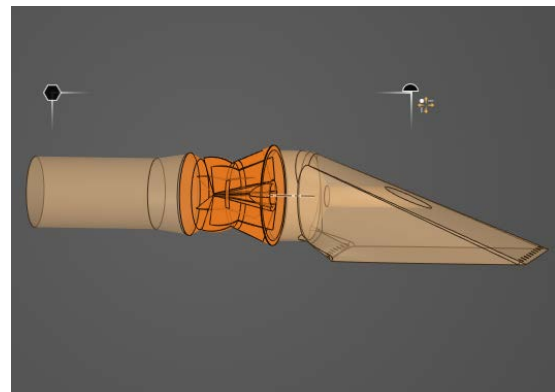
outlet_tobera Superficie



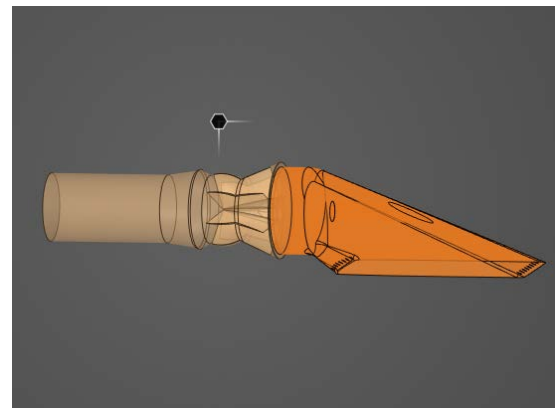
w_tobera Superficie



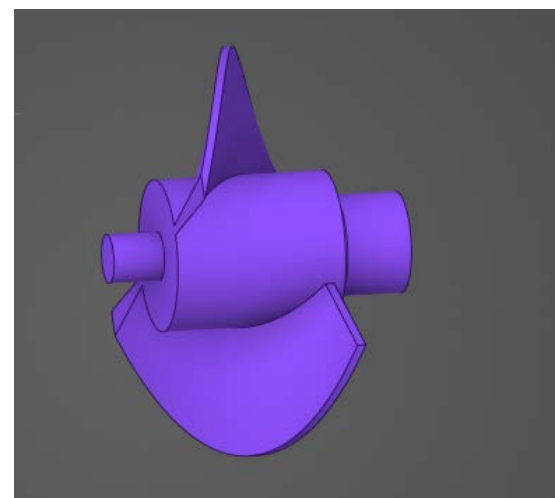
w_stator Superficie



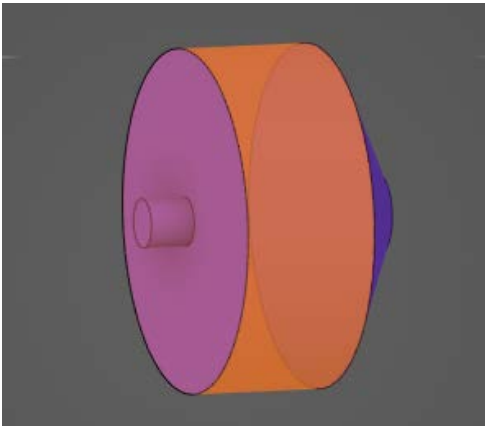
w_body Superficie



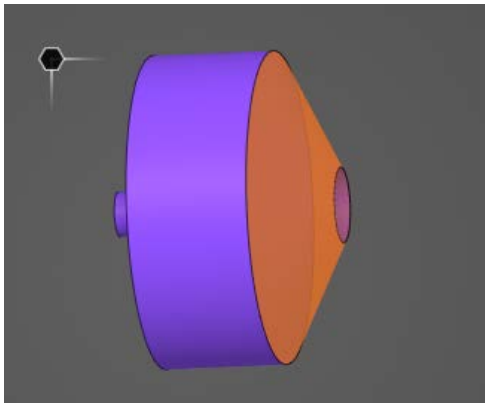
w_propeller Superficie



int_cil Superficie



int_1 Superficie



int_2 Superficie

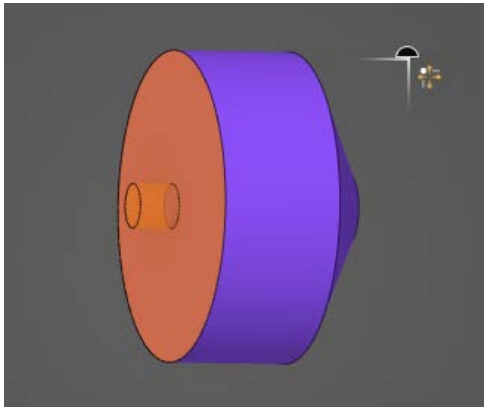


Tabla A3 0-1 Secciones en nombras en Ansys Discovery

ANEXO IV: DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL PROPULSOR MSQ 50 MM 7075 2 PALAS

El presente Anexo muestra una captura de pantalla de la página web donde se realizó la compra del propulsor waterjet para barcos de radiocontrol. En la Figura A4-0-1 se pueden ver descripciones técnicas del propulsor waterjet.

AliExpress

Valoraciones (3) Detalles Descripción Tienda Te podría interesar

41.85/piece  Propulsor de agua con chorro con USD 33.95-237.95/set	65.95/piece  Bomba de chorro de agua MSQ de 40mm. USD 64.95-109.95/piece	27.35/piece  MSQ-Jorro de agua de 50mm con hélice de 2 USD 70.36-132.84/piece	45.45/piece  Bomba de chorro de agua de 28mm. USD 39.56-60.26/piece
--	--	---	---

MSQ 50mm Jet de agua con 7075 2 palas Propulsor de agua de hélice con hebilla inversa Eje de 6mm / 8mmAcoplamiento para RC modelo Jet Boat

100% nuevo
Cantidad del paquete: 1 juego
El material de la hélice cnc de 2 palas es 7075.
Consejos: Hay un dispositivo sellado a prueba de agua dentro de la funda del eje, que puede garantizar un 100% de impermeabilidad.Por lo tanto, es normal que quede ligeramente apretado al girar.No afecta el uso.
Si necesitas material más resistente bajo la luz del sol, puedes elegir 002 o 004.
Cantidad del paquete: 1 unidad
El material de la hélice cnc de 2 palas es 7075.
El empuje máximo del chorro de agua supera los 17 kg.
El diámetro del eje interior es de 6 mm.
El material del eje interior es acero inoxidable 316.
Para barcos de 90cm a 150cm.
La distancia de montaje del motor es de 30 mm/m4, el motor 5684/5694/56104 es bueno.KV500 a 1000, lipo de 6S a 8S está bien.
El rodamiento dentro del tubo del eje es de acero inoxidable.
El tamaño del acoplamiento es de 6 mm a 8 mm.
La longitud extendida del eje del motor de 25 mm a 30 mm es buena.
El soporte para servo es un soporte para servo estándar. Puedes conseguir el servo fácilmente. 9 a 15 kg está bien.

Figura A4-0-1 Captura de pantalla de la descripción técnica del propulsor waterjet MSQ 50mm

ANEXO V: RESULTADOS DE DISTINTOS PARÁMETROS PARA UN RANGO DE VELOCIDAD DE EMBARCACIÓN

En el presente apartado se recogen los valores de los resultados de la fuerza de empuje (N), par en la hélice (Nm), velocidad (eje Z) en la toma y velocidad (eje Z) en la salida de la tobera, para el rango de velocidad de 0 a 24 m/s y una velocidad angular de la hélice de 29660 rpm.

Velocidad de embarcación (m/s)	Fuerza Empuje (N)	Par en la hélice (Nm)	Velocidad Z-Entrada waterjet (m/s)	Velocidad Z-Salida waterjet (m/s)
0	- 508,648	-8,492	-0,104	20,801
1	-483,945	-8,401	0,859	20,783
2	-457,564	-8,282	1,843	20,780
3	-433,664	-8,192	2,826	20,739
4	-410,048	-8,085	3,805	20,728
5	-386,952	-7,971	4,782	20,700
6	-361,265	-7,864	5,758	20,668
7	-332,129	-7,720	6,735	20,594
8	-315,609	-7,715	7,713	20,727
9	-301,521	-7,716	8,689	20,985
10	-288,379	-7,708	9,663	21,287
11	-273,670	-7,675	10,635	21,564
12	-258,883	-7,639	11,605	21,832
13	-244,558	-7,604	12,572	22,108
14	-229,738	-7,557	13,535	22,400
15	-215,722	-7,493	14,491	22,735
16	-199,243	-7,392	15,432	23,023
17	-180,518	-7,268	16,352	23,268
18	-161,042	-7,123	17,255	23,503
19	-139,185	-6,953	18,138	23,692
20	-117,184	-6,780	19,007	23,907
21	-95,059	-6,589	19,861	24,132
22	-72,030	-6,390	20,703	24,370

23	-47,977	-6,173	21,532	24,600
24	-22,491	-5,940	22,350	24,835
25	+4,160	-5,690	23,157	25,064
26	+30,793	-5,442	23,961	25,318

Tabla A5 0-1 Fuerza de empuje, par y velocidades para un rango de velocidad de embarcación