

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Análisis del efecto del espesor de la capa límite sobre sensores de velocidad en el submarino DARPA Suboff-5470 usando OpenFOAM

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Naval

Presentado por:

Daniel Ronny Miranda Morán

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

Este proyecto lo dedico a mis padres, Mirna y Washington quienes gracias su incondicional apoyo fueron pilares fundamentales en mi formación académica desde temprana edad y son los responsables de mis triunfos.

A mi enamorada, Morelia, que es un motor en mi vida, siempre dándome apoyo y es la causa de mis alegrías.

A mis dos grandes amigas que me ha dado la universidad, Laura y Génesis, siempre confidentes, siempre leales.

AGRADECIMIENTOS

Gratitud antes que todo a Dios que sin Él no hubiera podido lograr lo que hasta hoy he logrado. Gracias por las aventuras, experiencias, amistades, las pasantías y oportunidades laborales durante el transcurso de la universidad.

Mi más sincero agradecimiento a mis padres que sin haber culminado sus estudios inculcaron en mí el deseo y las ganas de triunfar profesionalmente. Agradezco su confianza y su voto depositado en mí para ser el primer profesional de la familia y ser guía para generaciones venideras.

A mis profesores de facultad que son los artífices de los conocimientos adquiridos a lo largo de estos años en la carrera. Mi más sincero agradecimiento por la paciencia de muchas ocasiones y el apoyo para mi viaje a Madrid de pasantías.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Daniel Ronny Miranda Morán doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Daniel Ronny Miranda Morán

EVALUADORES



Firmado electrónicamente por:
**NADIA ROSENDA
MUNOZ AGILA**

Nadia Muñoz Agila, M.Sc
PROFESOR DE LA MATERIA



Firmado electrónicamente por:
**RUBEN JOSE
PAREDES
ALVARADO**

Rubén Paredes Alvarado, Ph.D
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La flota ecuatoriana cuenta con dos submarinos que utilizan sensores de velocidad electromagnéticos para la estimación de su posición cuando operan sumergidos en el mar. La precisión de estos dispositivos condiciona la seguridad de las operaciones en mar y dependen de su calibración mediante pruebas de mar, lo cual demanda tiempo y dinero. En este trabajo se explora la factibilidad de cuantificación del efecto de la capa límite sobre los sensores de velocidad mediante simulaciones CFD usando OpenFOAM en el modelo de submarino DARPA SUBOFF-5470, como una propuesta para disminuir los costos de estudios.

Se ejecutaron simulaciones numéricas en el Cluster HPC-MODEMAT de la EPN e incluyeron el uso de funciones cercanas de pared implementando el modelo Low Reynolds-number. Siguiendo recomendaciones de la ITTC se validó la condición del número de Froude 0.47 y una profundidad de H/D: 5.4 con una malla de 1'455,715 millones de elementos, obteniendo una incertidumbre de validación 4.35%. Se evaluó el efecto de la capa límite sobre las paredes sólidas del submarino al 14% y 19% de la eslora utilizando dos condiciones adicionales de navegación a los números de Froude 0.13 y 0.31 a la misma profundidad.

Se determinó numéricamente que el número de Reynolds no afecta significativamente la distribución del coeficiente de presión en la superficie del submarino. Finalmente, las predicciones numéricas de la distribución de velocidades dentro de la capa límite generaron resultados cercanos a los experimentales realizados en túneles de viento, obteniendo un espesor de capa límite del 2% del radio máximo.

Palabras Clave: simulación numérica, ITTC, capa límite, sensores de velocidad electromagnéticos, funciones cercanas de pared.

ABSTRACT

The Ecuadorian fleet has two submarines that use electromagnetic speed sensors to estimate their position when operating submerged in the sea. The precision of these devices conditions the safety of operations at sea, and they depend on their calibration through sea trials, which requires time and money. This work explores the feasibility of quantifying the effect of the boundary layer on speed sensors through CFD simulations using OpenFOAM in the DARPA SUBOFF-5470 submarine model, as a proposal to reduce study costs.

Numerical simulations were run in the EPN's HPC-MODEMAT Cluster and included the use of near wall functions implementing the Low Reynolds-number model. Following ITTC recommendations, the condition of the Froude number 0.47 and a depth of H/D : 5.4 were validated with a mesh of 1'455.715 million elements, obtaining a validation uncertainty of 4.35%. The effect of the boundary layer on the solid walls of the submarine at 14% and 19% of the length was evaluated using two additional navigation conditions at Froude numbers 0.13 and 0.31 at the same depth.

It was determined numerically that the Reynolds number does not significantly affect the pressure coefficient distribution on the surface of the submarine. Finally, the numerical predictions of the velocity distribution within the boundary layer generated results close to the experimental ones carried out in wind tunnels, obtaining a boundary layer thickness of 2% of the maximum radius.

Keywords: *numerical simulation, ITTC, boundary layer, electromagnetic speed sensors, near wall functions.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema.....	3
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Marco teórico	4
1.4.1 Sensor de velocidad electromagnético.....	4
1.4.2 Ley de Faraday	5
1.4.3 Capa límite	6
1.4.4 Espesor de la capa límite	8
1.4.5 Descripción del submarino SUBOFF.....	9
1.4.6 Simulaciones CFD.....	10
1.4.7 OpenFOAM	10
CAPÍTULO 2.....	13
2. METODOLOGÍA	13
2.1 Ecuaciones gobernantes de la mecánica de fluidos	13

2.1.1	Ecuaciones de la conservación de la masa	13
2.1.2	Ecuaciones de la conservación de la cantidad de movimiento lineal	13
2.2	Metodología numérica	14
2.2.1	Descripción de métodos numéricos	16
2.2.2	Selección del método numérico	16
2.2.3	Diagrama de flujo de trabajo CFD	18
2.3	Hipótesis del fluido.....	18
2.4	Introducción al CFD	19
2.5	Pre-procesamiento de datos.....	19
2.5.1	Definición de la geometría.....	20
2.5.2	Discretización del dominio - Mallado	21
2.5.3	Condiciones iniciales o de frontera	25
2.6	Especificaciones de OpenFOAM	26
2.6.1	Directorio "0"	27
2.6.2	Directorio "CONSTANT"	28
2.6.3	Directorio "SYSTEM"	28
2.7	Funciones de pared	29
2.7.1	Importancia del uso de funciones de pared.....	29
2.7.2	La región de la pared cercana.....	29
2.7.3	Low-Reynolds-Number (LRN)	33
2.7.4	Selección de funciones cercanas de pared en OpenFOAM.....	34
2.8	Solución de Prandtl y Blasius de la capa límite	35
2.9	Post procesamiento	36
2.9.1	Cálculo de la resistencia al avance	37
2.9.2	Validación y Verificación	38
CAPÍTULO 3.....		46

3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	46
3.1	Condiciones para el análisis de convergencia y simulaciones.....	42
3.2	Estimación teórica del espesor de la capa límite	43
3.3	Estimación del y^+ teórico.....	44
3.4	Cálculo de los parámetros de la turbulencia	45
3.5	Validación y verificación del mallado	46
3.5.1	Generación del mallado	47
3.5.2	Distribución del número de capas superficiales	48
3.5.3	Resultados de la convergencia	49
3.5.4	Resultados de Validación y Verificación recomendado por ITTC.....	55
3.6	Análisis de las condiciones de navegación usando Funciones cercanas de pared.....	57
3.6.1	Distribución de y^+	60
3.6.2	Distribución del coeficiente de presión	62
3.6.3	Distribución del coeficiente friccional.....	64
3.7	Comparación Funciones de pared vs Funciones cercanas de pared	66
3.8	Perfil de velocidades dentro de la capa límite.....	69
3.9	Análisis de presupuesto.....	75
3.9.1	Desglose de costos unitarios	75
3.9.2	Presupuesto Total	78
	CAPÍTULO 4.....	80
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
4.1	Conclusiones	80
4.2	Recomendaciones	81

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
EPN	Escuela Politécnica Nacional de Quito
CFD	Computational Fluid Dynamics
RANS	Reynolds Average Navier-Stokes
DARPA	Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa
ITTC	International Towing Tank Conference
DNS	Direct Numerical Simulation
LES	Large Eddy Simulation
LRN	Low Reynolds-number
HRN	High Reynolds-number
STL	STereoLithography
HPC	High performance Computing

SIMBOLOGÍA

m	Metro
cm	Milímetro
cm	Centímetro
N-S	Navier Stokes
Fn	Número de Froude
Re	Número de Reynolds
g	Gravedad terrestre
U	Velocidad
Ue	Velocidad de corriente
δ	Espesor de capa límite

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Detalles generales del sensor de velocidad.....	5
Figura 1.2 Diagrama eléctrico del sensor	6
Figura 1.3 Desarrollo de capa límite	8
Figura 1.4 Descripción básica de la estructura de OpenFOAM	11
Figura 2.1 Estructura del volumen de control	13
Figura 2.2 Configuración típica de un clúster de alto rendimiento	15
Figura 2.3 Diagrama de flujo de simulación numérica	18
Figura 2.4 Aspectos fundamentales del preprocesamiento	20
Figura 2.5 Proceso para la creación de la geometría	20
Figura 2.6 Dominio computacional de las simulaciones numéricas	21
Figura 2.7 Malla del DARPA SUBOFF 5470	22
Figura 2.8 Ley Pared	24
Figura 2.9 Directorios de OpenFOAM.....	27
Figura 2.10 Relación entre y^+ y u^+ en tres partes de la región interior	30
Figura 2.11 Verificación de las leyes de la capa interna, externa y de superposición que relacionan los perfiles de velocidad en un flujo de pared turbulento.....	32
Figura 2.12 Descripción de funciones de pared y funciones cercanas de pared.	33
Figura 2.13 Estrategias típicas de malla cerca de la pared usando LRN Y HRN	34
Figura 2.14 Implementación de funciones cercanas de pared en OpenFOAM.....	35
Figura 3.1 Configuraciones de popa del submarino DARPA SUBOFF-5470.....	42
Figura 3.2 Definición de las configuraciones del modelo	42
Figura 3.3 Script SnappyHexMeshDict para $Fn= 0.47$	45
Figura 3.4 Script k para malla fina $Fn= 0.47$	46
Figura 3.5 Script nut para malla fina $Fn= 0.47$	46
Figura 3.6 Script omega para malla fina $Fn= 0.47$	46
Figura 3.7 Vista XZ Mallas fina, intermedia y gruesa.....	48
Figura 3.8 Número de capas superficiales para las 3 condiciones de análisis usando funciones de pared	49
Figura 3.9 Residuales mallas fina (superior), intermedia y gruesa (inferior) usando funciones de pared para $Fn= 0.47$ y $H/D= 5.4$	51

Figura 3.10 Resistencia total en mallas fina, intermedia y gruesa usando funciones de pared para $F_n= 0.47$ y $H/D= 5.4$	52
Figura 3.11 Residuales mallas fina (superior), intermedia y gruesa (inferior) usando funciones cercanas de pared para $F_n= 0.47$ y $H/D= 5.4$	53
Figura 3.12 Resistencia total en mallas fina, intermedia y gruesa usando funciones cercanas de pared para $F_n= 0.47$ y $H/D= 5.4$	54
Figura 3.13 Profundidad $H/D=5.4$ para análisis del modelo.....	57
Figura 3.14 Resistencia total para resultados experimentales y numéricos.	58
Figura 3.15 Residuales de las condiciones de navegación para distintos números de Froude.	59
Figura 3.16 Distribución del parámetro y^+ usando funciones cercanas de pared.....	61
Figura 3.17 Distribución del parámetro y^+ usando funciones de pared	62
Figura 3.18 Distribución de presión dinámica para los números de Froude considerados usando funciones cercanas de pared.....	63
Figura 3.19 Distribución del coeficiente friccional para los tres números de Froude considerados usando funciones cercanas de pared.....	65
Figura 3.20 Comparación número de capas superficiales	66
Figura 3.21 Comparación parámetro y^+	67
Figura 3.22 Comparación de mallado alrededor del casco.....	68
Figura 3.23 Mallado cercano a la pared sólida	69
Figura 3.24 Resultados experimentales del perfil de capa límite a distintas posiciones a proa del modelo DARPA SUBOFF	70
Figura 3.25 Posiciones de análisis numérico de capa límite.....	71
Figura 3.26 Perfil de velocidades numérico para $x/L: 0.14$ y 0.19	72
Figura 3.27 Perfil de velocidad numérico de capa límite para $x/L: 0.14$ y 0.19	73
Figura 5.1 Instaladores requeridos	87
Figura 5.2 Creación del usuario de máquina virtual y sistema operativo.....	88
Figura 5.3 Capacidad de memoria RAM para la máquina virtual.....	89
Figura 5.4 Asignación de nombre y espacio del disco	90
Figura 5.5 Creación del disco	90
Figura 5.6 Selección del instalador del sistema operativo Ubuntu.....	91
Figura 5.7 Configuración de Ubuntu	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Características del modelo.....	9
Tabla 2.1 Diccionarios principales en BlockMeshDict.....	22
Tabla 2.2 Funciones cercanas de pared para cada parámetro de turbulencia	34
Tabla 2.3 Resultados integrales de una placa lisa para varios perfiles de velocidad de flujo laminar supuestos	36
Tabla 3.1 Selección de variable para validación.....	42
Tabla 3.2 Estimación del espesor de la capa límite usando solución de Blasius.....	43
Tabla 3.3 Estimación teórica del y^+	44
Tabla 3.4 Parámetros de turbulencia	45
Tabla 3.5 Dimensiones de las mallas seleccionadas.....	47
Tabla 3.6 Resultados de resistencia al avance usando funciones de pared.....	51
Tabla 3.7 Resultados de resistencia al avance usando funciones cercanas de pared	53
Tabla 3.8 Coeficiente total de resistencia usando Funciones de pared	55
Tabla 3.9 Coeficiente total de resistencia usando Funciones cercanas de pared	55
Tabla 3.10 Verificación de la resistencia total al avance usando Funciones de Pared	56
Tabla 3.11 Verificación de la resistencia total al avance usando Funciones cercanas de Pared	56
Tabla 3.12 Validación de la simulación numérica usando Funciones de pared.....	56
Tabla 3.13 Validación de la simulación numérica usando Funciones cercanas de pared.....	56
Tabla 3.14 Condiciones de navegación	57
Tabla 3.15 Resultados de la resistencia total para todas las condiciones de análisis.....	58
Tabla 3.16 Coordenadas de puntos que definen las posiciones de análisis del perfil de velocidad de capa límite	71
Tabla 3.17 Variables adimensionalizadas.....	74
Tabla 3.18 Comparación estimación del espesor capa límite numérico y teórico.....	74
Tabla 3.19 Presupuesto total del proyecto.....	79

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Los submarinos son vehículos marinos que usan sensores de velocidad como único medio para estimar su posición cuando están totalmente sumergidos. Estos dispositivos pueden usar sondas electromagnéticas y son ubicados, en la parte externa del casco, en una posición donde el flujo de agua sea continuo, sin burbujas y libre de estructuras de vórtices. Estos sensores aprovechan el principio electromagnético a través de un conductor (el agua), creando un campo magnético en el que se induce un voltaje proporcional a la velocidad del submarino. La medición de la velocidad es estimada a partir del flujo másico de agua que atraviesa el campo magnético alrededor de la sonda. Este flujo másico se ve disminuido por presencia de la capa límite y su efecto puede ser significativo, a pesar de esto no existen estudios numéricos que evalúen el efecto sobre la precisión de estos sensores.

Para el análisis del efecto del espesor de la capa límite en la precisión de las mediciones, lo más recomendable es realizar pruebas experimentales, pero esta opción puede resultar costosa y tomar mucho tiempo. Una de las alternativas económicas en la etapa de diseño preliminar es la realización de simulaciones numéricas usando la técnica Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés). Sin embargo, el costo computacional es un factor importante que se debe considerar cuando se realiza este tipo de simulaciones numéricas y una forma de ahorrar este costo es realizando un análisis de la mitad del dominio computacional aprovechando la simetría del problema. De esta forma se puede llevar a cabo de una manera eficiente, el análisis de convergencia, verificación y validación de resultados debido a que se acortan los tiempos computacionales.

Actualmente, las simulaciones numéricas utilizando el método RANS son ampliamente usadas para la evaluación del comportamiento aerodinámico e

hidrodinámico de vehículos debido a la fiabilidad de los resultados¹. En estas simulaciones numéricas se utilizan modelos de turbulencia que descomponen las variables de interés en un valor medio y otro fluctuante. La precisión de las predicciones de estos modelos depende parcialmente del tamaño de las celdas en contacto con las paredes de los cuerpos analizados. Por lo que, se debe garantizar que la calidad² de la malla sea adecuada durante la fase de configuración. Para capturar el campo de flujo que se genera en el exterior del casco del submarino, es necesario un refinamiento progresivo de malla disminuyendo la distancia adimensional de la primera celda perpendicular a la pared sólida.

1.1 Descripción del problema

El único medio para determinar la posición de un submarino cuando está totalmente sumergido se basa en el uso de sensores de velocidad, a veces electromagnéticos, cuya sonda es instalada en el exterior del casco. Esta sonda genera una señal eléctrica de amplitud proporcional a la velocidad del submarino y depende del flujo de agua alrededor del dispositivo [1]. La precisión de las mediciones depende del flujo medido y la velocidad real del submarino. Los efectos viscosos en la capa límite retardan el flujo de agua, por lo que el flujo másico a través de ésta es menor que el flujo másico que pasaría por la misma región sin los efectos de la capa límite. El punto donde el perfil de velocidad es igual a la velocidad del flujo libre es usado para estimar el espesor de la capa límite, sin embargo, es imposible determinar su ubicación exacta [2]. Para compensar este efecto y los de la curvatura del casco se realizan pruebas de mar para obtener curvas de calibración.

¹ Ejemplo: Flujo alrededor de un ahmed body [23]; submarinos [26]

² Obtiene su importancia en la exactitud y estabilidad de los cálculos numéricos. Algunas propiedades asociadas son la densidad, suavidad, distribución de nodos, relación de aspecto, etc. [32]

1.2 Justificación del problema

La flota ecuatoriana cuenta con dos submarinos en operaciones desde 1977, los mismos que se encuentran en constante actualización de sus equipos con el fin incluir los avances tecnológicos y mejorar el desempeño de éstos. Uno de los equipos sobre el cual no se han realizado estudios locales recientes, son los sensores de velocidad electromagnéticos. Este tipo de estudios contribuiría a mejorar la precisión de las lecturas de velocidad a grandes profundidades para la flota de submarinos del Ecuador. Por esto, en este proyecto se propone investigar el efecto de la capa límite en las mediciones de los sensores de velocidad electromagnéticos para la cuantificación de la diferencia entre la velocidad medida y la real.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Analizar numéricamente el efecto de la capa límite sobre el flujo másico alrededor de los sensores de velocidad electromagnéticos en el submarino DARPA SUBOFF-5470 implementando funciones cercanas de pared en OpenFOAM para la evaluación de su efecto en la precisión de las mediciones de velocidad.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para alcanzar el objetivo general, se han planteado cuatro objetivos específicos:

1. Definir los principios físicos relevantes en el funcionamiento de los sensores de velocidad electromagnéticos.
2. Escoger un modelo numérico CFD apropiado en OpenFOAM para capturar la evolución de los gradientes de presión y velocidad dentro de la capa límite alrededor del casco de submarinos.
3. Evaluar la incertidumbre de la predicción de la resistencia alrededor del submarino mediante el proceso de Validación y Verificación siguiendo las recomendaciones de la ITTC.
4. Comparar la implementación de funciones de pared y funciones cercanas de pared en la caracterización numérica del flujo alrededor del modelo del

submarino en su configuración de casco y vela, ignorando los efectos de superficie libre.

1.4 Marco teórico

Los submarinos son vehículos marinos especializados en proteger la soberanía de cada nación. La importancia de los submarinos radica en la capacidad que tienen de navegar sin ser detectados en un mundo moderno donde ser “invisibles” en altamar significa una gran ventaja frente a flotas invasoras. Los submarinos desempeñan un papel vital en una amplia gama de operaciones y tareas navales, desde el mantenimiento de la paz hasta las operaciones de guerra, tanto en funciones ofensivas como defensivas, realizando misiones que ningún otro vehículo marino puede realizar [3].

Un desafío importante en la simulación de maniobras submarinas es la predicción de fuerzas y momentos hidrodinámicos. El casco contribuye significativamente a las cargas hidrodinámicas generales, sin embargo, es difícil de realizar su estimación directa debido a las complejas características del flujo a su alrededor. El flujo sobre el casco de un submarino influye en su velocidad máxima, su firma acústica y la eficacia de sus propios sensores [4].

1.4.1 Sensor de velocidad electromagnético

Es un dispositivo electrónico cuya sonda es situada en la parte externa del casco del submarino, y que es utilizado para medir la velocidad relativa al agua mediante el principio de inducción electromagnética. La sonda o transductor de velocidad está compuesto por una bobina, montada dentro de la carcasa del sensor, que genera un campo magnético variable en el agua que rodea al elemento. El agua actúa como un conductor que se mueve a través de un campo magnético de acuerdo con la Ley de Faraday y se induce un voltaje en el agua proporcional a la velocidad del flujo volumétrico. Los electrodos tipo botón, ver Figura 1.1, situados a cada lado del sensor, se colocan en contacto con el agua para detectar el voltaje inducido. La sonda se ubica en una posición en la embarcación donde el flujo de agua es relativamente laminar para obtener una representación fiel de la velocidad de la embarcación [5].

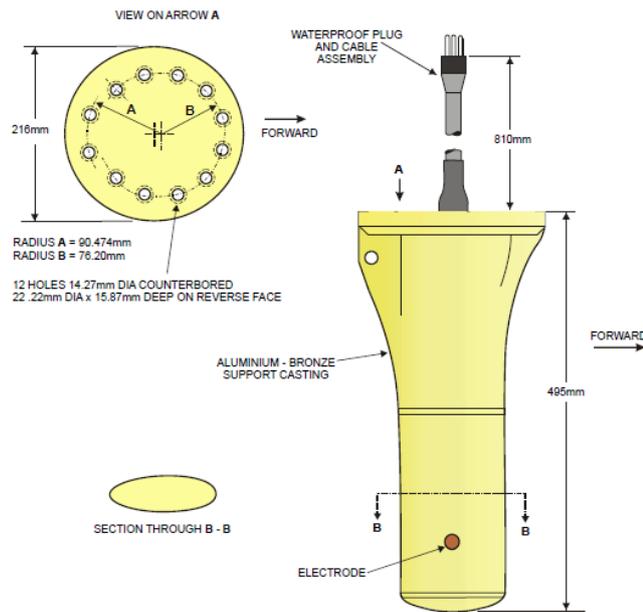


Figura 1.1 Detalles generales del sensor de velocidad.

Fuente: Tomado de AGILOG Overall system manual for the Equadorian navy (Type 209 submarine refit) [1]

En algunos casos, es deseable una ubicación simétrica de dos transductores alrededor de la línea de crujía de la embarcación para compensar los cambios en los patrones de flujo durante las maniobras. El sensor de velocidad y los electrodos tipo botón están montados a ras de la nave para minimizar el arrastre.

1.4.2 Ley de Faraday

El funcionamiento de los sensores de velocidad se basa en la ley de inducción electromagnética conocida como la Ley de Faraday que predice cómo un campo magnético interactuará con un circuito eléctrico para producir una fuerza electromotriz [6]. Esto quiere decir, que el voltaje inducido en un circuito cerrado es directamente proporcional a la razón de cambio del flujo magnético que atraviesa una superficie cualquiera.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -N \frac{d\phi_B}{dt} \quad (1)$$

Donde,

\vec{E} : Campo eléctrico

$d\vec{l}$: Elemento diferencial de longitud del circuito

N : Número de vueltas de la bobina

ϕ_B : Flujo magnético que atraviesa la superficie delimitada por el circuito

Los sensores electromagnéticos tienen una bobina por dentro que es la encargada de generar un campo magnético a partir de una corriente alterna suministrada por la Unidad de fuente de alimentación. A cada lado del sensor está ubicado un electrodo de botón, la fuerza electromotriz inducida a través de ellos es proporcional a la velocidad del submarino, ver Figura 1.2. Este voltaje inducido se alimenta a través de un transformador de aislamiento que, de acuerdo con los datos de calibración, calcula y muestra una indicación de la velocidad relativa del submarino.

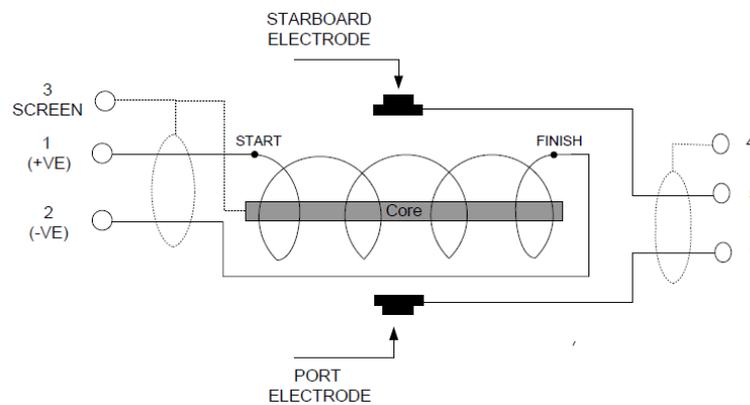


Figura 1.2 Diagrama eléctrico del sensor

Fuente: Tomado de AGILOG Overall system manual for the Equadorian navy (Type 209 submarine refit) [1]

Actualmente, los autores desconocen la relación física entre el caudal de agua que pasa por los sensores y el voltaje medido, información no proporcionada por el fabricante, con lo cual sería posible establecer la diferencia entre la velocidad medida por los sensores y la real del submarino. El análisis de esta relación física no será incluido en el alcance de este estudio.

1.4.3 Capa límite

La región del flujo adyacente a la frontera sólida de un cuerpo, en donde los efectos debido a la viscosidad del fluido no pueden despreciarse, es conocida como capa límite. En esta región, la velocidad del flujo cambia desde su condición de flujo libre y aquellas de la frontera sólida [7]. La capa límite puede comportarse

como en régimen laminar o turbulento. Se considera dentro del régimen laminar cuando el número de Reynolds, Re , representativo del flujo está entre $10^3 < Re < 10^6$, para valores superiores se considera que la capa límite es turbulenta considerando el caso de una placa plana. Para determinar el número de Reynolds, se usa la siguiente expresión:

$$Re = \frac{U \cdot x}{\nu} \quad (2)$$

Donde,

U : Velocidad del flujo libre

x : Longitud característica medida desde el borde de ataque

ν : Viscosidad cinemática del fluido

En la Figura 1.3, se muestra que el régimen laminar del flujo, en la región cercana al borde de ataque, puede ser descrito como un deslizamiento de capas apiladas de fluidos, por lo tanto, el intercambio de Momentum entre las capas adyacentes del fluido es debido únicamente al movimiento molecular relacionado con la viscosidad. Mientras tanto, en régimen turbulento, en la región alejada al borde de ataque, se tiene un movimiento desordenado entre capas de fluido, mezclándose entre sí, por lo que el intercambio de Momentum entre capas del fluido es provocado por dicho movimiento irregular. [7]

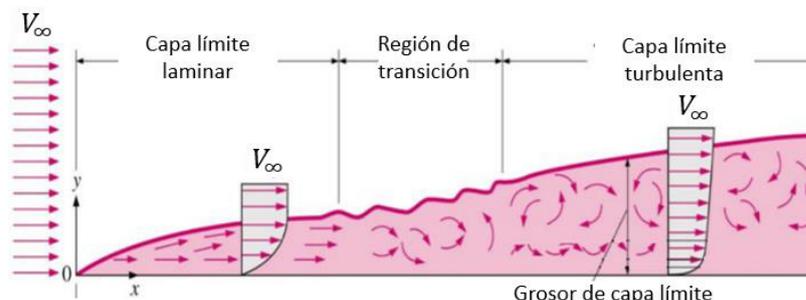


Figura 1.3 Desarrollo de capa límite

Fuente: Tomado de www.aerodinamicaf1.com [8]

El campo de flujo sobre el casco del submarino, especialmente en el cuerpo de proa³, presentan características interesantes debido a la existencia de gradientes de presión longitudinales y circunferenciales. La variación de las características de la capa límite (transición y separación) dependen de la forma del cuerpo y los gradientes de presión y disminuyen la eficiencia de los submarinos [9]. Por ejemplo, Patel [10] estudió la distribución de presión, perfiles de velocidad media y esfuerzos de Reynolds a lo largo de la capa límite turbulenta axisimétrica cerca de la cola de un modelo con popa esférica en túnel de viento. Los resultados denotaron que la capa límite estaba caracterizada por variaciones significativas en presión a través de la capa límite, la cual está asociada con una fuerte interacción entre la capa límite y el flujo potencial exterior. Huang and Liu [11] midieron los gradientes de presión y velocidad en la capa límite de la región de popa de un modelo SUBOFF, con y sin apéndices en un túnel de viento. Los resultados mostraron los efectos de varios apéndices (vela, apéndices de popa, alas de anillo) en la capa límite turbulenta sobre la popa.

1.4.4 Espesor de la capa límite

Dentro del espesor $\delta(x)$ de la capa límite, mostrado en la Figura 1.3, los esfuerzos cortantes son dominantes debido a la variación de velocidad dentro de esta región, desde cero en la superficie sólida inmóvil hasta la velocidad de corriente incidente del fluido (U_∞), donde los esfuerzos de corte son nulos. En el caso de una placa plana, el espesor de la capa límite es cero en el borde de entrada, incrementando

³ Zona situada según sentido de avance del submarino en la parte delantera y limitada su estructura por el mamparo de colisión.

progresivamente su espesor desde este punto, con una mayor tasa de cambio para la capa límite turbulenta. Una de las alternativas usadas para determinar el espesor de la capa límite, es definida por la distancia perpendicular a una superficie sólida en la cual la velocidad toma el valor del 99% de la velocidad del flujo libre [7].

Además, el flujo en la capa límite es retardado debido a las fuerzas viscosas, disminuyendo el flujo másico dentro de esta, cuando es comparado con el flujo másico obtenido en ausencia de los efectos viscosos. Esta disminución de flujo másico es expresada mediante:

$$\int_0^{\infty} \rho(U - u)w dy \quad (3)$$

Donde,

u : Velocidad local

w : ancho de la superficie en la dirección transversal al flujo.

ρ : Densidad del fluido

dy : Diferencial de longitud

1.4.5 Descripción del submarino SUBOFF

Por lo general, las formas del casco de un submarino y las especificaciones técnicas no suelen publicarse debido a su carácter confidencial. Sin embargo, la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa (DARPA) proporciona la geometría axisimétrica denominada “Submarino SUBOFF”, y numerosos resultados de mediciones experimentales realizadas en tanques hidrodinámicos de remolque o túneles de viento. En la Tabla 1.1, se muestran las características geométricas principales del modelo utilizado.

Tabla 1.1. Características del modelo

Fuente: Tomado de Geometric Characteristics of DARPA Suboff models, 1989 [11]

Eslora total, LOA [m]	4.356
Radio máximo del casco, RMAX [m]	0.254
Centro de boyantes, LCB [m]	0.4621LOA
Área mojada del casco desnudo, S [m ²]	5.988

Área mojada del casco y vela [m ²]	6.338
------------------------------------------------	-------

1.4.6 Simulaciones CFD

El acrónimo anglosajón CFD que significa Dinámica de Fluidos Computacional, hace referencia a la resolución de métodos numéricos utilizando CPUs para el análisis de problemas de mecánica de fluidos. La solución de estos problemas es complicada ya que el sistema de ecuaciones que gobierna el comportamiento de un fluido está compuesto por derivadas parciales de segundo orden y su comportamiento es no lineal.

Frente el desarrollo de ordenadores cada vez más potentes y diferentes métodos de computación numéricos, existe una tendencia creciente hacia el uso de simulaciones CFD. Es una práctica recomendada por la industria, la de contrastar los resultados obtenidos de un análisis numérico con resultados experimentales, para no perder contacto con la realidad [12].

1.4.7 OpenFOAM

OpenFOAM es una caja de herramientas computacional de código libre de CFD que permite realizar estudios sobre comportamiento de los fluidos, empleando la técnica de volúmenes finitos para resolver problemas relacionados con la dinámica de fluidos.

OpenFOAM utiliza una funcionalidad empaquetada contenida en una colección de aproximadamente 100 bibliotecas de C++ con aproximadamente 250 aplicaciones prediseñadas que se dividen en dos categorías: Solucionadores y utilidades, ver Figura 1.4. Los primeros están diseñados para resolver un problema en específico y los segundos están diseñados para realizar tareas relacionadas con la manipulación de datos [13].

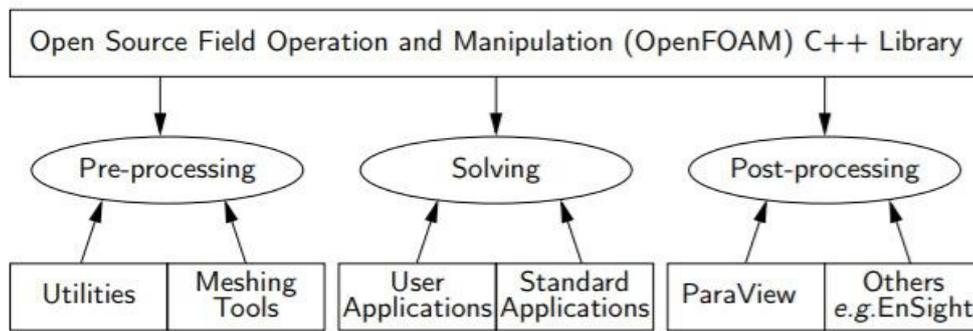


Figura 1.4 Descripción básica de la estructura de OpenFOAM

Fuente: Tomado del manual de usuario de OpenFOAM [13]

En este proyecto se usará OpenFOAM versión 7 por las ventajas que presenta tales como ser un código libre, tener un código fuente completamente documentado, posee amplia gama de aplicaciones, sintaxis amigable para ecuaciones diferenciales parciales y modelos listos para usar. En el APÉNDICE A se describen los pasos necesarios para instalar OpenFoam V7 en máquina virtual, que es lo recomendado para evitar problemas de pérdidas de información en el ordenador.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Ecuaciones gobernantes de la mecánica de fluidos

En la mecánica de fluidos, las ecuaciones gobernantes representan las leyes tradicionales de conservación de la física:

- Se conserva la masa del fluido
- La suma de las fuerzas actuantes sobre el fluido (2da ley de Newton) es igual a la razón de cambio de la cantidad de movimiento.
- La suma del flujo de calor (1era ley de termodinámica) es igual a la razón de cambio de energía.

El fluido será tratado como un medio continuo, donde las escalas microscópicas ($1\mu\text{m}$ o menos) y el tratamiento molecular de la materia es ignorado. Las propiedades del fluido son aplicables como constantes dentro de un volumen de control que cuenta con 6 caras (entrada, salida, costado derecho, costado izquierdo, superior e inferior) como se muestra en la Figura 2.1.

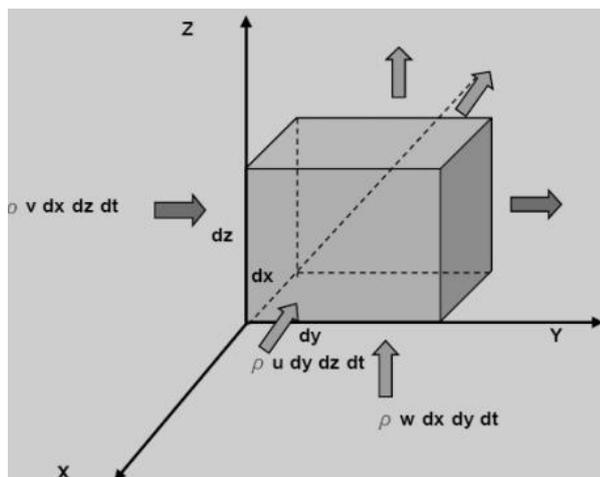


Figura 2.1 Estructura del volumen de control

Fuente: Tomado de Apuntes de Teoría de Mecánica de los fluidos por Ing. Modon
[14] Ecuaciones de la conservación de la masa

La ecuación diferencial que garantiza el principio de continuidad de la masa es:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot U) = 0 \quad (4)$$

Donde,

∇ : Gradiente

Propiedades del fluido no varían en el tiempo:

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (5)$$

Se obtiene:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (6)$$

La ecuación (6) es descrita como la ecuación de la continuidad para fluidos incomprensibles.

2.1.1 Ecuaciones de la conservación de la cantidad de movimiento lineal

En modo diferencial, la ecuación de la cantidad de movimiento tiene la forma de:

$$\rho \frac{DU}{Dt} = -\nabla P + \rho g + \nabla \bar{\tau} \quad (7)$$

Donde,

∇P : Gradiente de presiones

g : Gravedad terrestre

$\bar{\tau}$: Tensor de esfuerzos cortantes

La ecuación (7) es conocida como la ecuación de Cauchy. Describe que la tasa de incremento de Momentum de una partícula de fluido es igual a la suma de las fuerzas superficiales, gravitacionales y de rozamiento sobre la partícula. Por ello, se describe en términos de la ecuación de Navier-Stokes (modo abreviado), aplicable a todo tipo de fluidos.

$$\rho \frac{DU}{Dt} = -\nabla P + \rho g + \mu \nabla^2 U + \frac{1}{3} \mu (\nabla \cdot U) \quad (8)$$

Sin considerar efectos gravitatorios y aplicable a fluidos incomprensibles, la ecuación de Navier-Stokes queda:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \nabla U = \frac{-\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 U \quad (9)$$

Al considerar la simetría de los esfuerzos turbulentos, se tienen 4 ecuaciones (una de continuidad y tres de Momentum) con un total de 10 incógnitas. Al hecho de tener más incógnitas que ecuaciones es conocido como el problema del cierre de la turbulencia.

2.2 Metodología numérica

El CFD es una herramienta que combina el análisis numérico con los principios físicos fundamentales de la mecánica de fluidos tales como la conservación de masa, cantidad de movimiento y energía. Mediante el empleo de ecuaciones diferenciales son expresados estos principios, consiguiendo una expresión numérica final y de la cual se obtiene una solución aproximada que sería casi imposible de resolver analíticamente [15].

La factibilidad del uso de modelos CFD en la implementación de simulaciones hidrodinámicas para buques y también para cuerpos sumergidos, tales como submarinos, cada vez se convierte en más alta debido al rápido desarrollo de la tecnología computacional. La ventaja de emplear modelos CFD es que se puede aproximar sistemas de ecuaciones no lineales y determinar las formas del objeto analizado de una forma más eficiente. Para que el modelo CFD, sea lo más cercano posible a la realidad, se debe realizar una serie de pruebas para determinar que los resultados son independientes de la malla utilizada y, por ende, existe una convergencia. Además, estos resultados numéricos tienen que ser comparados con datos experimentales para poder validar que el modelo es adecuado para usarse en las futuras simulaciones [16].

Las soluciones de CFD requieren de un alto costo computacional debido a que se manejan cientos de miles de iteraciones para poder converger a un valor solución. Por este motivo, con la finalidad de disminuir el tiempo de simulación y que los resultados converjan a una solución de manera más rápida, se utiliza

procesamiento paralelo mediante la interconexión de dos o más computadoras o lo que se denomina Clúster, como se muestra en la Figura 2.2. A continuación, se describen los principales componentes de un Cluster:

- Nodos de inicio de sesión: Servidor donde el usuario se conecta remotamente y desde donde son subidos los trabajos al clúster.
- Nodos de computación: Servidor diseñado específicamente para admitir procesos de memoria y CPU, así como recursos espaciales como GPU, TB de memoria, etc.
- Servidor de almacenamiento: Sistema de servidores que almacenan los datos utilizados en el clúster y que son accesibles tanto en los nodos de inicio y en los de computación.

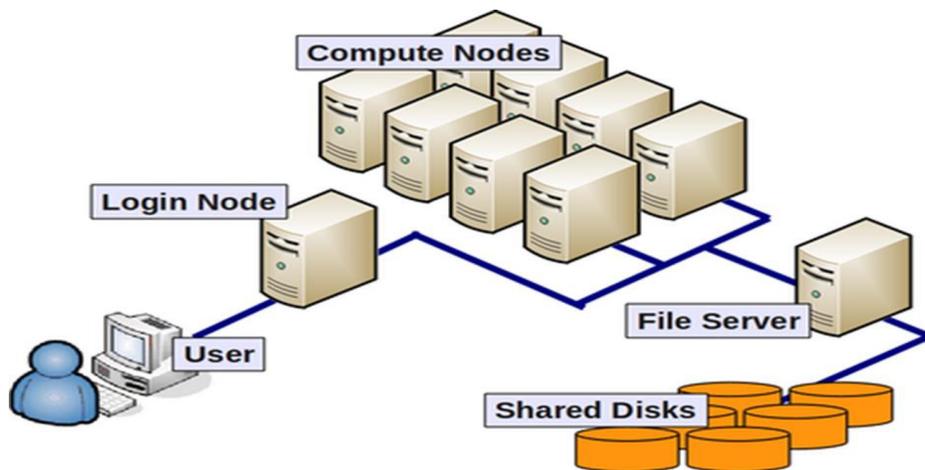


Figura 2.2 Configuración típica de un clúster de alto rendimiento

Fuente: Tomado de wiki.rc.hms.harvard.edu

En este proyecto se utilizó el Clúster HPC de la Universidad Politécnica Nacional de Quito que cuenta con las siguientes características:

- 1182 CPU Intel cores distribuidos en 47 servidores.
- 9 TB de memoria RAM
- 14976 GPU cores (Nvidia Tesla)
- Intel XEON Phi 7120P
- 107,8 terabytes de almacenamiento
- Red Infiniband 52 Gbs
- Sistema base del HPC
- Sistema de archivos NFS

- OpenFabrics InfiniBand
- OpenMPI y librerías MVAPICH
- Gestor de trabajos SLURM
- Herramientas de administración escalables: SLURM, LDAP
- Herramientas de monitoreo: AKCP, GRAFANA, XDMOD

2.2.1 Descripción de métodos numéricos

En este proyecto, se utilizó OpenFOAM versión 7 debido a ser un software libre que cuenta con la estructura general para realizar cualquier análisis CFD: Preprocesamiento, ejecución de simulación y post-procesamiento. OpenFOAM cuenta con los siguientes métodos numéricos:

- **Direct Numerical Simulation (DNS):** Consiste en resolver numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes transientes con precisión físicamente consistente en el espacio y el tiempo. Se obtienen soluciones tridimensionales precisas dependientes del tiempo de las ecuaciones gobernantes [17]. Para este método numérico OpenFOAM dispone del solver “dnsfoam” [13].
- **Large Eddy Simulation (LES):** Este método consiste en la solución del conjunto de ecuaciones gobernantes en una cuadrícula que es muy gruesa para representar las escalas físicas más pequeñas y a números de Reynolds mayores de 10^6 [18]. Los solvers utilizados con este método en OpenFOAM son: chemFoam, coldEngineFoam, fireFoam, XiFoam, buoyantPimpleFoam, DPMFoam, sprayFoam, reactingParcelFoam, entre otros [13].
- **Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS):** En el modelado de RANS, las ecuaciones de Navier-Stokes se promedian en el tiempo y, por lo tanto, la derivada en el tiempo desaparece de las ecuaciones. La idea detrás de la descomposición de Reynolds consiste en expresar cada variable en un valor promedio más una parte fluctuante [19]. Los solvers que OpenFOAM dispone para este método numérico son: interFoam, interFyFoam, cavitatingFoam, interIsoFoam, multiphaseEulerFoam, multiphaseInterFoam, entre otros [13].

2.2.2 Selección del método numérico

El método numérico seleccionado para el presente trabajo es el Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) debido a que es el que menor costo

computacional requiere de los tres métodos numéricos mencionados anteriormente. Esto es debido a que, en este método, no se resuelven de forma directa las ecuaciones de Navier Stokes ya que se descomponen variables tales como la velocidad y la presión en un valor medio y otro fluctuante. Como consecuencia, un mismo elemento de malla se lo resuelve más rápido por el método RANS que por cualquier otro [20].

2.2.2.1 Ecuaciones del método numérico

Las ecuaciones RANS para un flujo turbulento pueden ser escritas usando notación de tensores cartesianos y sustituyendo la forma descompuesta de las variables en las ecuaciones de continuidad y momento, tomando un tiempo promedio:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (11)$$

Donde,

i, j : índices de tensores (1, 2, 3, ...)

p : presión

δ : delta Kronecker

μ : viscosidad dinámica

Las 6 componentes (por ser simétrico) del último término de la ecuación (11), $\rho \overline{u'_i u'_j}$, representan el efecto de la turbulencia y son llamados tensores de Reynolds. Para resolver estos tensores, se basa en la hipótesis de Boussinesq, que consiste en asumir una dependencia lineal del gradiente de las velocidades promedio de los esfuerzos de Reynolds:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (12)$$

Donde,

μ_t : viscosidad turbulenta

k : energía cinética

Se asumió que los fluidos son incomprensibles, por tanto, de las ecuaciones (11) y (12), la dependencia del tiempo de la densidad es ignorada.

2.2.3 Diagrama de flujo de trabajo CFD

En la Figura 2.3 se presenta el diagrama de flujo seguido para completar cada simulación numérica.

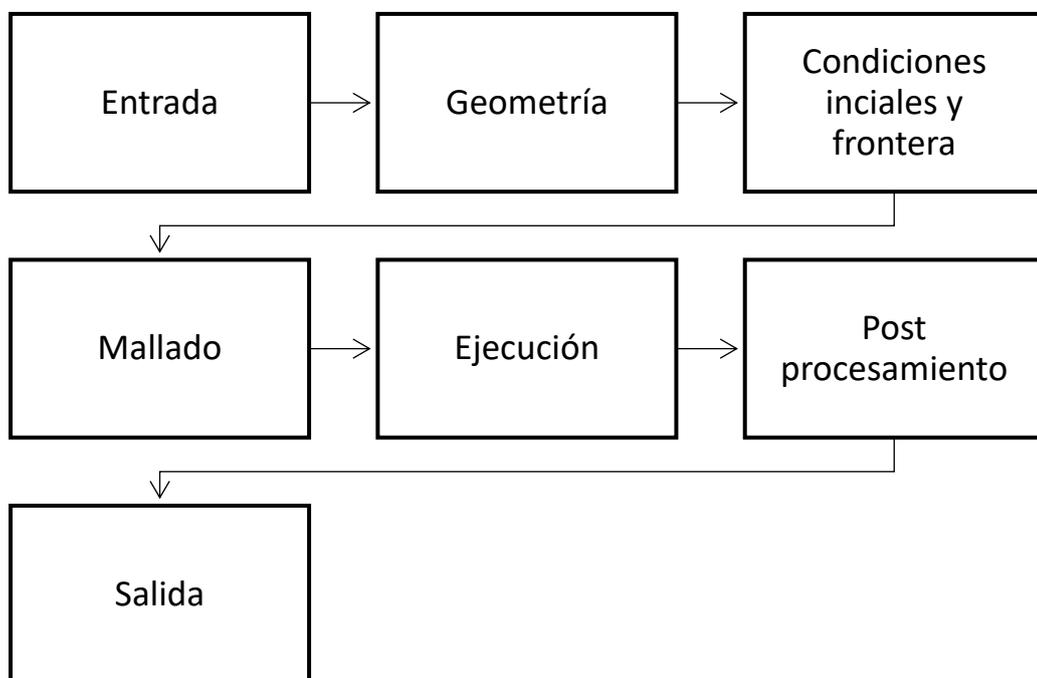


Figura 2.3 Diagrama de flujo de simulación numérica

2.3 Hipótesis del fluido

Con el objetivo de abordar los problemas de mecánica de fluidos, se necesitan establecer algunas hipótesis para el agua.

- Fluido viscoso
- Fluido Isotérmico
- Densidad constante
- Ley de esfuerzos cortantes Newtoniana
- Problema tridimensional, la derivada en la dirección z no es nula.

2.4 Introducción al CFD

La dinámica de fluidos computacional, CFD por sus siglas en inglés, es el análisis de sistemas o que involucran a los fluidos, fenómenos químicos y la transferencia de calor mediante simulaciones computacionales. Es una técnica poderosa y contiene un amplio número de aplicaciones a nivel industrial y educativo. Las áreas donde se puede aplicar CFD son:

- Hidrodinámica de buques
- Aerodinámica de vehículos espaciales
- Turbo maquinas
- Plantas de energía: motores de combustión interna y turbinas a gas
- Meteorología
- Ambiente de construcciones: acciones del viento, climatización, ventilación, etc.

La complejidad de la resolución de las ecuaciones gobernantes para el modelamiento de un fluido y que al sea económico y suficientemente preciso al mismo tiempo, ha hecho que el CFD tarde en proliferarse. El uso de equipos informáticos más potentes lleva a un aumento en el interés de usar CFD en el análisis de problemas reales de varias industrias.

2.5 Pre-procesamiento de datos

En la etapa de pre-procesamiento, se deben definir tres aspectos fundamentales para garantizar que las simulaciones se realicen correctamente como se observa en la Figura 2.4. Estos aspectos son: La geometría, el mallado y las condiciones iniciales o de frontera. Se debe tener en cuenta en todo momento que las condiciones y parámetros establecidos en esta etapa tendrán una incidencia directa sobre los resultados obtenidos.

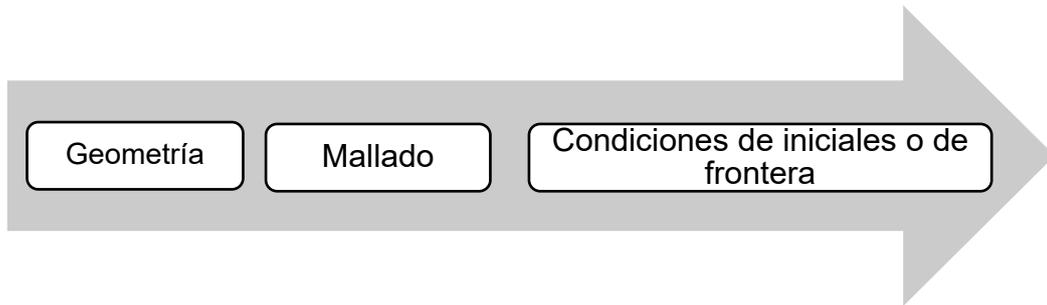


Figura 2.4 Aspectos fundamentales del preprocesamiento
Fuente: Tomado del manual de usuario de OpenFOAM [13]

2.5.1 Definición de la geometría

En el presente trabajo se utilizó la geometría del modelo 3D del submarino DARPA SUBOFF-5470, que es definida usando ecuaciones establecidas por Groves en 1989 [21]. El casco del submarino junto con la vela fue generado en el software *Rhinoceros* con la ayuda de la herramienta *Grasshopper*. A continuación, la Figura 2.5, describe el proceso realizado para la generación del modelo 3D:

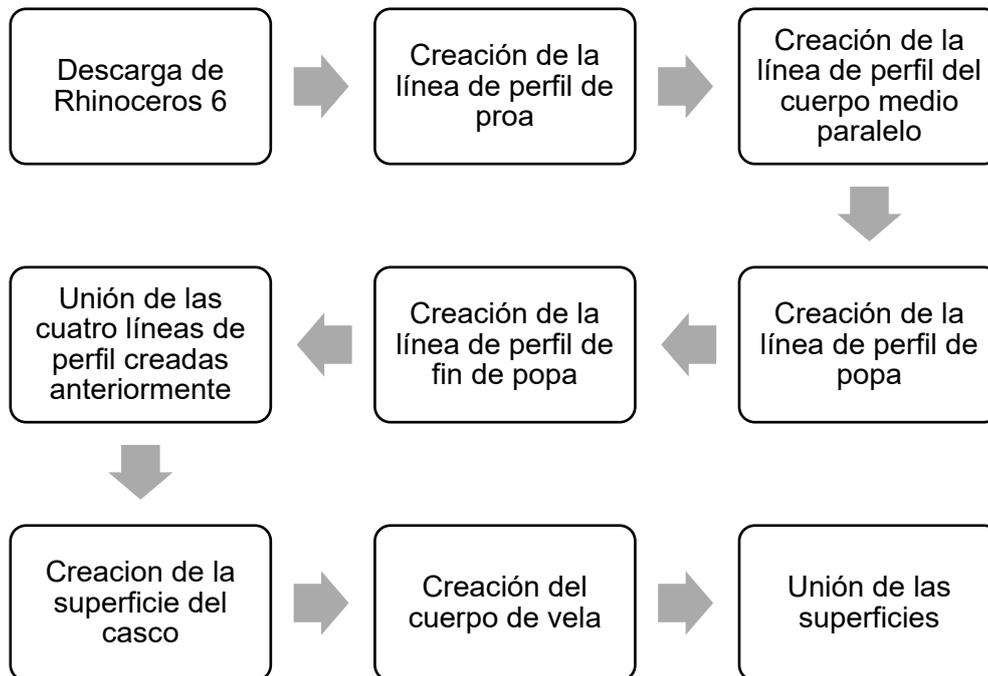


Figura 2.5 Proceso para la creación de la geometría
Fuente: Elaboración propia

2.5.1.1 Dominio computacional

Para el dimensionamiento del dominio computacional, mostrado en la Figura 2.6, se siguieron las recomendaciones dadas por la ITTC [22]. Se consideró la mitad del dominio computacional aprovechando la simetría de la geometría respecto del eje en cruzía (eje perpendicular al plano YZ) y del flujo moviéndose alrededor del submarino, esto implica un ahorro del gasto computacional.

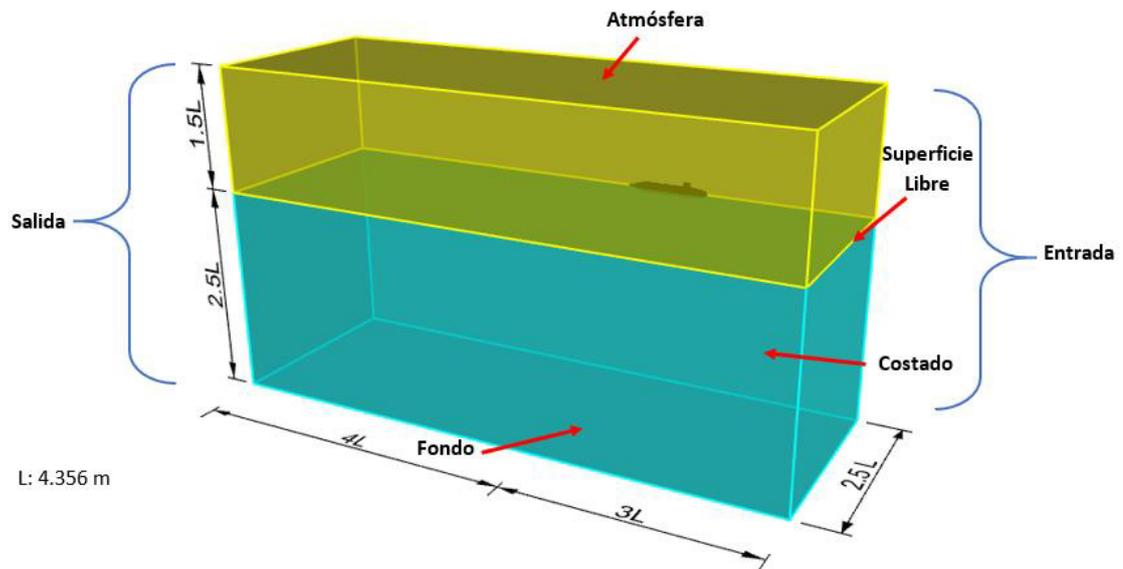


Figura 2.6 Dominio computacional de las simulaciones numéricas

Fuente: Elaboración propia

2.5.2 Discretización del dominio - Mallado

Una vez unidas las superficies del casco desnudo, el cuerpo de la vela y la tapa de la vela en Rhinoceros, se transforma la geometría a tipo malla. Además, se cambia el sistema de referencias como se muestra en la Figura 2.7. El origen está localizado en la línea base al final de la popa como se muestra en la misma figura. Finalmente, la malla fue guardada con la extensión STL debido a los requisitos de compatibilidad para importar geometrías en OpenFOAM.



Figura 2.7 Malla del DARPA SUBOFF 5470

Fuente: Elaboración propia

OpenFOAM cuenta con dos tipos de malladores, generador de malla estructurada por bloques (BlockMesh) y generador de malla por barrido desde un punto inicial (SnappyHexMesh). Estos malladores son muy buenos para generar mallas en complejas geometrías, pero su calidad está ligada a la experiencia del usuario [23].

Debido a este motivo se prefirió el uso de BlockMesh + SnappyHexMesh como generador de malla, ya que la geometría 3D del submarino es relativamente sencilla y tendremos mucho control sobre la malla generada.

2.5.2.1 BlockMesh

Genera hexaedros estructurados en bloques que luego son convertidos a un formato desestructurado en OpenFOAM. El script que se encuentra ubicado en system/blockMeshDict posee toda la programación de la malla. Esta forma de programación de la malla evita tener que generar la geometría del volumen de control en un programa CAD externo.

En el blockMeshDict se definen todos los elementos de la malla, para lo cual se sigue la lógica mostrada en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1 Diccionarios principales en BlockMeshDict [23]

Diccionarios	Descripción
convertToMeters	Introduce factor de conversión de unidades a metros
Vertices	Se declaran los puntos o vértices mínimos para la construcción de la malla
Blocks	Se crean bloques a partir de los vértices declarados. Por ejemplo, un hexaedro será conectado por 8 vértices. El orden es importante.
Edges	Se declaran aristas que no sean rectas, por ejemplo: arcos

Boundary	Se declaran caras externas de aquellos bloques que delimitan el contorno del experimento. El orden es importante
mergePatchPairs	Se declaran caras internas entre bloques si se desea. Por ejemplo: la interfaz (superficie libre) entre el bloque de agua y aire.

2.5.2.2 **SnappyHexMesh**

El script de este archivo se encuentra ubicado en el directorio System. Tiene como función adaptar la malla a la superficie de la geometría que se especifica en el directorio Constant / TriSurface. El SnappyHexMesh malla dentro de zonas específicas del dominio computacional y añade capas adicionales alrededor del cuerpo de la geometría con el objetivo de capturar las formas.

2.5.2.3 **Dimensionamiento de la malla**

Por recomendaciones de la ITTC que se describe en el manual “Análisis de incertidumbre en la metodología y los procedimientos de verificación y validación de CFD” del 2017 [22], se sugiere la utilización de cuadrículas ortogonales con al menos 80 puntos para resolver la longitud de ola más corta. Para dimensionar la malla para un Froude específico se presenta la siguiente formulación:

$$\Delta x_{malla} = \frac{\lambda_{ola}}{80} \quad (13)$$

$$\lambda_{ola} = 2\pi Fn^2 L_{pp} \quad (14)$$

Donde,

λ_{ola} : Longitud de ola

Fn : Número de Froude

L_{pp} : Eslora entre perpendiculares

2.5.2.4 **Aseguramiento de la calidad de la malla**

Para obtener resultados reales o con el mínimo error, tener una buena malla es un factor primordial. Donde los gradientes sean más altos, habrá que poner más celdas. Esto implicará el reforzamiento de la densidad de las celdas dentro de la capa límite debido a los elevados gradientes de velocidades en dirección perpendicular a la superficie.

Además, hay que tener en cuenta que usar una malla estructurada, requiere menos tiempo de convergencia y los algoritmos son más eficientes.

2.5.2.5 **Parámetro y^+**

Se trata de un parámetro adimensional que es utilizado para determinar qué tan gruesa o fina es una malla en el modelamiento cercano a la superficie sólida. Además, es usado para diferenciar modelos de turbulencia usados en zonas cercanas a las caras establecidas como tipo “pared” con la condición de no-deslizamiento. La ley pared o ley logarítmica de la pared, establece el promedio de la velocidad de un flujo turbulento en un determinado punto como proporcional al logaritmo de la distancia desde dicho punto a la pared como podemos ver en la Figura 2.8.

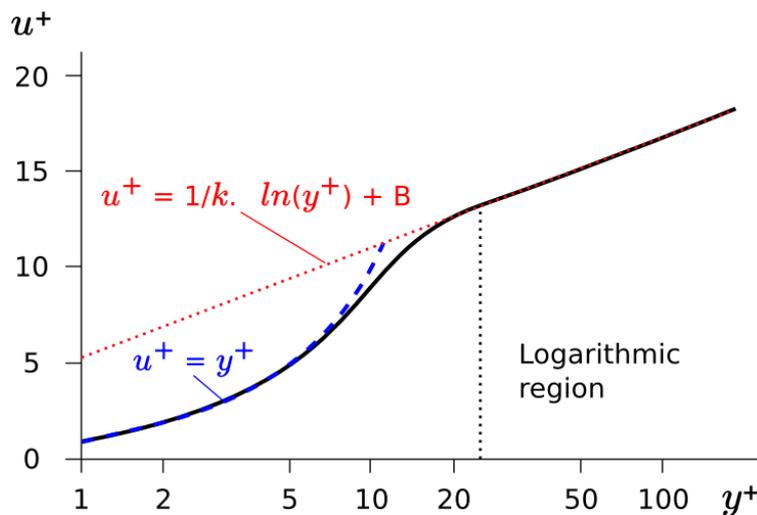


Figura 2.8 Ley Pared

Fuente: Tomado de www.cfd-online.com

El objetivo general en este proyecto tiene interés especial en la aproximación utilizada para estimar el flujo dentro de la capa límite. Los modelos de turbulencia hacen uso de funciones de pared (“wall functions”) o funciones cercanas de pared (“near wall functions”) dependiendo de la proximidad de la primera capa de celdas adyacentes a la pared.

$$y^+ = \frac{\rho u^*}{\mu} y \quad (15)$$

Donde,

y^+ : Distancia adimensional
 u^* : Velocidad friccional
 y : Distancia a la primera celda

Se define la velocidad friccional como:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (16)$$

Donde,

τ_w : Esfuerzo en la pared

El skin friction o esfuerzo en la pared es definido como:

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \rho U^2 \quad (17)$$

Donde,

C_f : Coeficiente friccional

Se puede estimar el coeficiente friccional usando formulación recomendada por la ITTC:

$$C_f = \frac{0.075}{[\log_{10}(Re_L) - 2]^2} \quad (18)$$

Donde,

Re_L : Número de Reynolds basado en la eslora del modelo

La distancia al primer punto desde la pared es calculada como:

$$y = \frac{y^+ L}{Re_L \sqrt{\frac{C_f}{2}}} \quad (19)$$

2.5.3 Condiciones iniciales o de frontera

Para la implementación del modelo numérico se han realizado las siguientes suposiciones:

- Flujo turbulento, estable y tridimensional.
- Flujo de una sola fase.
- Velocidad uniforme.
- Propiedades del aire y del agua constantes.

En consecuencia, las condiciones iniciales o de frontera del modelo numérico son las siguientes:

- Velocidad inicial (U).
- Densidad (ρ).
- Viscosidad cinética turbulenta (ν).
- Energía cinética turbulenta por unidad de masa (k).
- Disipación específica de turbulencia (ω).

2.6 Especificaciones de OpenFOAM

OpenFOAM cuenta con tres directorios para establecer toda la información requerida para empezar a ejecutar las simulaciones: "0", "constant" y "system". El contenido de cada uno de los de los directorios se muestra en la Figura 2.9.

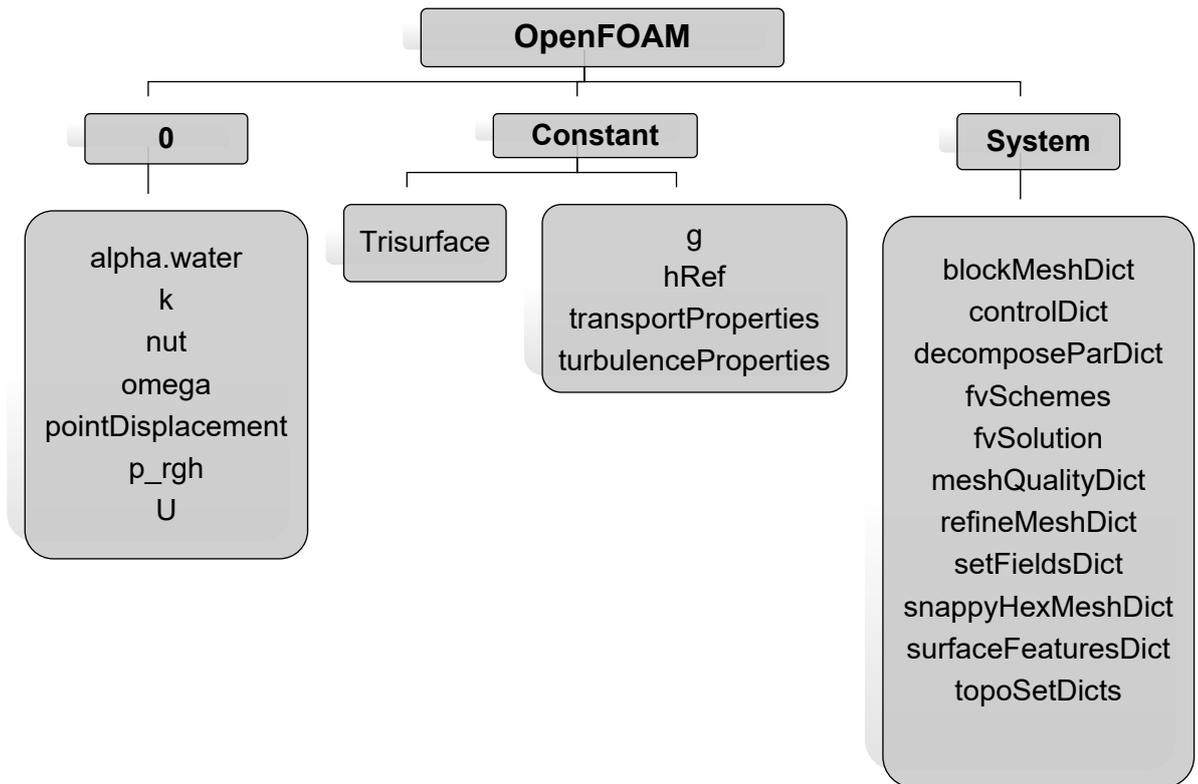


Figura 2.9 Directorios de OpenFOAM

Fuente: Tomado del manual de usuario de OpenFOAM [13]

2.6.1 Directorio “0”

En este directorio se encuentran las condiciones iniciales y frontera del modelo numérico. Los archivos más representativos se describen a continuación:

- **U:** En este archivo se definen la velocidad de navegación del submarino y la velocidad en las fronteras del dominio computacional.
- **p_rgh:** Se definen las condiciones iniciales de presión dinámica para cada una de las fronteras y para el casco.
- **k:** Se define la energía cinética turbulenta para las fluctuaciones de la turbulencia. Para su estimación en la condición inicial en [m²/s²] usamos:

$$K_{inicial} = \frac{3}{2}(I|U|)^2 \quad (20)$$

Donde,

I: Intensidad de turbulencia

La intensidad de turbulencia será aproximada mediante la siguiente expresión:

$$I = 0.16Re_L^{-\frac{1}{8}} \quad (21)$$

- **omega:** La disipación de energía cinética es definida en las fronteras sólidas. Para estimar la frecuencia media [1/s] en su valor inicial usamos:

$$\omega = 0.09^{-0.25} K^{0.5} \frac{1}{L} \quad (22)$$

Donde:

K : Energía cinética turbulenta

L : Longitud referencial (típicamente el espesor laminar de la capa límite)

- **nut:** Los valores de viscosidad cinemática turbulenta son definidos para cada frontera del volumen de control y las paredes del submarino. Para la estimación de su valor inicial en [m²/s] tenemos:

$$\nu_t \cong \frac{K}{\omega} \quad (23)$$

2.6.2 Directorio “CONSTANT”

En esta carpeta podemos encontrar las propiedades del fluido y del mallado. Entre los archivos más importantes tenemos:

- **transportProperties:** Las propiedades del fluido son especificadas en este archivo.
- **polymesh:** Podemos encontrar el mallado de la geometría.
- **turbulenceProperties:** Se define el modelo de turbulencia del modelo numérico, que en este caso será el kOmegaSST (k-omega Shear Stress Transport).

2.6.3 Directorio “SYSTEM”

Este directorio contiene los archivos relacionados al cálculo de la solución. Los archivos que contiene el directorio son:

- **controlDict:** Se especifica todo el mallado temporal, el control del tiempo y funciones de postproceso.
- **fvSchemes:** En este archivo son escogidos los métodos de interpolación y se discretizan las opciones en general.
- **fvSolution:** Contiene herramientas para controlar el propio solucionador. Se establecen tolerancias, métodos de cálculo de residuos, entre otras cosas.

2.7 Funciones de pared

Las funciones de pared son ecuaciones empíricas que se utilizan para satisfacer la física del flujo en la región cercana a la pared y el primer centro de celda debe colocarse en la región de la ley logarítmica para garantizar la precisión del resultado.

2.7.1 Importancia del uso de funciones de pared

Para tratar la región cercana a la pared, generalmente se proponen dos métodos. El primer método integra la turbulencia a la pared mediante los esfuerzos de corte. Los modelos de turbulencia se modifican para permitir que la región afectada por la viscosidad se resuelva con toda la malla hasta la pared, incluida la subcapa viscosa. Cuando se utiliza el modelo de turbulencia de Reynolds bajo modificado para resolver la región cercana a la pared, el primer centro de la celda debe colocarse en la subcapa viscosa (preferiblemente $y^+ = 1$). Este enfoque conduce al requisito de un número de elementos abundantes, lo que significa que se necesita un recurso computacional sustancial. El otro método utiliza las llamadas funciones de pared, que pueden modelar la región cercana a la pared [24] utilizando una malla gruesa donde la primera capa de celdas cubre la capa límite interior incluida la capa interna de la región logarítmica. En lugar de resolver ecuaciones diferenciales parciales en una malla fina, se usa expresiones analíticas para modelar el flujo en la capa límite.

2.7.2 La región de la pared cercana

La región cercana a la pared se puede dividir en 3 partes: la subcapa viscosa, la capa de transición y la región logarítmica. En la Figura 2.10 se muestran estas subcapas, junto con la relación entre y^+ y u^+ .

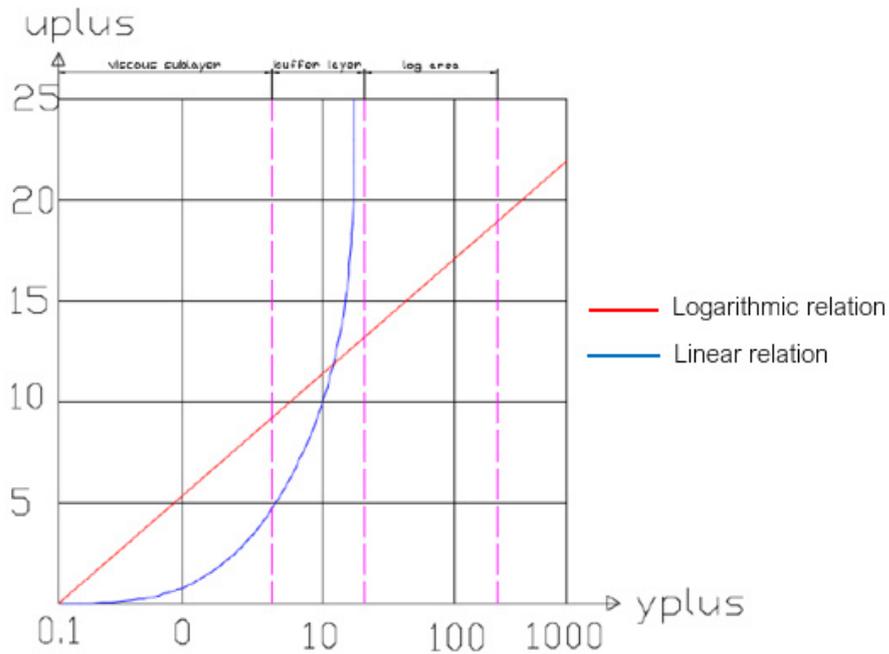


Figura 2.10 Relación entre y^+ y u^+ en tres partes de la región interior

Fuente: Tomado de **A thorough description of how wall functions are implemented in OpenFOAM**, Fangqing Liu, 2017 [24]

1. La subcapa viscosa ($y^+ < 5$)

En la subcapa viscosa, el fluido está dominado por el efecto viscoso, por lo que se puede suponer que el esfuerzo cortante del fluido es igual al esfuerzo cortante de la pared τ_w . En la capa viscosa, la tensión viscosa decide el flujo y el perfil de velocidad es lineal, dado por:

$$u^+ = y^+ \tag{24}$$

En la Figura 2.10, la línea azul en la subcapa viscosa representa la relación lineal.

2. La capa transitoria

Las tensiones viscosas y turbulentas son de similar magnitud y, dado que es complejo, el perfil de velocidades no está bien definido y las funciones de la pared original evitan el primer centro celular ubicado en esta región. Sin embargo, las funciones mejoradas de la pared permiten que el primer centro de la celda esté ubicado en la capa intermedia. En OpenFOAM, la capa de transitoria se divide en

dos partes. Uno está usando la relación de revestimiento como en la subcapa viscosa, el otro es usar la función logarítmica como en la región logarítmica [24].

3. El área logarítmica ($30 < y^+ < 200$).

En la capa logarítmica, el esfuerzo de turbulencia domina el flujo y el perfil de velocidad varía muy lentamente con una función logarítmica a lo largo de la distancia y , dada por:

$$u^+ = \frac{1}{K} \ln(Ey^+) \quad (25)$$

Donde:

K : Constante de Von Karmon igual a 0.41

E : Constante por paredes lisas igual a 9.8

En la Figura 2.10, la línea roja en la región logarítmica representa la relación logarítmica.

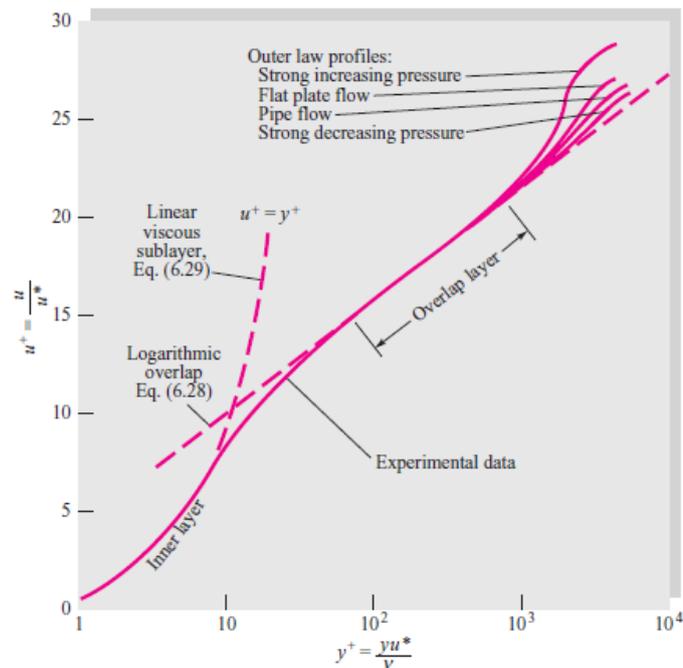


Figura 2.11 Verificación de las leyes de la capa interna, externa y de superposición que relacionan los perfiles de velocidad en un flujo de pared turbulento.

Fuente: Tomado de Fluid Mechanics, Frank M. White, 7ma. Edición [2]

Como se logra ver en la Figura 2.11, se incluye una curva de datos experimentales, desde la subcapa viscosa hasta el área logarítmica. La curva experimental tiene una gran similitud con la curva de relación lineal $u^+=y^+$ en la región de la subcapa viscosa, luego mantiene una tendencia logarítmica a medida que y^+ crece hasta un orden de 10^3 donde se separa para distintos fluidos.

Para la realización de este proyecto, es de interés especial el análisis de la región de la subcapa viscosa, donde los efectos viscosos cobran importancia. Para ello se usará la implementación de funciones cercanas de pared que logren resolver la capa límite al completo como se indica en la Figura 2.12.

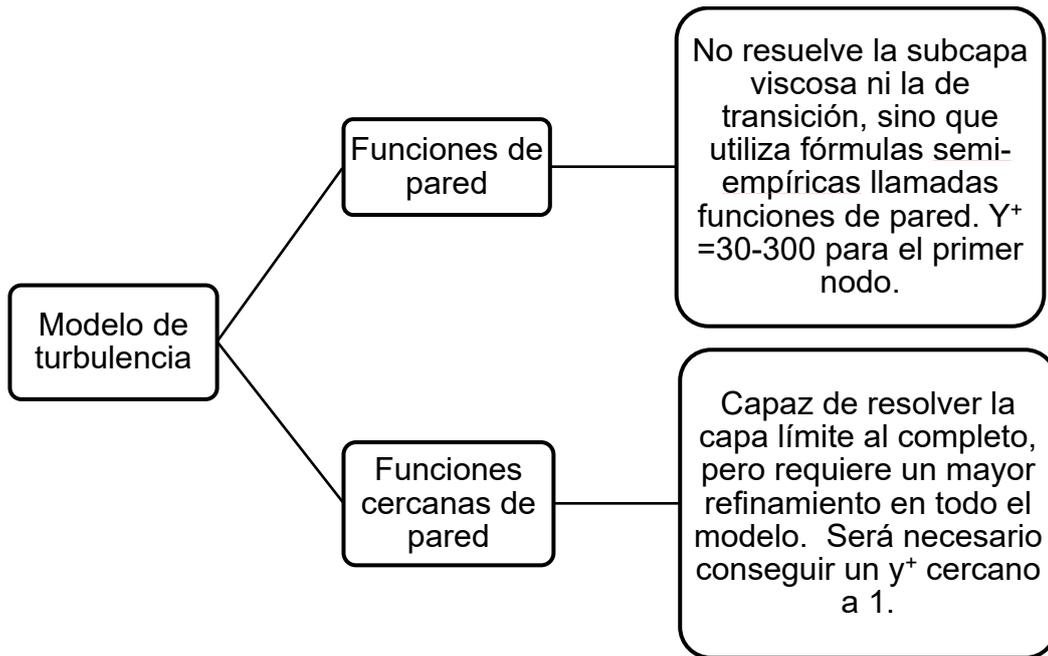


Figura 2.12 Descripción de funciones de pared y funciones cercanas de pared.

Fuente: Elaboración propia

2.7.3 Low-Reynolds-Number (LRN)

Las funciones cercanas de pared escogidas en el presente proyecto son Low-Reynolds-Number (LRN) models. Debido a que, en las inmediaciones de la pared, donde se desarrolla la capa límite, se extiende al régimen completamente turbulento. Aunque solo ocupa una parte pequeña del flujo, esta región puede representar la mayor parte del tiempo de cálculo. La razón de este costo computacional relativamente alto es que las propiedades del flujo de la capa límite cambian a una tasa típicamente dos o más órdenes de magnitud más rápido que en otras partes del flujo [25].

Una malla computacional muy fina, como se observa en la Figura 2.13 en (a), es requerida por estos altos gradientes para ser resueltos con precisión. La familia de modelos de turbulencia que utiliza esta estrategia para resolver la capa límite se denomina modelos de bajo número de Reynolds (LRN). Estos modelos usan el mismo conjunto de ecuaciones para todas las partes del flujo y pueden ser precisos para la mayoría de los tipos de flujos, pero el sistema de ecuaciones resultante converge lentamente, especialmente en números de Reynolds altos (HRN).

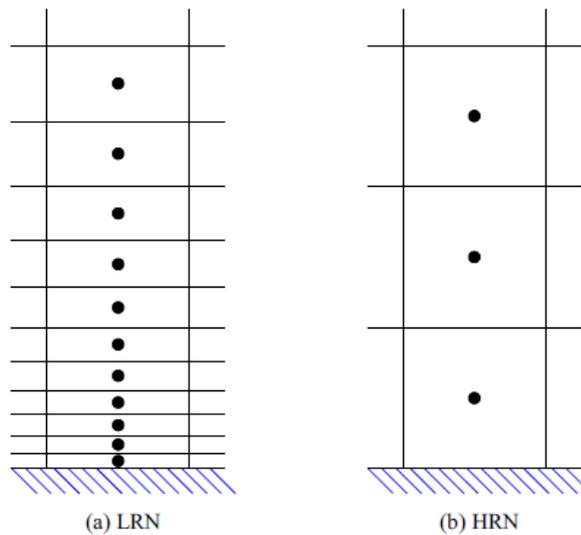


Figura 2.13 Estrategias típicas de malla cerca de la pared usando LRN Y HRN

Fuente: Tomado de Evaluating of numerical wall functions on the axisymmetric impinging jet using OpenFOAM [25]

Para mitigar la lenta convergencia de los modelos LRN, la capa límite y la región completamente turbulenta pueden desacoplarse. El enfoque más común es el modelo de alto número de Reynolds (HRN) junto con una "función de pared", que utiliza una malla gruesa donde la primera capa de celda cubre la capa límite interior, incluida la parte interior de la capa de registro, como se puede observar en la Figura 2.13. Los modelos HRN con funciones de pared suelen ser menos precisos y también son sensibles a la resolución de la malla cerca de la pared.

2.7.4 Selección de funciones cercanas de pared en OpenFOAM

En el directorio "0" en OpenFOAM, se especifican los nombres de las funciones cercanas de pared para implementar, en los Scripts de cada parámetro del método de turbulencia como se puede observar en la Tabla 2.2 y como se ejemplifica en Figura 2.14.

Tabla 2.2 Funciones cercanas de pared para cada parámetro de turbulencia

Archivo	Nombre función cercana de pared
k	kLowReWallFunction
epsilon	epsilonLowReWallFunction
nut	nutLowReWallFunction

The figure displays three screenshots of OpenFOAM case dictionaries, each with a red box highlighting a specific boundary condition type for the 'hull' patch.

- k.orig:** Shows the definition for the 'k' model. The 'hull' patch is defined with the type `kLowReWallFunction;`.
- nut.orig:** Shows the definition for the 'nut' model. The 'hull' patch is defined with the type `nutLowReWallFunction;`.
- omega.orig:** Shows the definition for the 'omega' model. The 'hull' patch is defined with the type `omegaWallFunction;`.

Figura 2.14 Implementación de funciones cercanas de pared en OpenFOAM

2.8 Solución de Prandtl y Blasius de la capa límite

Los detalles del flujo viscoso incompresible que pasa alrededor de cualquier objeto se pueden obtener resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes, resumidas en su forma compacta en la ecuación (12). Usando los conceptos de capa límite, Prandtl pudo imponer ciertas aproximaciones (válidas para flujos con número de Reynolds grandes) y así simplificar las ecuaciones rectoras de N-S. Por su parte, H. Blasius, uno de los estudiantes de Prandtl, pudo resolver las ecuaciones simplificadas para el flujo de la capa límite que pasa por una placa lisa paralela al flujo.

Los resultados sobre la capa límite para varios perfiles de velocidad de flujo son presentados en la Tabla 2.3 los cuales constituyen la solución de la integral de la cantidad de movimiento de una placa lisa.

Tabla 2.3 Resultados integrales de una placa lisa para varios perfiles de velocidad de flujo laminar supuestos

Carácter del perfil	$\frac{\delta}{x} Re_x^{\frac{1}{2}}$	$C_f Re_x^{\frac{1}{2}}$	$C_{Df} Re_x^{\frac{1}{2}}$
Solución de Blasius	5.00	0.664	1.328
Lineal $\frac{u}{U} = \frac{y}{\delta}$	3.46	0.578	1.156
Parabólica $\frac{u}{U} = 2\frac{y}{\delta} - \left(\frac{y}{\delta}\right)^2$	5.48	0.730	1.460
Cúbica $\frac{u}{U} = \frac{3}{2}\left(\frac{y}{\delta}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{y}{\delta}\right)^3$	4.64	0.646	1.292
Onda Senoidal $\frac{u}{U} = \sin\left[\frac{\pi}{2}\left(\frac{y}{\delta}\right)\right]$	4.79	0.655	1.310

2.9 Post procesamiento

Una de las fases más importantes en el proceso de CFD es la etapa del post procesamiento de los resultados. OpenFOAM no cuenta con una interfaz gráfica para la visualización de los resultados, por lo que se utiliza programas externos para llevar a cabo la etapa del post procesamiento como por ejemplo ParaView, gnuPlot o el desarrollo de scripts para la automatización de extracción de datos en OpenFOAM.

1. ParaView

Es un software de visualización de campos para todo tipo de superficies o geometrías. Se puede realizar muestreos de datos de campo por medio del uso de figuras tales como puntos, líneas o planos mediante la opción *Source*. También nos permite aplicar iso-superficies, planos de cortes, vectores entre otros para la visualización deseada de los campos de estudio mediante la opción *Filters*.

2. GnuPlot

Es una herramienta que nos permite graficar los datos generados en archivos de texto en modo columna. Es capaz de graficar tanto durante como después de las simulaciones. Es una buena opción para el control de los residuales durante la simulación numérica ya que OpenFOAM no posee una interfaz para ello.

3. Calculadores de OpenFOAM

Representa los nuevos campos de datos para realizar ciertas operaciones. Los datos de las carpetas temporales son utilizados una vez que la simulación haya terminado.

- foamCalc: Separa componentes de datos de campos vectoriales, calcula gradientes y divergencias.
- yPlus: Permite obtener el y^+ a lo largo de la cara de la pared.
- patchAverage: Realiza el cálculo de valores medios de un campo en planos, caras, etc.
- patchIntegrate: Realiza el cálculo de valores acumulados de un campo en planos, caras, etc.
- Vorticity: Para cada tiempo permite obtener los campos de vorticidad.
- wallShearStress: Realiza el cálculo de los esfuerzos cortantes en las superficies.

2.9.1 Cálculo de la resistencia al avance

Se puede calcular la resistencia al avance mediante la suma de las fuerzas de presión normal y viscosidad tangencial calculadas por OpenFOAM.

- Fuerzas de presión normal:

$$F_{presión} = \sum_i^n \rho_i S_{f,i} (p_i - p_{ref}) \quad (26)$$

Donde,

ρ_i : Densidad del fluido

$s_{f,i}$: Vector de área de la cara

p_i : Presión

p_{ref} : Presión referencial

- Fuerzas de viscosidad tangencial:

$$F_{viscosidad} = \sum_i^n \rho_i (\mu R_{dev}) \quad (27)$$

Donde,

R_{dev} : Tensor desviador de tensiones

2.9.2 Validación y Verificación

Se recomienda simular el mismo problema utilizando al menos 3 distintos tamaños de mallas para completar análisis de validación y verificación, donde se evalúa la incertidumbre del modelo numérico respecto de los datos experimentales. Para este análisis se seguirá el proceso de extrapolación de Richardson y las recomendaciones dadas por la ITTC [22]

En este proyecto, la estimación de la incertidumbre numérica de la simulación es estimada considerando las contribuciones individuales de los distintos tipos de errores:

$$U_{SN}^2 = U_i^2 + U_G^2 \quad (28)$$

Donde,

U_i : Incertidumbre de la iteración

U_G : Incertidumbre de la malla

Los estudios de convergencia de parámetros se llevan a cabo utilizando soluciones múltiples con un refinamiento sistemático de los parámetros. Se establece la razón entre el tamaño de las mallas utilizadas:

$$r_{G_{j,i}} = \frac{h_j}{h_i} \quad (29)$$

Donde,

h : Tamaño de malla

i, j : Subíndices de tamaños representativos de mallas (1= malla fina, 2= malla intermedia, 3= malla gruesa)

El proceso de convergencia requiere un mínimo de $m=3$ soluciones para el análisis respecto del parámetro de entrada. Se debe tener en cuenta que $m=2$ es inadecuado, ya que solo nos indica la sensibilidad mas no la convergencia. Los cambios entre soluciones se utilizan para definir el radio de convergencia:

$$\varepsilon_{j,i} = S_j - S_i \quad (30)$$

$$R_G = \frac{\varepsilon_{ji}}{\varepsilon_{kj}} \quad (31)$$

Donde:

ε : Diferencia de resultados de simulación

S : Resultado de la simulación

R_G : Radio de convergencia

Se definen las condiciones de convergencia del proceso:

Convergencia monótona: $0 < R_G < 1$

Convergencia oscilatoria: $R_G < 0$

Divergencia: $R_G > 1$

Para la condición de convergencia monótona se utiliza el proceso de extrapolación de Richardson para la estimación del error respecto de la malla más fina:

$$\delta_{REG}^* = \frac{\varepsilon_{ji}}{R_G^{PG} - 1} \quad (32)$$

$$PG = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_{kj}}{\varepsilon_{ji}}\right)}{\ln(R_G)} \quad (33)$$

Basado en estudios de verificación, el concepto de factor de corrección es útil como una medida cuantitativa para determinar la proximidad de las soluciones, tener en cuenta los efectos de los términos de orden superior y estimar errores de incertidumbre.

$$C_G = \frac{R_G^{PG} - 1}{R_G^{PGest} - 1} \quad (34)$$

Donde,

$PGest$: Toma el valor de 2

La incertidumbre y el error de la malla incluyendo el factor de corrección, se estima:

$$U_G = |C_G \delta_{REG}^*| + |(1 - C_G) \delta_{REG}^*| \quad (35)$$

$$\delta_G = C_G \delta_{REG}^* \quad (36)$$

La incertidumbre del error de malla es calculada como:

$$U_{GC} = |(1 - C_G) \delta_{REG}^*| \quad (37)$$

La corrección de la solución viene dada por:

$$S_C = S_G - \delta_G \quad (38)$$

Donde,

S_G : Resultado de la simulación

Tomar en cuenta que nivel ingenieril un porcentaje menor al 5% del δ_G y U_{GC} es aceptable.

La incertidumbre de iteración es estimada mediante:

$$U_i = (2|1 - C_G| + 1) \delta_{REG}^* \quad (39)$$

Para la estimación de la incertidumbre de la validación usamos la siguiente expresión:

$$U_V^2 = U_{SN}^2 + U_D^2 \quad (40)$$

La simulación se valida si $|E| < U_V$, es decir, si la combinación de los errores experimentales y numéricos es menor que la incertidumbre de validación. Bajo esta condición la simulación se valida dentro del nivel U_V

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La confiabilidad de los resultados obtenidos depende en gran medida de la calidad de la malla utilizada para la ejecución de las simulaciones numéricas que es obtenida por una incertidumbre de malla menor al 5% que aceptable a nivel ingenieril. En este capítulo se presentan los métodos de validación y verificación del proceso numérico de las simulaciones con funciones de pared y funciones cercanas de pared, con el objetivo de determinar el efecto del tipo de función de pared en la incertidumbre numérica de las simulaciones. Además, se realizó la comparación numérica de los resultados obtenidos en el proceso de verificación y validación usando funciones de pared con las simulaciones en las cuales se usaron funciones cercanas de pared para las velocidades experimentales a la profundidad $H/D=5.4$, es decir no se incluyen los efectos de la superficie libre.

En esta sección las condiciones de navegación son descritas para la ejecución de las simulaciones numéricas. Además, se determinaron las condiciones de navegación para la validación y verificación del proceso numérico y se comparó con el valor experimental de la fuerza de resistencia al avance. Con la malla más fina, que se validó y verificó siguiendo las recomendaciones de la ITTC, se realizaron las simulaciones numéricas de acuerdo con el modelo numérico escogido. Además, se compara el perfil de velocidad numérico obtenido dentro de la capa límite con los resultados experimentales en túneles de viento [26], para cuantificar la influencia del uso de funciones cercanas de pared en la predicción del problema de interés. Finalmente se realizó un análisis económico del presupuesto del proyecto asumiendo que es posible presentar una propuesta de consultoría a nivel profesional en donde se desglosan y detallan los rubros a considerar.

3.1 Condiciones para el análisis de convergencia y simulaciones

Para el proceso de la convergencia de la malla se eligió la configuración 2 de popa, es decir, solo se incluye el casco del submarino y la vela, de acuerdo con las características especificadas en la Figura 3.1.

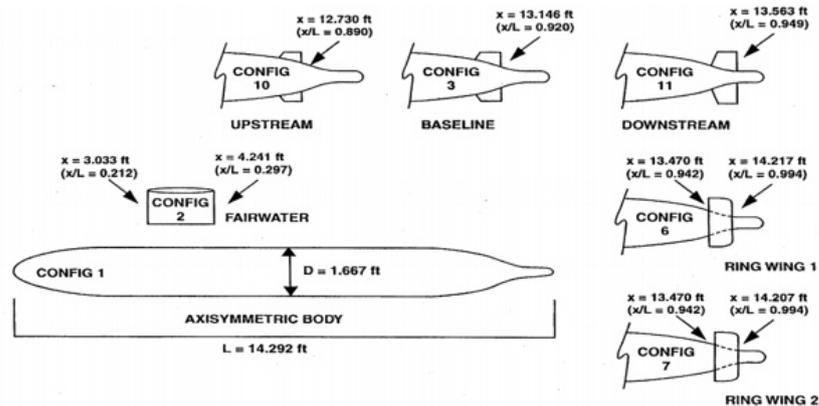


Figura 3.1 Configuraciones de popa del submarino DARPA SUBOFF-5470

Fuente: Tomado de Summary of DARPA Suboff Experimental Program Data, 1998

[27]

Config. No.	Axisym Body	Fair-water	4 Stern Appendages			Ring Wing # 1	Ring Wing # 2	Angle of Attack		Angle of Drift	
			Base line	Up stream	Down stream			0°	2°	0°	2°
1	x							x		x	
2	x	x						x		x	
3	x		x					x		x	
4	x	x							x	x	
5	x	x						x			x
6	x					x		x		x	
7	x						x	x		x	
8	x	x	x					x		x	

Figura 3.2 Definición de las configuraciones del modelo

Fuente: Tomado de Summary of DARPA Suboff Experimental Program Data, 1998

[27]

Para el proceso de convergencia de la malla se escogió de las pruebas experimentales del programa SUBOFF, la condición de mayor profundidad y velocidad, cuyos datos experimentales se detallan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Selección de variable para validación

H/D	5.4	
Fr _L	0.47	
Velocidad	5.920	[nudos]

	3.046	[m/s]
Resistencia	94.29	[N]
C_T	0.0033	

El proceso de convergencia fue realizado considerando simulaciones que utilizan funciones de pared y funciones cercanas de pared. Para ambos casos, se consideraron iguales números de elementos para las mallas seleccionadas.

Las simulaciones numéricas fueron realizadas considerando sólo funciones cercanas de pared, tomando en cuenta que, el interés de este trabajo es el análisis del flujo dentro de la subcapa viscosa que es el interés de este trabajo. El análisis fue realizado para tres velocidades de navegación para $H/D=5.4$ las cuales son: 1.660 m/s, 3.939 m/s y 5.920 m/s, que corresponden a los números de Froude 0.13, 0.31 y 0.47 respectivamente.

3.2 Estimación teórica del espesor de la capa límite

La estimación teórica de la capa límite es evaluada usando la solución de Blasius para número de Reynolds bajos, descrita en la Tabla 2.3. Los resultados para distintos porcentajes a lo largo de la eslora del modelo son mostrados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Estimación del espesor de la capa límite usando solución de Blasius

δ [m] (Blasius)			
x/L	U=1.66 nudos	U=3.939 nudos	U=5.92 nudos
0	-	-	-
0.1	3.73E-03	2.42E-03	1.97E-03
0.2	5.27E-03	3.42E-03	2.79E-03
0.3	6.46E-03	4.19E-03	3.42E-03
0.4	7.46E-03	4.84E-03	3.95E-03
0.5	8.34E-03	5.41E-03	4.41E-03
0.6	9.13E-03	5.93E-03	4.84E-03
0.7	9.86E-03	6.40E-03	5.22E-03
0.8	1.05E-02	6.85E-03	5.58E-03
0.9	1.12E-02	7.26E-03	5.92E-03
1.0	1.18E-02	7.65E-03	6.24E-03

Para posterior comparación con la evidencia experimental del modelo estudiando, se usarán los resultados al 10 y 20% de la eslora.

3.3 Estimación del y^+ teórico

Para funciones cercanas de pared es recomendado que el primer punto desde la pared sea cercano a 1 (requerido). Es así como se realizó la estimación del y^+ , que se muestra en la Tabla 3.3, para las tres velocidades de análisis y se determinaron los parámetros del SnappyHexMesh en OpenFOAM considerando que las simulaciones fueron corridas con la malla más fina.

Tabla 3.3 Estimación teórica del y^+

Velocidad [nudos]	U_k	1.66	3.939	5.92
Velocidad [m/s]		0.854	2.026	3.046
Froude	F_n	0.13	0.31	0.47
Numero de Reynolds	Re_L	2.92E+03	4.50E+03	5.52E+03
Coefficiente friccional	C_f	3.49E-02	2.74E-02	2.47E-02
Distancia adimensional requerida	y^+	1	1	1
Distancia al primer punto [m]	y	9.66E-06	4.59E-06	3.22E-06
Tamaño de malla alrededor del casco [m]	$dx dy$	0.05	0.05	0.05
Número de capas superficiales		8	8	8
Radio de expansión		1.014	1.014	1.014
Espesor relativo de la última capa		0.20	0.20	0.20
Espesor de capa final [m]		0.01	0.01	0.01
Esfuerzo en la pared [N/m²]	τ_w	12.72	56.28	114.53
Velocidad friccional [m/s]	u^*	0.113	0.237	0.339
Velocidad a la pared adimensional	u^+	7.57	8.54	8.99
Distancia adimensional	y^+	2.33	4.21	4.98

De acuerdo con los resultados obtenidos, se esperó teóricamente tener un y^+ menor a 5. Esta predicción es comparada con los resultados numéricos más adelante. Es así como en el script “snappyHexMeshDict” en el directorio “system” de la carpeta de simulación en OpenFOAM, se ingresan el número de capas, el radio de expansión y el espesor relativo de la última capa, como se muestra en la Figura 3.3.

```

snappyHexMeshDict
193 // Per final patch (so not geometry!) the layer information
194 layers
195 {
196     hull
197     {
198         nSurfaceLayers 8;
199     }
200 }
201
202
203 // Expansion factor for layer mesh
204 expansionRatio 1.014;
205
206
207 // Wanted thickness of final added cell layer. If multiple layers
208 // is the thickness of the layer furthest away from the wall.
209 // Relative to undistorted size of cell outside layer.
210 // See relativeSizes parameter.
211 finalLayerThickness 0.2;
212

```

Figura 3.3 Script SnappyHexMeshDict para $Fn = 0.47$

3.4 Cálculo de los parámetros de la turbulencia

En la Tabla 3.4 se presenta la estimación de los parámetros de la turbulencia para las simulaciones numéricas a la profundidad $H/D=5.4$ y para cada velocidad de análisis.

Tabla 3.4 Parámetros de turbulencia

Velocidad [nudos]	U	1.66	3.939	5.92
Velocidad [m/s]	U	0.854	2.026	3.046
Froude	Fn	0.13	0.31	0.47
Número de Reynolds	Re	3.41E+06	8.10E+06	1.22E+07
Longitud de ola [m]	λ_{OLA}	0.47	2.63	5.94
Distancia adimensional teórica	$y^+_{teórico}$	2.33	4.21	4.98
Intensidad de turbulencia	I	0.024	0.022	0.021
Energía cinética [m^2/s^2]	$K_{INICIAL}$	0.000652	0.002956	0.006030
Frecuencia media [1/s]	$\omega_{INICIAL}$	12.50	41.01	71.81
Viscosidad turbulenta [m^2/s]	ν_T	0.0000521	0.0000721	0.0000840

Estos resultados fueron insertados en los scripts “k”, “nut” y “omega” del directorio “0” en la carpeta de simulaciones de OpenFOAM, como se muestran en Figura 3.4, Figura 3.5 y Figura 3.6.

```

1  /*----- C++ -----*/
2  =====
3  \ \ / / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4  \ \ / / O p e r a t i o n | Website: https://openfoam.org
5  \ \ / / A n d           | Version: 7
6  \ \ / / M a n i p u l a t i o n |
7  /*-----*/
8  FoamFile
9  {
10     version      2.0;
11     format        ascii;
12     class         volScalarField;
13     location      "0";
14     object        k;
15 }
16 // *****
17
18 dimensions      [0 2 -2 0 0 0];
19
20 internalField   uniform 0.00603;
21

```

Figura 3.4 Script k para malla fina $F_n = 0.47$

```

1  /*----- C++ -----*/
2  =====
3  \ \ / / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4  \ \ / / O p e r a t i o n | Website: https://openfoam.org
5  \ \ / / A n d           | Version: 7
6  \ \ / / M a n i p u l a t i o n |
7  /*-----*/
8  FoamFile
9  {
10     version      2.0;
11     format        ascii;
12     class         volScalarField;
13     location      "0";
14     object        nut;
15 }
16 // *****
17
18 dimensions      [0 2 -1 0 0 0];
19
20 internalField   uniform 0.0000840;
21

```

Figura 3.5 Script nut para malla fina $F_n = 0.47$

```

1  /*----- C++ -----*/
2  =====
3  \ \ / / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4  \ \ / / O p e r a t i o n | Website: https://openfoam.org
5  \ \ / / A n d           | Version: 7
6  \ \ / / M a n i p u l a t i o n |
7  /*-----*/
8  FoamFile
9  {
10     version      2.0;
11     format        ascii;
12     class         volScalarField;
13     location      "0";
14     object        omega;
15 }
16 // *****
17
18 dimensions      [0 0 -1 0 0 0];
19
20 internalField   uniform 71.81;
21

```

Figura 3.6 Script omega para malla fina $F_n = 0.47$

3.5 Validación y verificación del mallado

Se realizó la evaluación de la incertidumbre de las simulaciones numéricas siguiendo las recomendaciones de la International Towing Tank Conference

(ITTC). Este proceso nos permite cuantificar el error entre los resultados experimentales y los de simulación numérica, y determinar la confiabilidad del análisis numérico.

3.5.1 Generación del mallado

Se seleccionaron 3 mallas para en análisis de convergencia. Utilizando las ecuaciones (13) y (14) se determinó la longitud de malla escogiendo el Froude de 0.13 para el cálculo de las longitudes de celda en las 3 direcciones. Se aplicó a todas las mallas (fina, intermedia y gruesa) un factor de refinamiento de $\sqrt{2}$, lo cual permite una adecuada sensibilidad para analizar mallas finas y gruesas. En la Tabla 3.5, se muestran las dimensiones de las mallas seleccionadas para el proceso de validación y verificación.

Tabla 3.5 Dimensiones de las mallas seleccionadas

Malla	Fina	Intermedia	Gruesa
# Celdas	1'455,715	663,820	248,119
$\Delta x_{\text{background}}$ [m]	0.04	0.04	0.04
Δx [m]	0.04	0.07	0.1
Δy [m]	0.04	0.07	0.1
Δz [m]	0.04	0.07	0.1

Se denomina “fina” a la malla que presenta la mayor cantidad de elementos o celdas en el dominio computacional. Esto se logra disminuyendo las dimensiones de los elementos en las tres direcciones, generando una malla más pequeña y pesada considerando el gasto computacional. Por otra parte, las siguientes mallas son de mayor tamaño, siendo la denominada “malla gruesa” la que posee la menor cantidad de celdas y por tanto se considera la malla más ligera. Para las tres mallas descritas las dimensiones en x e y son iguales. En dirección z el tamaño varía con gradiente por los niveles configurados. El tipo de mallado seleccionado fue ortogonal. Se seleccionaron 9 niveles de refinamiento en sentido vertical (eje z), 6 conjuntos o “topoSets” alrededor del modelo y 8 capas sobre la geometría del submarino. Debido a la simplicidad de la geometría no se consideró necesaria la implementación de refinamientos localizados por zonas. Los topoSets escogidos darán el grado de refinamiento en toda la geometría.

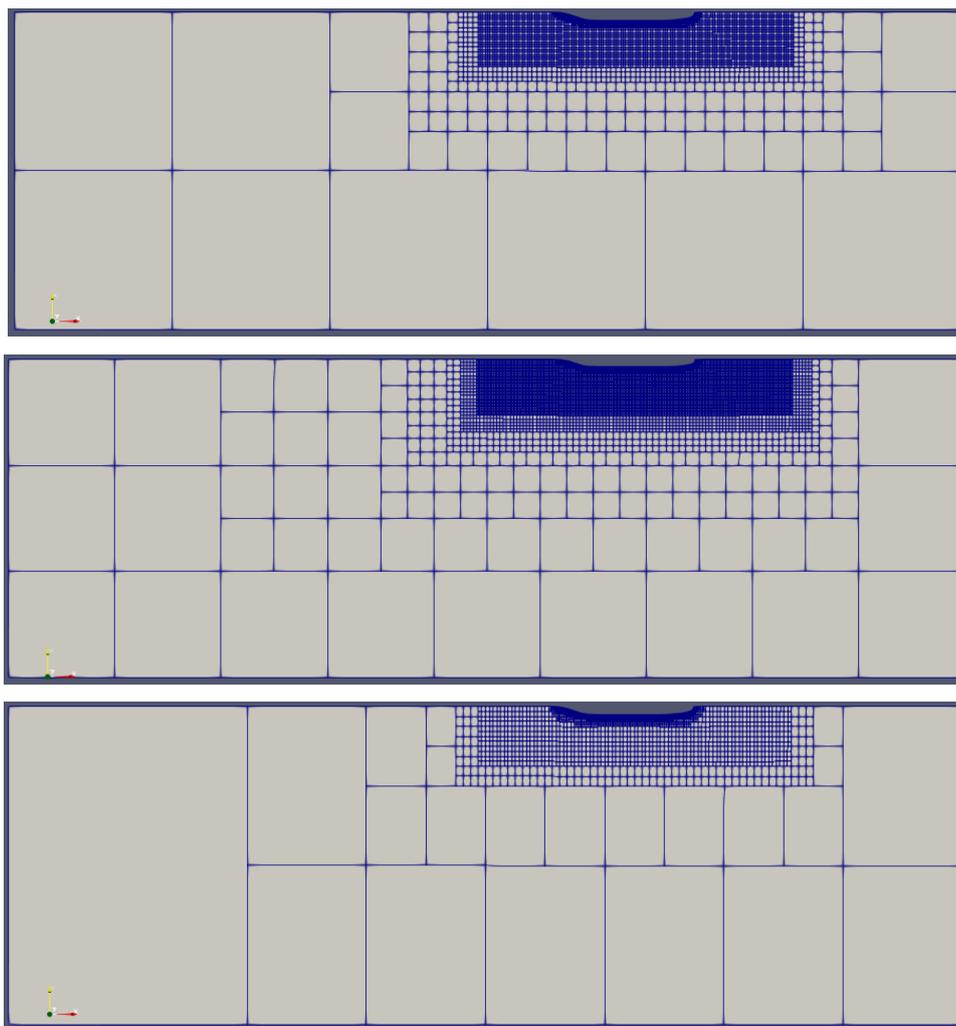


Figura 3.7 Vista XZ Mallas fina, intermedia y gruesa

En la Figura 3.7 podemos apreciar la diferencia entre las tres mallas seleccionadas, habiendo casi una diferencia de 1 millón de elementos entre la fina y la gruesa. Cabe mencionar que el tamaño de la malla incide directamente en el gasto computacional de la simulación numérica, requiriendo mayor tiempo de análisis y recursos computacionales para una malla fina que para una gruesa.

3.5.2 Distribución del número de capas superficiales

Para las 3 condiciones se configuró un total de 8 capas alrededor de la geometría del modelo en el Script “snappyHexMeshDict. Usando el modo de visualización “nSurfaceLayers” en ParaView, se obtuvo la distribución de las capas como se observa en la *Figura 3.8*.

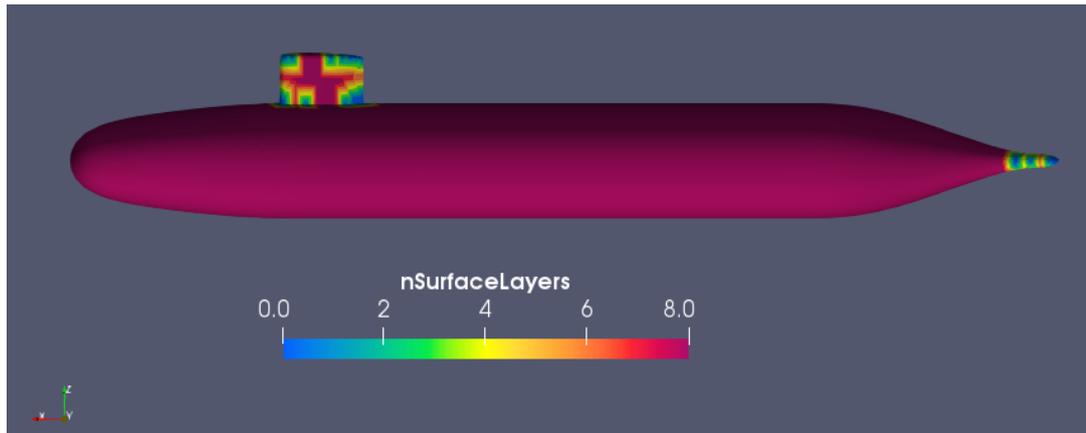
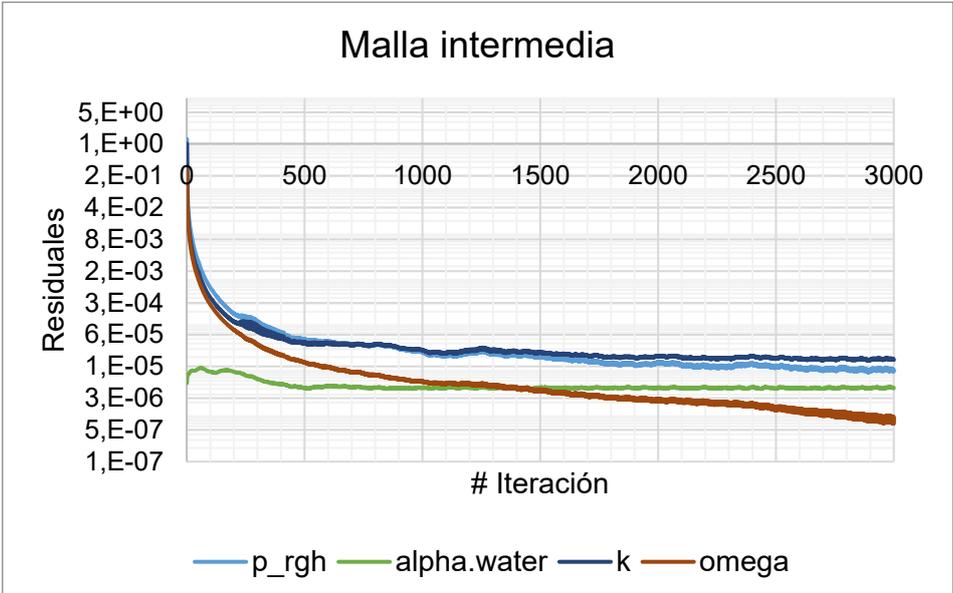
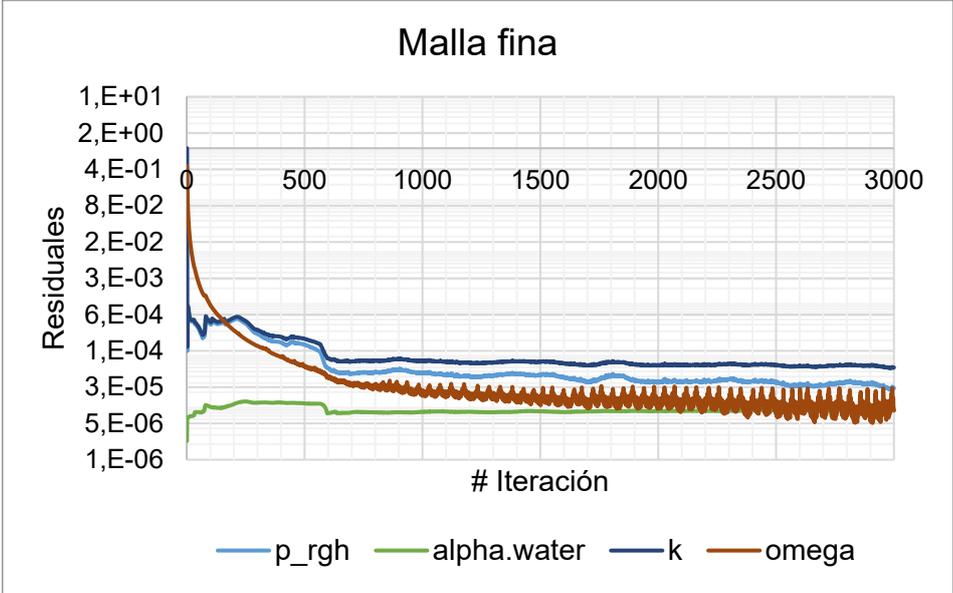


Figura 3.8 Número de capas superficiales para las 3 condiciones de análisis usando funciones de pared

Para las 3 condiciones se usó el mismo mallado con iguales dimensiones, por tanto, la distribución de capas superficiales es la misma para todos los casos. Como podemos observar las regiones de proa y cuerpo medio paralelo del modelo cuentan con una cobertura de ocho capas superficiales uniformemente distribuidas mientras que las regiones de la vela y popa presentan menos capas incluyendo pequeñas zonas donde no las hay. Es muy probable que esta diferencia se deba por los cambios de curvaturas en la geometría o bordes, siendo las zonas como la vela y popa propensas a estructurarse con menos números de capas.

3.5.3 Resultados de la convergencia

Las simulaciones numéricas utilizando funciones de pared y cercanas de pared para la validación de las tres mallas fueron realizadas con ayuda del sistema HPC de la Escuela Politécnica Nacional de Quito. Los residuales de los análisis numéricos de las mallas fina, intermedia y gruesa utilizando funciones de pared, se muestran en la Figura 3.9.



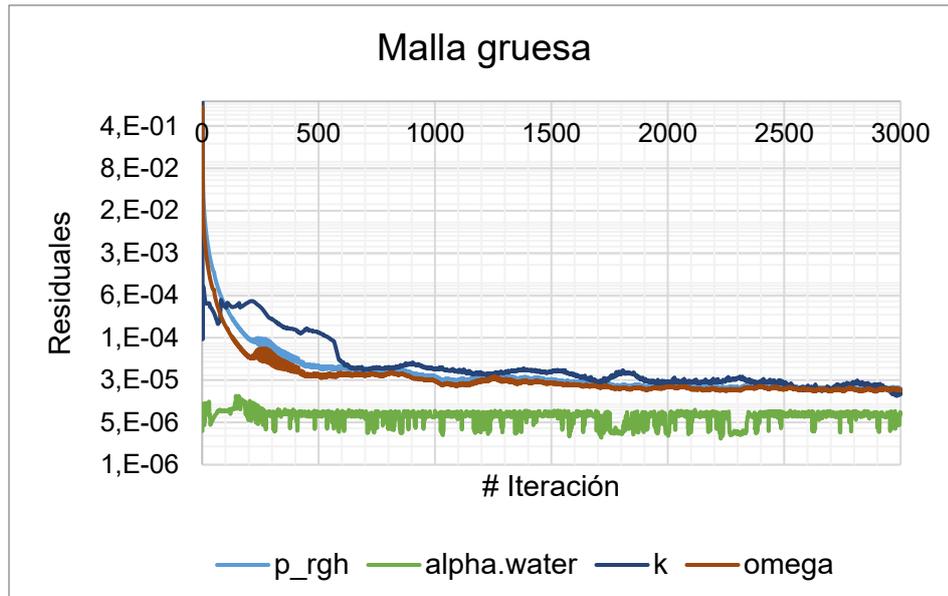


Figura 3.9 Residuales mallas fina (superior), intermedia y gruesa (inferior) usando funciones de pared para $Fn= 0.47$ y $H/D= 5.4$

Los resultados de la convergencia de malla utilizando funciones de pared se presentan en la Tabla 3.6 y las fuerzas de resistencia fueron graficados en la Figura 3.10.

Tabla 3.6 Resultados de resistencia al avance usando funciones de pared

Malla	Fina	Intermedia	Gruesa
% Cobertura de prislayer	99.7%	99.1%	96.9%
Fuerza _{presión} [N]	13.95	15.02	21.36
Fuerza _{viscoso} [N]	85.71	85.11	85.45
Resistencia Total [N]	99.66	100.13	106.81
Resistencia Exp. [N]	94.29	94.29	94.29
% Error	5.7%	6.2%	13.3%
y^+_{min}	7.84	6.68	10.93
y^+_{max}	396.95	470.14	1251.48
y^+_{prom}	65.87	66.07	71.49
Tiempo simulación	8:08:00	6:53:51	5:42:44
# Procesadores	24	24	24

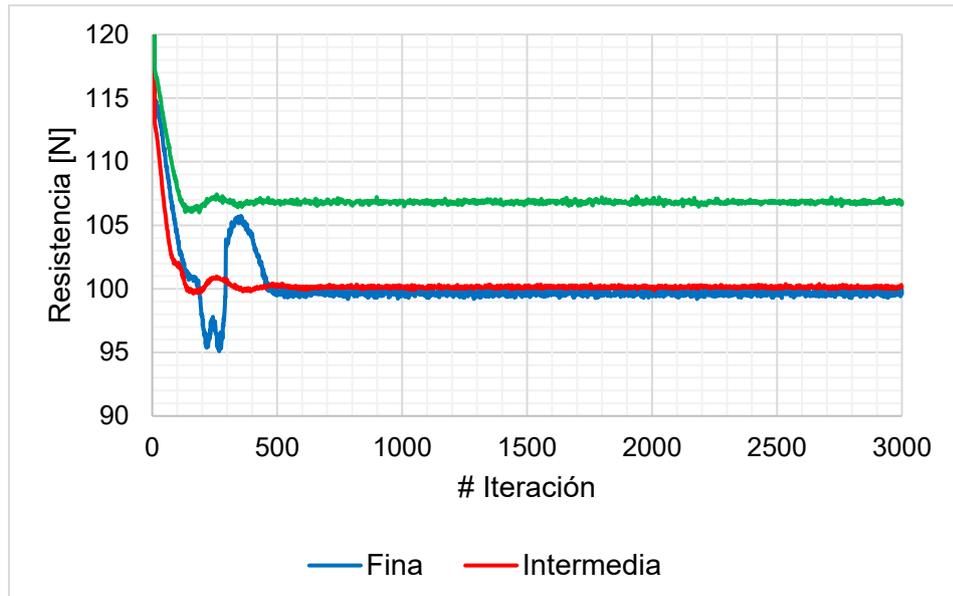
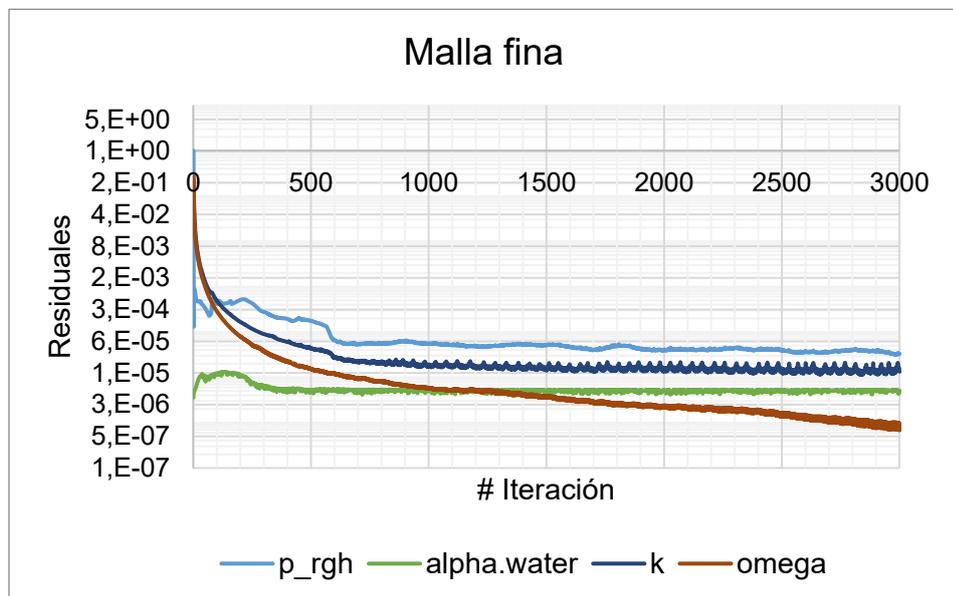


Figura 3.10 Resistencia total en mallas fina, intermedia y gruesa usando funciones de pared para $Fn= 0.47$ y $H/D= 5.4$

De igual modo, los residuales de los análisis numéricos de las mallas fina, intermedia y gruesa utilizando funciones cercanas de pared, se muestran en la Figura 3.11.



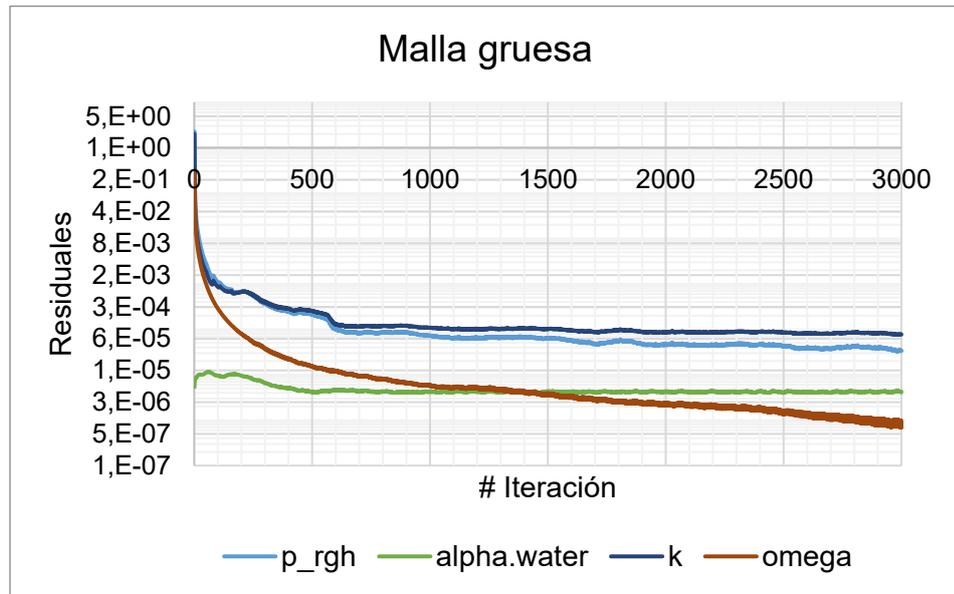
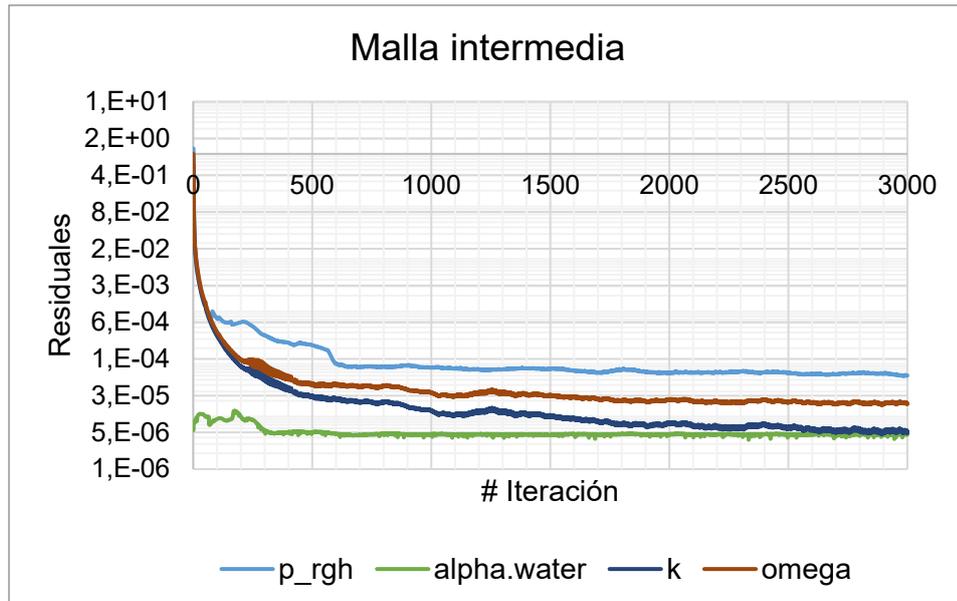


Figura 3.11 Residuales mallas fina (superior), intermedia y gruesa (inferior) usando funciones cercanas de pared para $F_n = 0.47$ y $H/D = 5.4$

Los resultados del proceso de convergencia son detallados en la Tabla 3.7 y se graficaron las fuerzas de resistencia al avance en la Figura 3.12.

Tabla 3.7 Resultados de resistencia al avance usando funciones cercanas de pared

Malla	Fina	Intermedia	Gruesa
% Cobertura de prismalayer	99.4%	99.1%	97.9%
Fuerza _{presión} [N]	13.70	15.24	20.56
Fuerza _{viscoso} [N]	84.16	86.39	82.25

Resistencia Total [N]	97.86	101.63	102.81
Resistencia Exp. [N]	94.29	94.29	94.29
% Error	3.8%	7.8%	9.0%
y^+_{min}	5.67	7.47	11.09
y^+_{max}	178.04	186.51	180.81
y^+_{prom}	23.82	47.84	53.12
Tiempo simulación	14:16:49	11:16:49	8:15:28
# Procesadores	24	24	24

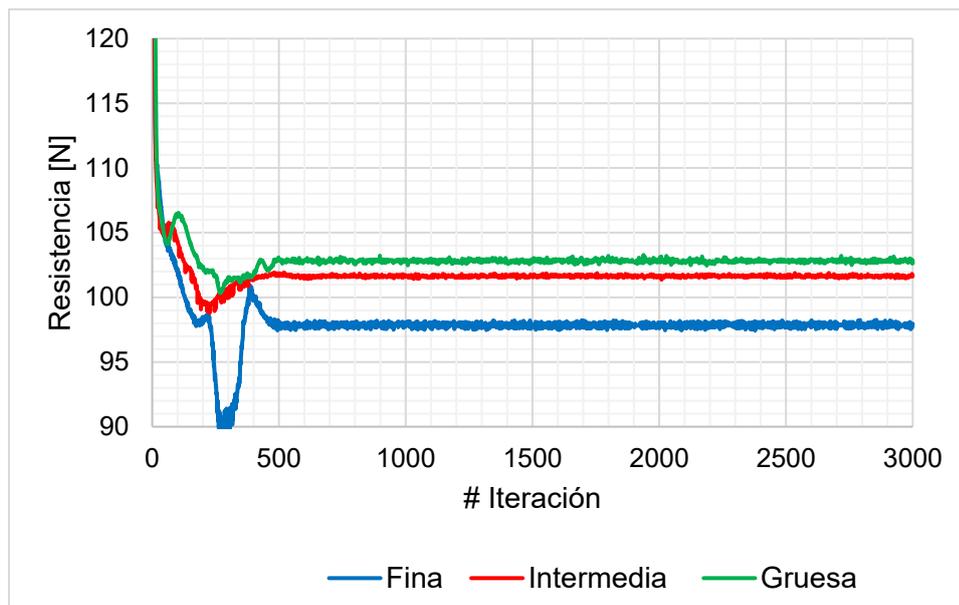


Figura 3.12 Resistencia total en mallas fina, intermedia y gruesa usando funciones cercanas de pared para $F_n= 0.47$ y $H/D= 5.4$

Se realizó el post procesamiento de los resultados de las simulaciones numéricas, evaluando la resistencia total al avance que fue la variable escogida para el proceso de validación y verificación. Aprovechando la simetría del problema se simuló la mitad del casco del modelo, esto implicó que los valores obtenidos de las fuerzas tuvieran que ser multiplicados por 2, como se puede observar en los cuadros Tabla 3.6 y Tabla 3.7. La suma de las componentes de las fuerzas de presión y viscosas nos da como resultado la fuerza de arrastre total del modelo, al ser comparadas con el dato experimental de resistencia total de 94.29 [N]. Se establece que el mayor error se obtuvo para la malla gruesa con un 13.3% usando funciones de pared y 9.0% usando funciones cercanas de pared. Como podemos observar en las figuras Figura 3.10 y Figura 3.12, las fuerzas se estabilizan antes de las 1000 iteraciones por lo que no es necesario simular para un número

exagerado de iteraciones, en este caso se ejecutó hasta las 3000. En las figuras Figura 3.9 y Figura 3.11 se muestran los residuales de las simulaciones numéricas que ayudan a evaluar la convergencia de las simulaciones. Para las tres mallas se obtuvieron residuales menores de $10E-03$ y pendientes negativas a lo largo del número de iteraciones por lo que disminuían en el tiempo. En ambos casos, los tiempos de simulación fueron mayores para la ejecución de la malla fina como es de esperarse, ya que mayor número de elementos requiere un mayor tiempo computacional. Podemos también observar que los tiempos de simulación son mayores cuando se aplicó funciones cercanas de pared, esto se debe al mayor refinamiento de malla que se aplica en las cercanías de la pared sólida aumentando el gasto computacional para su ejecución.

3.5.4 Resultados de Validación y Verificación recomendado por ITTC

En los cuadros Tabla 3.8 y

Tabla 3.9 se muestran los resultados de los coeficientes de total de resistencia para cada malla.

Tabla 3.8 Coeficiente total de resistencia usando Funciones de pared

	Malla 3	Malla 2	Malla 1	Experimental
Elementos	248,119	663,820	1,455,715	
F_{VISCOSA} [N]	85.45	85.11	85.71	
F_{PRESIÓN} [N]	21.36	15.02	13.95	
F_{TOTAL} [N]	106.81	100.13	99.66	
C_T	0.00365	0.00342	0.00341	0.0033
ϵ		0.000228	0.000016	

Tabla 3.9 Coeficiente total de resistencia usando Funciones cercanas de pared

	Malla 3	Malla 2	Malla 1	Experimental
Elementos	248,119	663,820	1,455,715	
F_{VISCOSA} [N]	20.56	15.24	13.70	
F_{PRESIÓN} [N]	82.25	86.39	84.16	
F_{TOTAL} [N]	102.81	101.63	97.86	
C_T	0.00351	0.00347	0.00335	0.0033
ϵ		0.000040	0.000129	

Con los valores calculados en las tablas anteriores, se procedió con el proceso de convergencia y el análisis de verificación respecto de la malla más fina como se muestran en los cuadros Tabla 3.10 y Tabla 3.11.

Tabla 3.10 Verificación de la resistencia total al avance usando Funciones de Pared

	R_G	P_G	δ_{REG}^*	C_G	U_G	S_c	δ_G	U_{GC}
Malla 1-3	0.11	7.66	0.0001%	0.25	0.003%	0.0034	3.33%	1.99%

Tabla 3.11 Verificación de la resistencia total al avance usando Funciones cercanas de Pared

	R_G	P_G	δ_{REG}^*	C_G	U_G	S_c	δ_G	U_{GC}
Malla 1-3	0.13	6.36	0.0188%	0.69	0.045%	0.0032	3.4%	2.02%

En ambos casos como se observa en los cuadros Tabla 3.10 y Tabla 3.11, el valor del radio de convergencia R_G está dentro del rango de 0 y 1, lo cual denota que se obtuvo la condición de convergencia monótona. Esto implica que el proceso de extrapolación de Richardson puede ser aplicado para la verificación usando funciones de pared y cercanas de pared. Se obtuvo un nivel de verificación bajo menor al 5%, según δ_G y U_{GC} obtenidos, lo cual es aceptable para un nivel ingenieril. Los valores de incertidumbres de malla calculados en ambos casos son de baja magnitud lo cual nos da la confianza que la malla implementada es apropiada para el análisis numérico.

Finalmente, en los cuadros Tabla 3.12 y Tabla 3.13 se muestran los resultados de la validación del proceso numérico.

Tabla 3.12 Validación de la simulación numérica usando Funciones de pared

		$E \% (D)$	$U_D\%$	$U_V\%$	Resultado
E=D-S	-1.07E-04	3.24%	2.50%	5.23%	Se valida
EC=D-SC	-9.09E-05	3.15%	2.50%	5.11%	Se valida

Tabla 3.13 Validación de la simulación numérica usando Funciones cercanas de pared

		$E \% (D)$	$U_D\%$	$U_V\%$	Resultado
E=D-S	-4.53E-05	1.37%	2.50%	4.35%	Se valida
EC=D-SC	8.37E-05	2.54%	2.50%	4.89%	Se valida

De acuerdo con los resultados obtenidos en ambos casos se observa que el Error (E) es menor que la incertidumbre de validación (U_v), por lo que valida dentro del Nivel U_v .

3.6 Análisis de las condiciones de navegación usando Funciones cercanas de pared

Para el análisis del efecto de la capa límite sobre la geometría del modelo se realizaron 3 simulaciones numéricas con números de Froude de 0.13, 0.31 y 0.47, a la profundidad de 2.997 m ($H/D=5.4$), tal y como se muestra en la Figura 3.13.

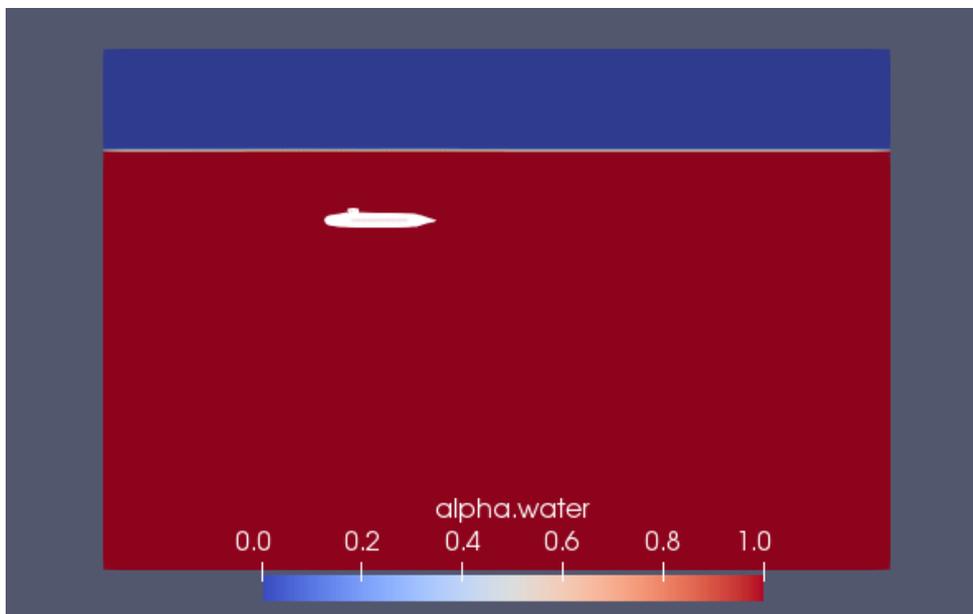


Figura 3.13 Profundidad $H/D=5.4$ para análisis del modelo

En la Tabla 3.14, se especifican las condiciones de navegación para los tres números de Froude escogidos.

Tabla 3.14 Condiciones de navegación

H/D	H [m]	v [nudos]	v [m/s]	Fn
5.4	2.9972	1.66	0.854	0.13
		3.939	2.026	0.31
		5.92	3.046	0.47

En la Figura 3.14 se obtuvo la resistencia total al avance para cada condición y se comparó con los resultados experimentales del modelo.

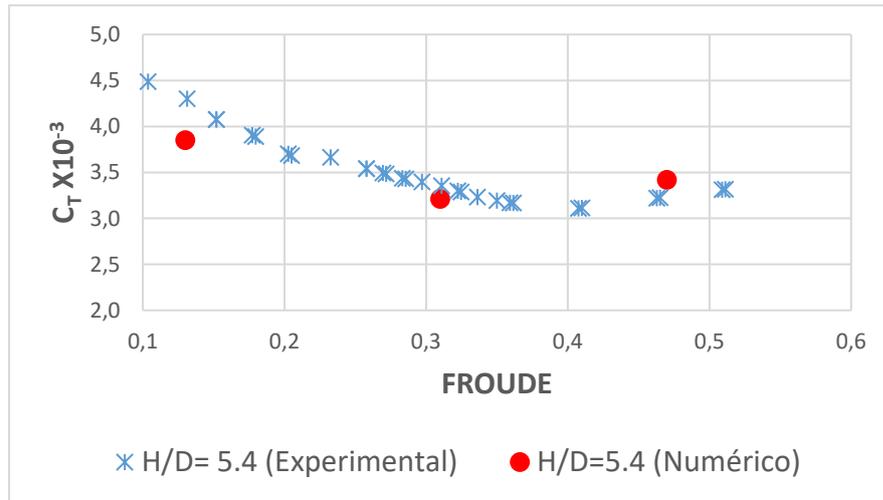


Figura 3.14 Resistencia total para resultados experimentales y numéricos.

Fuente: Obtenido de Summary of DARPA Suboff Experimental Program Data de Han-Lieh Liu y Thomas T. Huang [27]

Tabla 3.15 Resultados de la resistencia total para todas las condiciones de análisis

H/D	F_n	$F_{EXPERIMENTAL}$ [N]	$F_{NUMÉRICO}$ [N]	%Error	y^+_{min}	y^+_{max}	y^+_{prom}
5.4	0.13	9.89	8.85	10.5%	4.30	94.40	17.24
	0.31	43.42	41.55	4.3%	5.35	145.12	29.78
	0.47	94.29	99.96	6.0%	5.67	178.04	37.82

Como se puede observar en la Tabla 3.15, el mayor porcentaje de error se obtiene en las simulaciones con el número de Froude más bajo con un 10.5%. Los errores obtenidos en las otras condiciones se encuentran dentro de un margen ingenieril aceptable. A medida que el número de Froude aumenta, el y^+ crece, registrando un mínimo de 4.30 y un máximo de 178.04 en las simulaciones realizadas. Por simple inspección en la ecuación (14), la longitud de ola crece con el número de Froude al cuadrado, es decir, para longitudes de olas mayores es más difícil obtener un y^+ esperado cercano a 1. A pesar de que se calculó teóricamente un y^+ cercano a 1, las simulaciones numéricas registraron un y^+ promedio muy por encima del calculado usando funciones cercanas de pared, pero al mismo tiempo estas magnitudes están por debajo de las registradas en la validación usando funciones de pared. De este modo se evidencia que usar funciones cercanas de pared es posible llegar a y^+ más bajos que usando funciones de pared.

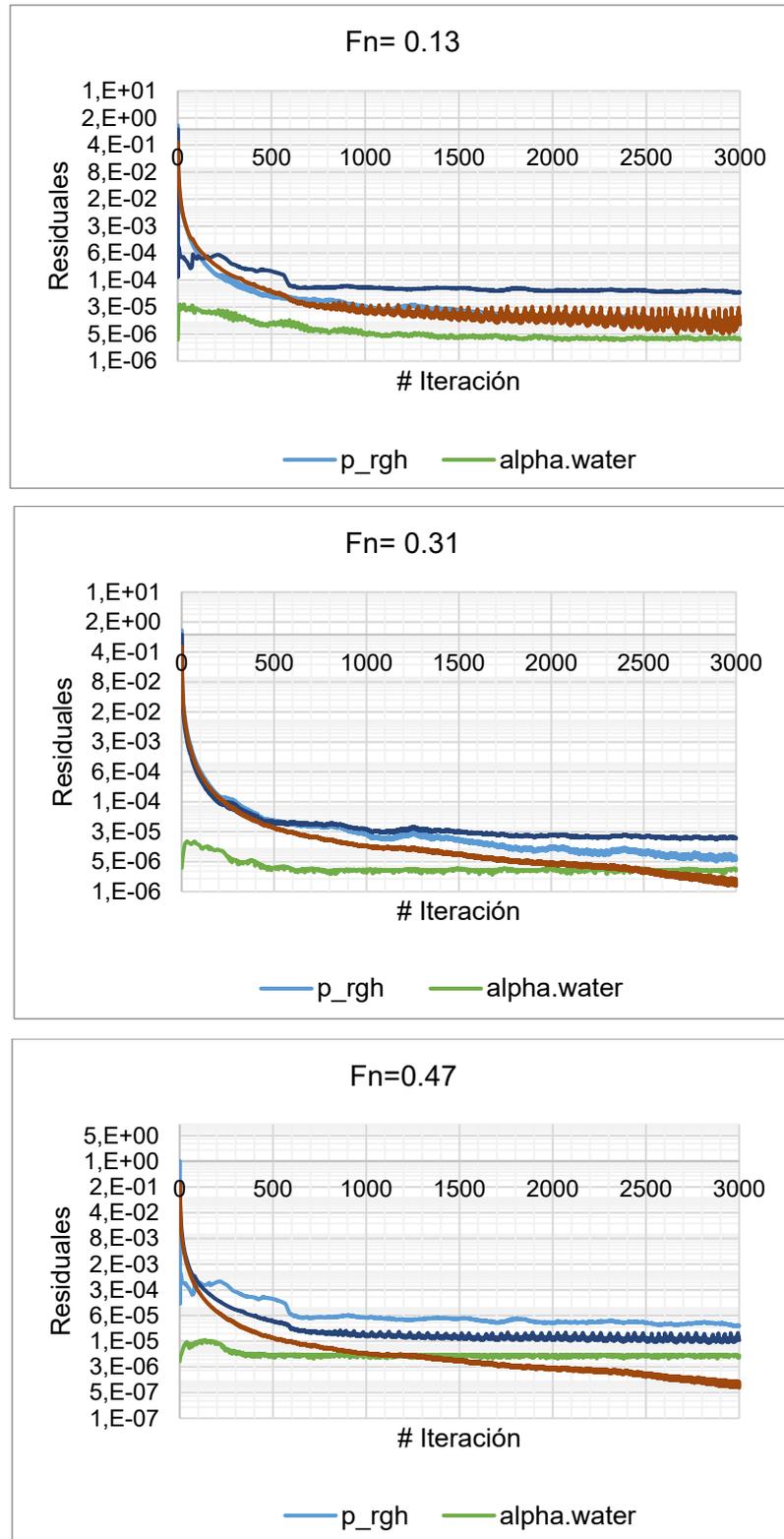


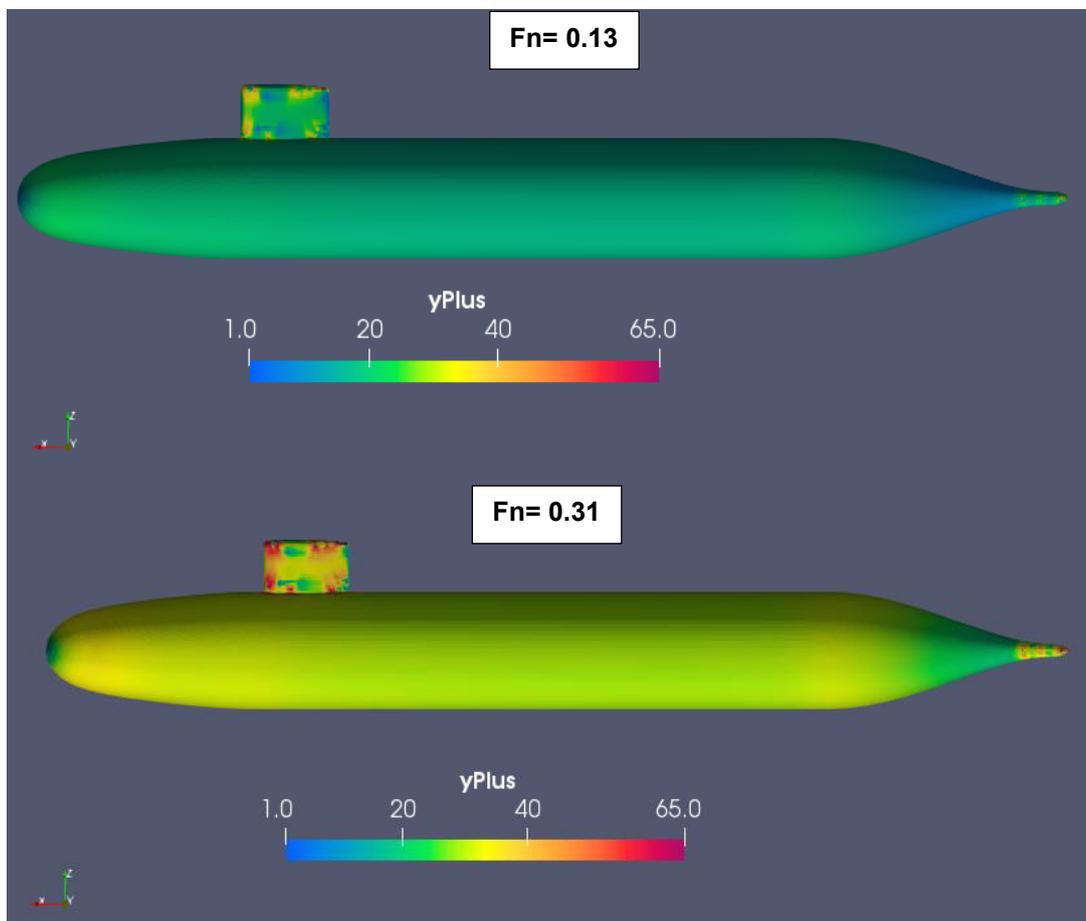
Figura 3.15 Residuales de las condiciones de navegación para distintos números de Froude.

La Figura 3.15 muestra la evolución de los residuales para las 3 condiciones de análisis. Se puede notar que todas las variables graficadas sus valores son

menores que $10E-04$ y sus pendientes negativas, lo cual denota convergencia sobre las iteraciones [28].

3.6.1 Distribución de y^+

Con los parámetros del SnappyHexMeshDict calculados en la Tabla 3.3 y como se ejemplifica en la Figura 3.3, se procedió a obtener la distribución del parámetro y^+ en la geometría del submarino. Para ello se usó el modo de visualización “yplus” en Paraview y se obtuvo que:



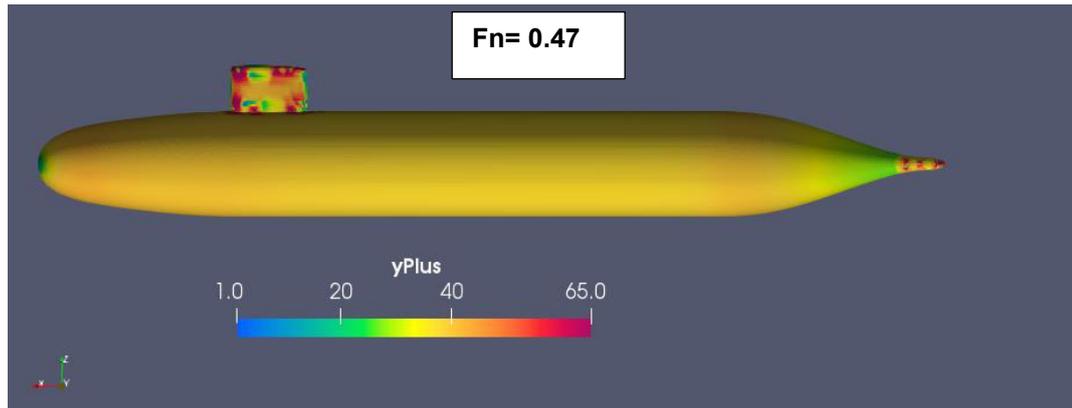
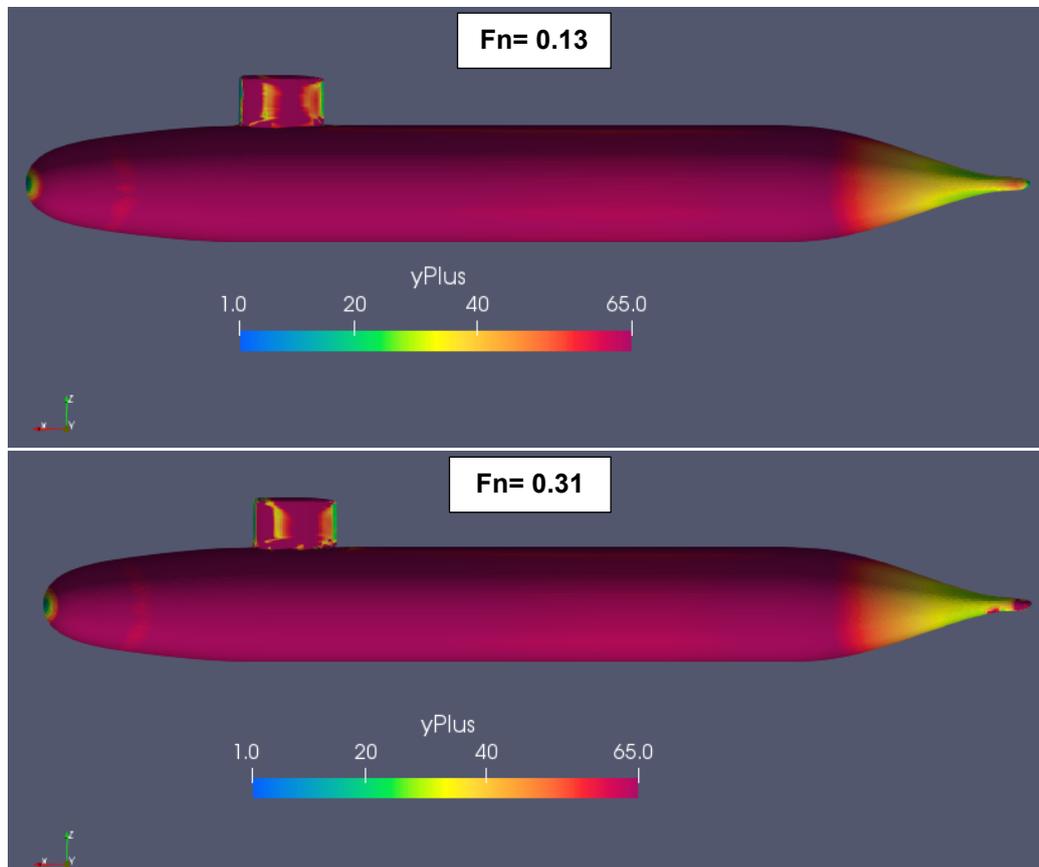


Figura 3.16 Distribución del parámetro y^+ usando funciones cercanas de pared

Se puede notar en la Figura 3.16, que el Froude más bajo presenta la distribución de y^+ más baja, cercana a 1 en zonas como la nariz de proa y la reducción en popa. En el cuerpo paralelo medio hay una distribución de alrededor de 20. Por otro lado, conforme aumenta el número de Froude, la magnitud del parámetro y^+ crece, hasta llegar a un máximo de 40 en el cuerpo paralelo medio y magnitudes superiores a 60 en el cuerpo de la vela y popa que son zonas que presentaron bajo número de capas superficiales.



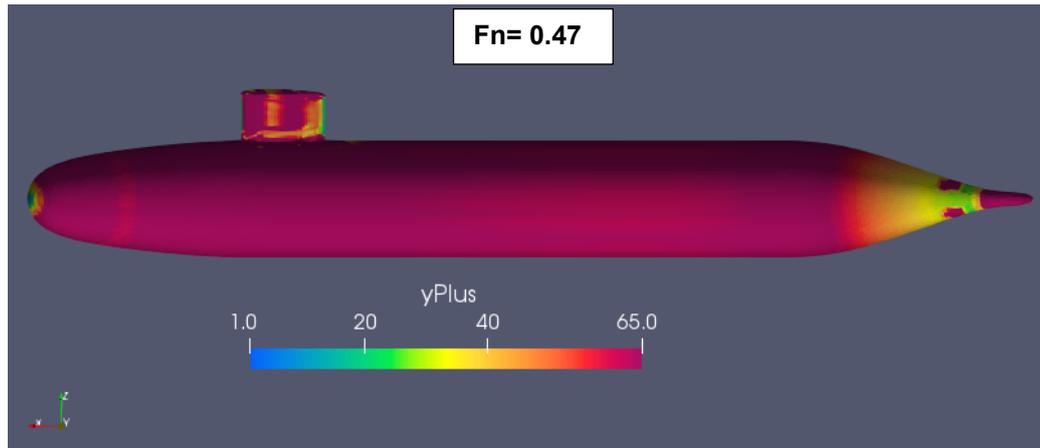


Figura 3.17 Distribución del parámetro y^+ usando funciones de pared

La Figura 3.17 muestra la distribución del y^+ en las condiciones de navegación en las que se implementaron funciones de pared. A diferencia de las que usaron funciones cercanas de pared, éstas alcanzaron una magnitud mayor en la distribución de y^+ en la geometría del modelo. Zonas de la nariz de proa y popa tanto en el cuerpo como en la vela, presentan la menor variación del parámetro debido al menor número de capas superficiales en dichas zonas.

3.6.2 Distribución del coeficiente de presión

Usando la herramienta de “calculator” en ParaView se logró obtener la distribución del coeficiente de presión alrededor de la geometría del submarino. Para ello se usó la siguiente expresión:

$$C_p = \frac{p_{rgh}}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (41)$$

Donde:

p_{rgh} : Presión dinámica calculada por OpenFOAM.

ρ : Densidad del fluido

U : Magnitud de la velocidad

Es así como se obtuvo que:

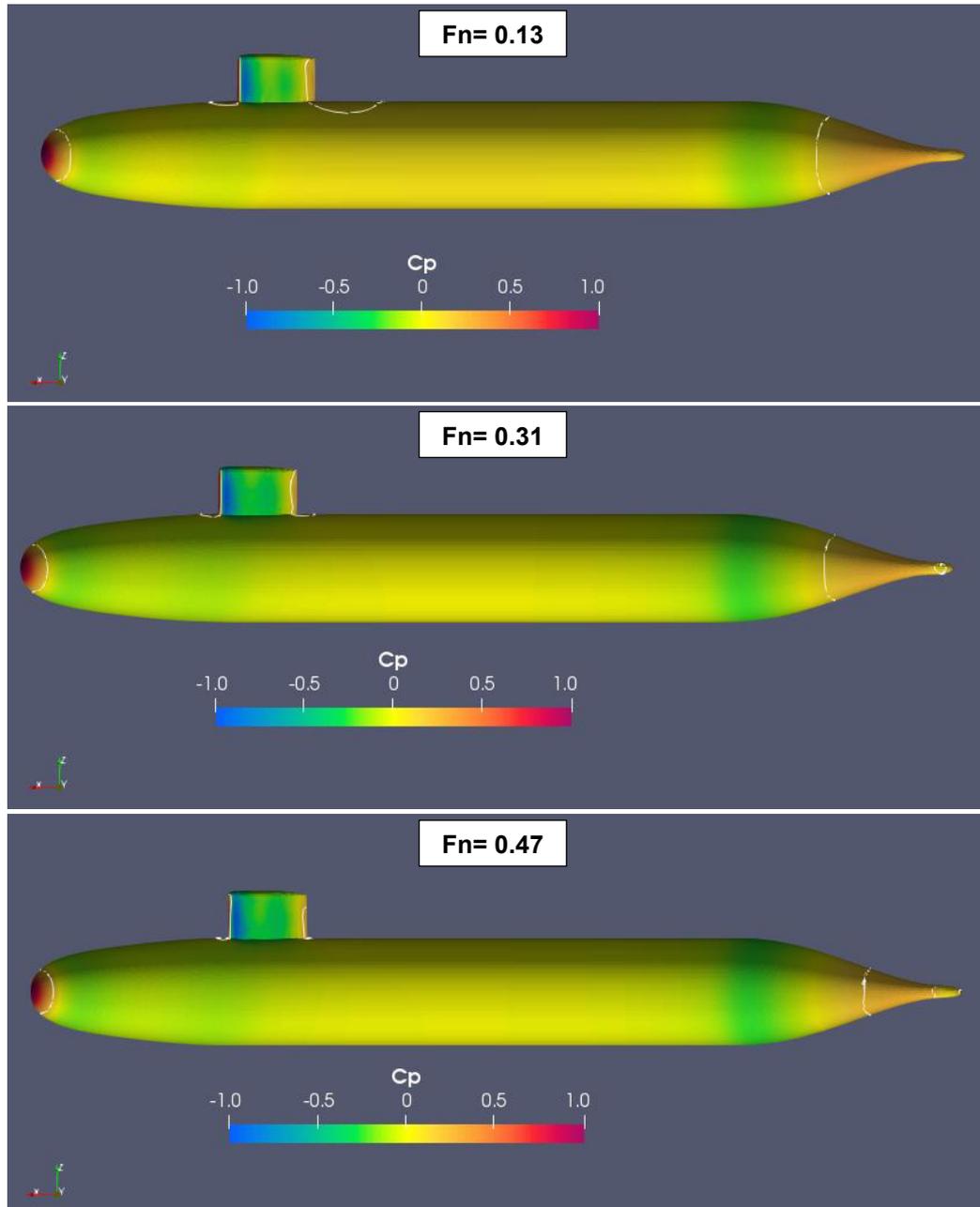


Figura 3.18 Distribución de presión dinámica para los números de Froude considerados usando funciones cercanas de pared.

En la Figura 3.18 podemos observar la distribución del coeficiente de presión para las 3 condiciones de análisis. Se evidenció que en las zonas de estancamiento del flujo tales como la nariz de proa del casco y la vela, se generen puntos de presión máximos. Para el menor Froude, 0.13, se observa que existe una distribución uniforme a lo largo del cuerpo paralelo medio sin variaciones considerables. Para las 3 condiciones se puede observar que existe un aumento de presión a popa (aproximadamente $0.25C_p$) tanto en el casco como la vela, generándose

gradientes adversos de presión que podrían provocar el desprendimiento de la capa límite. En la región de proa, que es de especial interés de este estudio numérico, por la ubicación de los sensores de velocidad electromagnéticos, podemos notar que a pesar de que se ha probado para números de Reynolds de orden 1E06 y 1E07, éste, no afecta significativamente la distribución del coeficiente de presión en la superficie de la nariz del submarino.

3.6.3 Distribución del coeficiente friccional

A menudo, para expresar el esfuerzo cortante en la pared es conveniente usar el *coeficiente de fricción local* adimensional, C_f . Este coeficiente mide el esfuerzo cortante que se generan en las paredes sólidas del modelo. La distribución del coeficiente friccional fue obtenida mediante la herramienta “calculator” usando ParaView con a siguiente expresión:

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (42)$$

Donde:

τ_w : Propiedad que mide el esfuerzo cortante en la pared en ParaView

El esfuerzo cortante en la pared puede ser calculado como:

$$\tau_w = \mu \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (43)$$

Donde:

y : Coordenada normal a la pared

Se obtuvo la distribución del coeficiente de fricción local adimensional

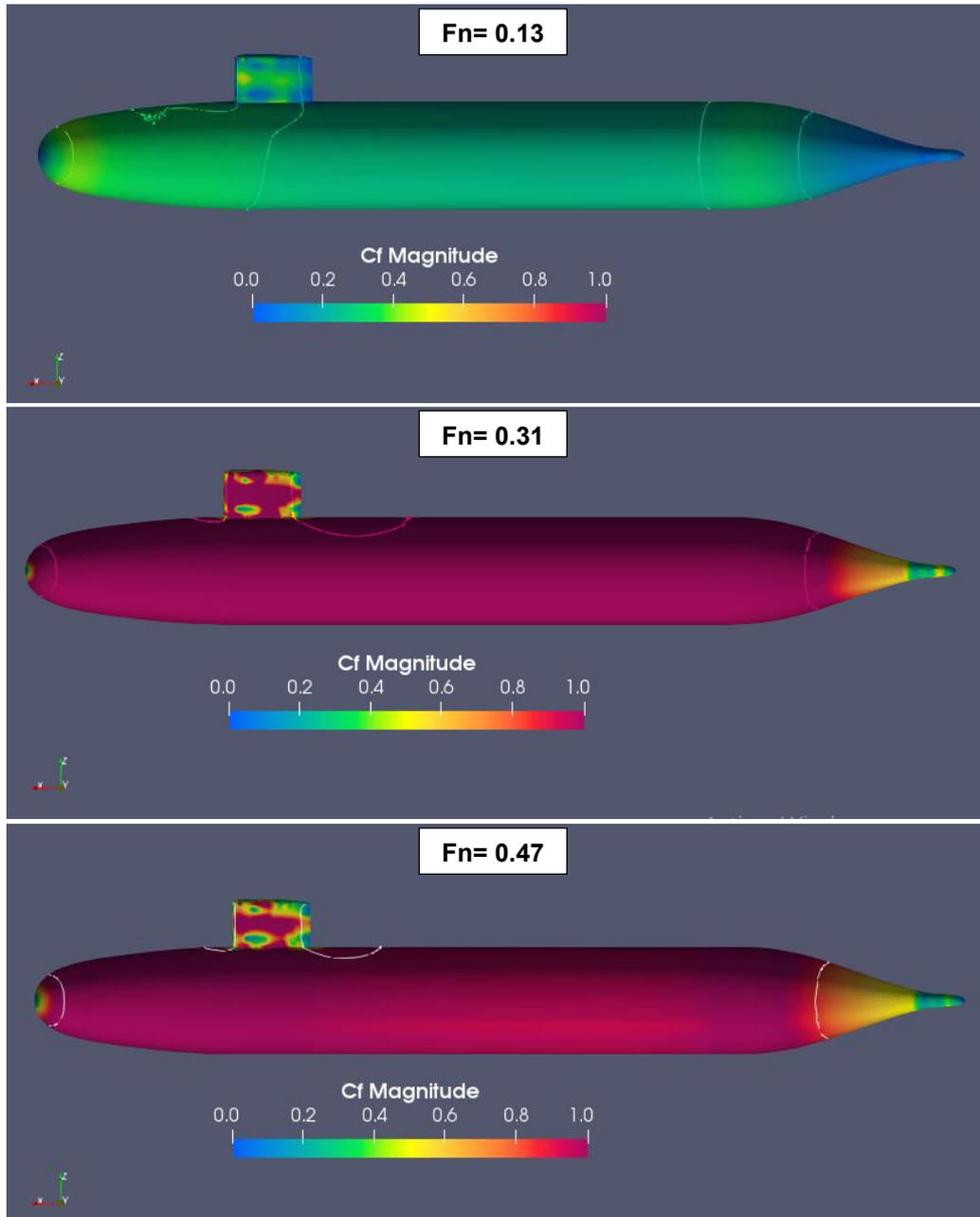


Figura 3.19 Distribución del coeficiente friccional para los tres números de Froude considerados usando funciones cercanas de pared.

En la Figura 3.19 se presenta la distribución del coeficiente friccional en la pared de la geometría debido a efectos viscosos, para las 3 condiciones de análisis. La magnitud del esfuerzo cortante es proporcional al gradiente de velocidad en la pared. En las regiones de estancamiento del fluido tales como nariz de proa del casco y la vela, se obtuvo valores de esfuerzos nulos. Se evidencia además que en la región del borde de salida de popa se generan zonas de bajos esfuerzos a causa de la presencia de gradientes adversos de presión producidos en el borde

de salida del modelo que provocan zonas de baja velocidad. En el caso con el número de Froude más bajo, 0.13, se distingue que en el cuerpo paralelo medio la distribución es uniforme, a diferencia de los casos con los números de Froude más altos que se generan zonas de variación por la desaceleración del fluido a popa.

3.7 Comparación Funciones de pared vs Funciones cercanas de pared

Se realizó la comparación de los resultados numéricos y mallado obtenidos usando funciones de pared del trabajo de materia integradora previa [29], con los obtenidos en este trabajo usando funciones cercanas de pared. Se escogió el número de Froude 0.47 para realizar dicha comparación utilizando el mallado más fino.

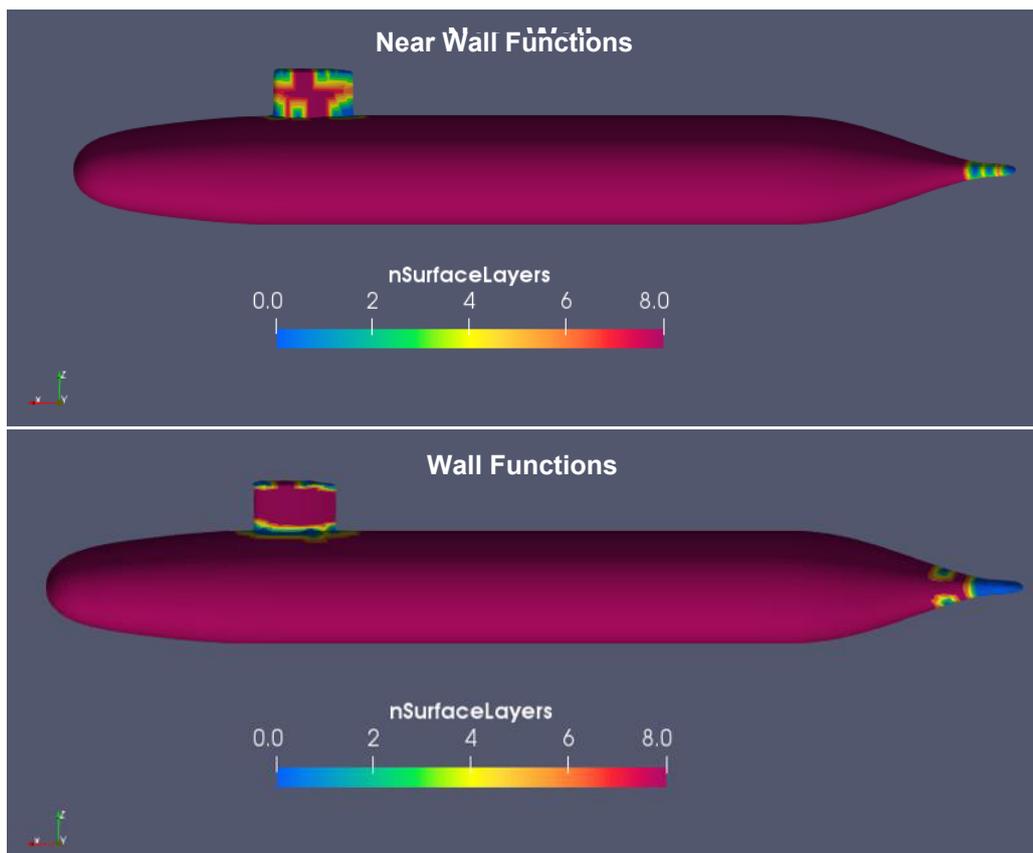


Figura 3.20 Comparación número de capas superficiales

Como se puede observar en la Figura 3.20, se aplicó igual número de capas superficiales alrededor de la geometría del modelo. La vela sigue siendo una región crítica que presenta una reducción en el número de capas al igual que la

nariz de popa del submarino. El uso de funciones de pared logra una mayor estructuración de capas en la región de la vela que el uso de funciones cercanas, que podría estar relacionado con el radio de expansión usado en el SnappyHexMesh.

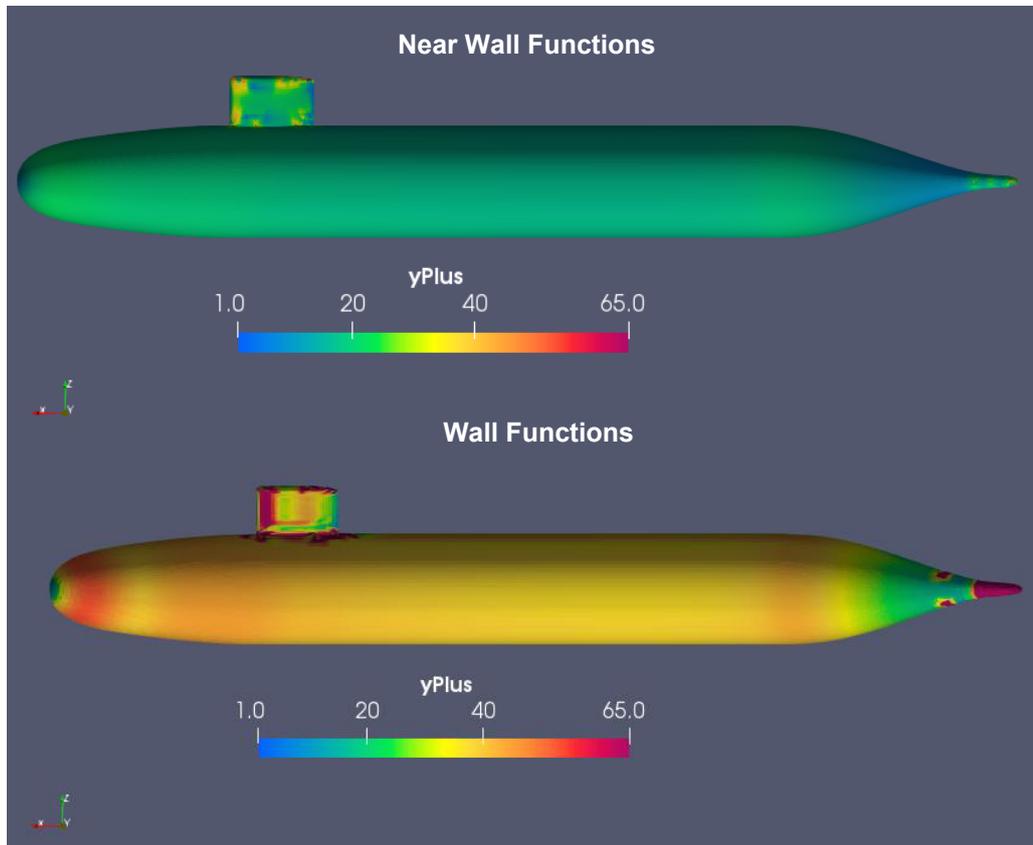


Figura 3.21 Comparación parámetro y^+

Uno de los parámetros más importantes que nos llevan a la decisión de escoger funciones de pared o funciones cercanas, es el y^+ . Como se describió en la sección anterior, es una medida para determinar la calidad de la malla que influye en la precisión de los resultados. Se mostró numéricamente, como se puede observar en la Figura 3.21, que el uso de funciones cercanas de pared logró una distribución de y^+ menor que el uso de funciones de pared en el cuerpo medio del submarino. Sectores como la vela y popa, para ambos métodos presentaron zonas de alta concentración de magnitudes del parámetro y^+ .

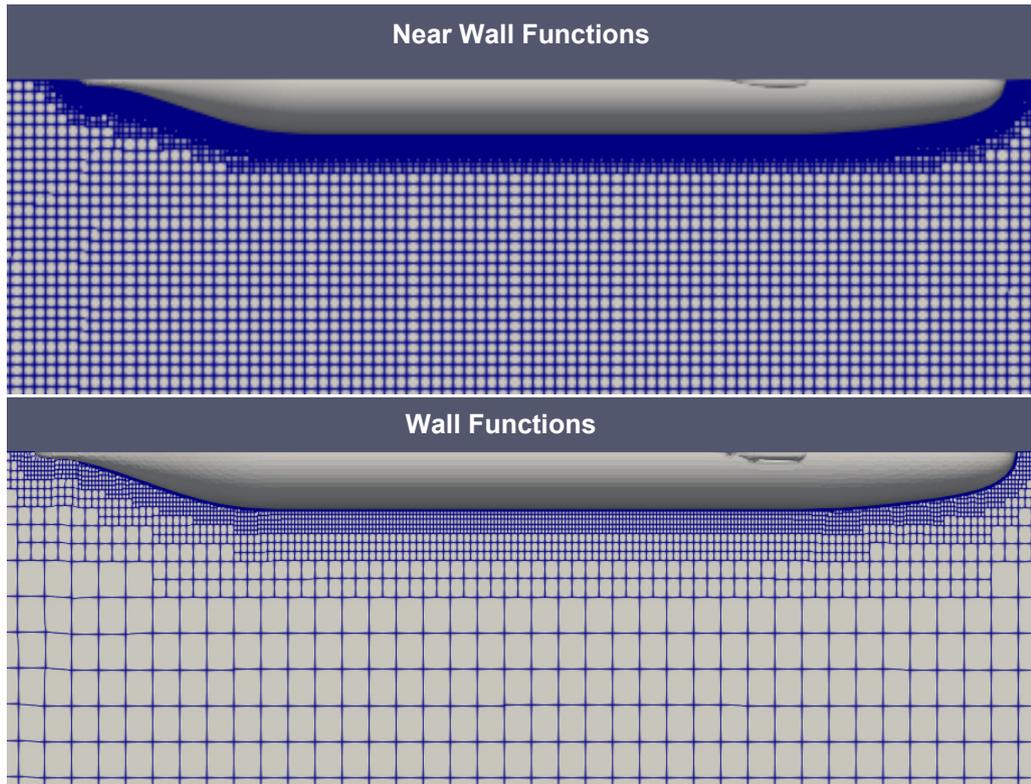


Figura 3.22 Comparación de mallado alrededor del casco

Existe una diferencia notable entre la malla alrededor del casco entre un método y el otro. Podemos observar, en la Figura 3.22, que con funciones cercanas de pared hay un mallado “agresivo” en las cercanías de las paredes del modelo, luego el tamaño de celda aumenta ligeramente de tamaño en las regiones apartadas de las paredes. Por otro lado, podemos observar que con el uso de funciones de pared se obtuvo un mallado con gradiente. Siendo fino alrededor del casco y aumentando al cuádruple a medida que se aleja de las paredes sólidas.

El gasto computacional está del lado del mallado usado con funciones cercanas de pared, debido al pequeño tamaño de los elementos y la escasa transición de tamaños de malla, resultando una radio de expansión de 1.014 para la malla de funciones cercanas y 1.5 para la utilizada con funciones de pared. Una vista más cercana de la malla para poder apreciar la transición se muestra en la Figura 3.23.

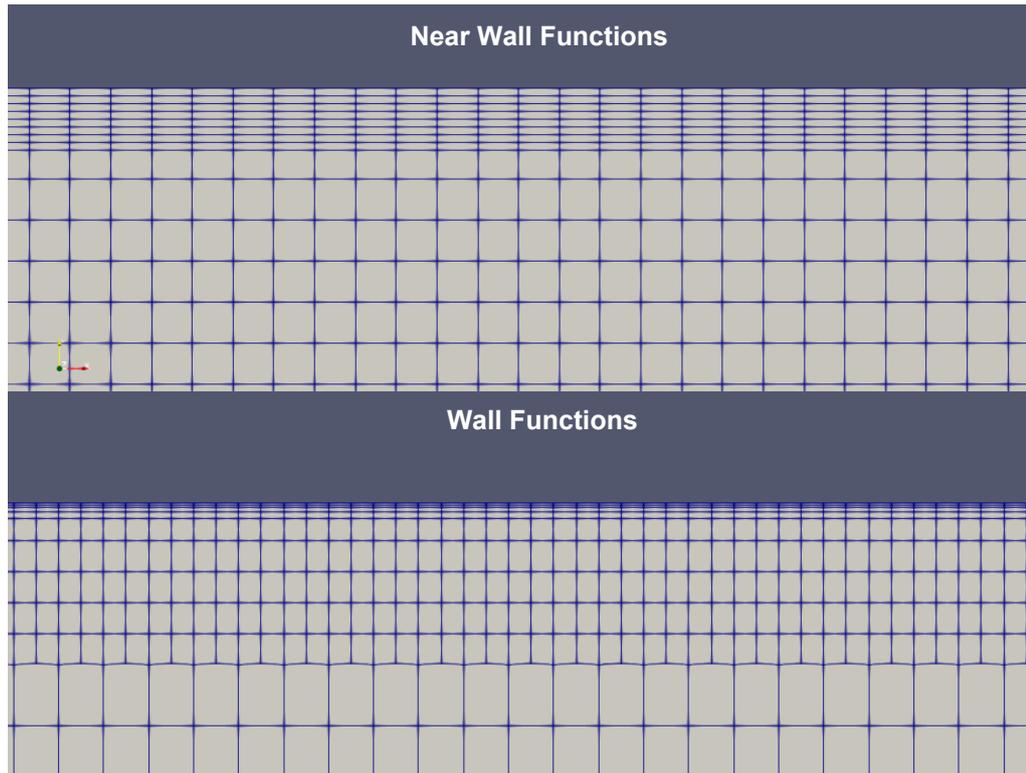


Figura 3.23 Mallado cercano a la pared sólida

En resumen, la región cercana al casco del mallado usando con funciones de pared y cercanas se generan 8 capas, que en el primer caso que aumentan de tamaño con gradiente mientras que para el segundo caso sus proporciones se mantienen por el bajo radio de expansión implementado.

3.8 Perfil de velocidades dentro de la capa límite

Es de interés analizar el comportamiento de la capa límite en la proa del submarino, que es la región donde los sensores de velocidad electromagnéticos son colocados por ser una región libre de variaciones de presión, velocidad, vorticidades y turbulencia. Para ello utilizamos los resultados experimentales tomados de los ensayos en túneles de viento del modelo DARPA SUBOFF a casco desnudo como se muestra en la Figura 3.24. Las pruebas experimentales fueron desarrolladas para números de Reynolds $1E06$. En nuestro caso comparamos los resultados experimentales usando la condición de Froude 0.13 con número de Reynolds $3.4E06$ para las pruebas numéricas.

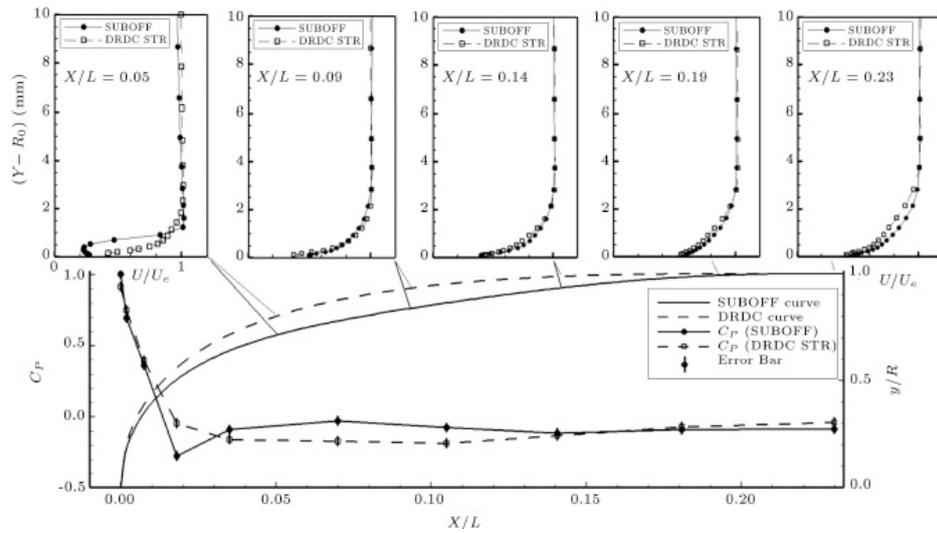


Figura 3.24 Resultados experimentales del perfil de capa límite a distintas posiciones a proa del modelo DARPA SUBOFF

Fuente: Tomado de Boundary layer and Surface pressure distribution behavior over a submarine nose model with two different nose shapes, A. Saeidinezhad, 2019 [26]

Donde,

R_0 : Radio local del modelo

Y: Distancia vertical

U: Velocidad

U_e : Velocidad de corriente

Se analizaron las posiciones al 14% y 19% de la eslora medido desde proa, como se muestra en la Figura 3.25. Se obtuvo el perfil de velocidades usando la herramienta "Plot over line" en ParaView que nos permite graficar la curva de cualquier parámetro de interés sobre la longitud de una línea. En este caso, se escogió la magnitud de la velocidad.

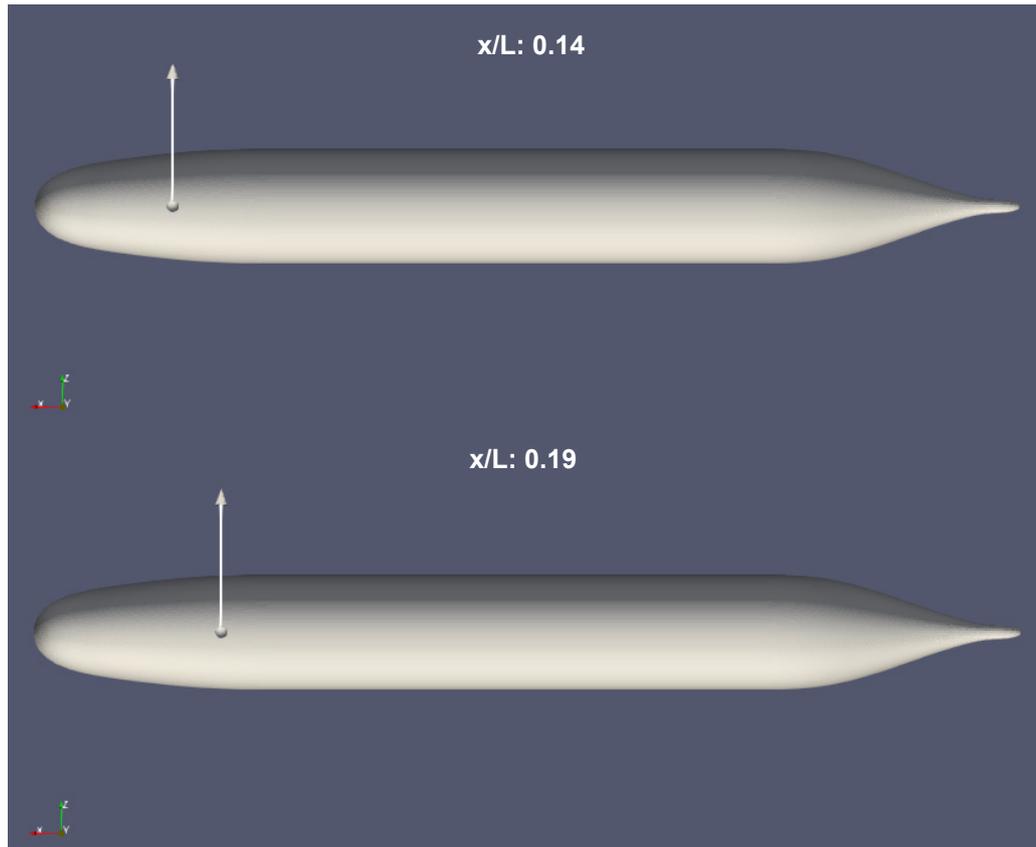


Figura 3.25 Posiciones de análisis numérico de capa límite

Las coordenadas de los puntos que definen las líneas perpendiculares al casco se detallan en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16 Coordenadas de puntos que definen las posiciones de análisis del perfil de velocidad de capa límite

		x [m]	y [m]	z [m]
x/L: 0.14	Punto inicial	3.746	0	0.254
	Punto final	3.746	0	0.800
x/L: 0.19	Punto inicial	3.528	0	0.254
	Punto final	3.528	0	0.800

En la Figura 3.25 se muestra las posiciones de líneas perpendiculares al casco sobre las cuales se graficaron los perfiles de velocidad sobre la pared sólida. Es así como se obtuvo que:

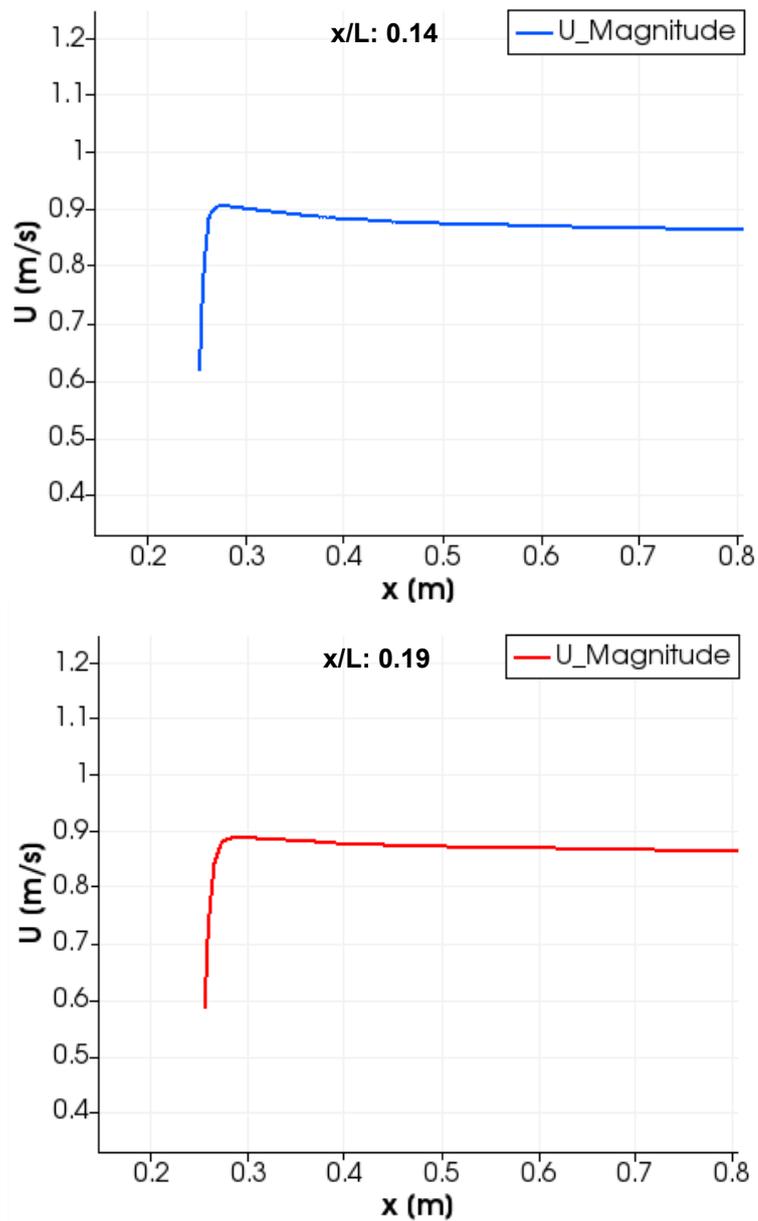


Figura 3.26 Perfil de velocidades numérico para x/L: 0.14 y 0.19

Se observa en la Figura 3.26 que, para el tramo de línea dentro del cuerpo de la geometría (desde $x=0$ hasta $x=0.256$ m), la velocidad es nula, como se esperaba. La velocidad crece hasta llegar a la velocidad de corriente (U_e : 0.854 m/s) y se mantiene constante en el campo lejano de la superficie sólida. Estos resultados numéricos se procesaron, se adimensionalizaron y compararon con los experimentales.

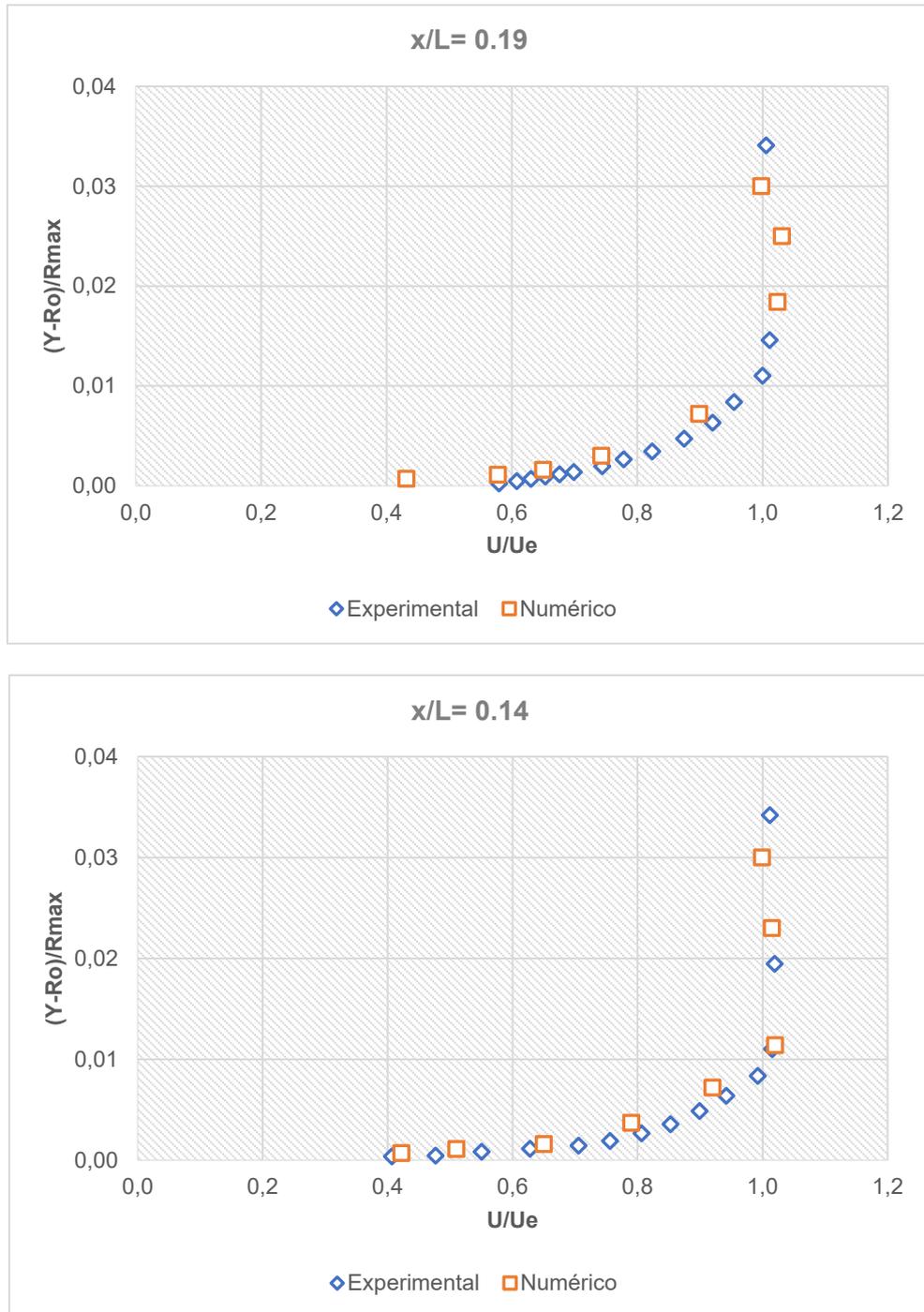


Figura 3.27 Perfil de velocidad numérico de capa límite para x/L: 0.14 y 0.19

En la Figura 3.27 se presentan los perfiles de velocidad de capa límite para las dos posiciones de análisis. Los resultados se adimensionalizaron para una mejor lectura, donde Y es la distancia vertical medida desde línea de crujía del modelo, R_o es el radio local del modelo en la posición de análisis, R_{max} es el radio máximo del modelo, U es la velocidad medida y U_e es la velocidad de corriente. En la Tabla 3.17 se muestran los valores de las variables adimensionalizadas.

Tabla 3.17 Variables adimensionalizadas

$R_{o\ x/L:0.14}$ [m]	0.240
$R_{o\ x/L:0.19}$ [m]	0.250
R_{max} [m]	0.254
U_e [m/s]	0.854

En las cercanías de la pared sólida la velocidad de fluido es menor que la velocidad de corriente. Esto se debe a los efectos viscosos de la capa límite que retardan el flujo en las inmediaciones de la pared sólida. El espesor de la capa límite (numérico) fue calculado tomando el primer punto donde la velocidad del flujo es igual a la velocidad de corriente, por definición de capa límite. Para ambas posiciones se obtuvo en análisis numérico que el espesor de la capa límite para la posición $x/L: 0.14$ corresponde al 1% del radio máximo del modelo mientras que la para la posición $x/L:0.19$ al 2%.

Los resultados numéricos obtenidos denotan una similitud en la tendencia de los experimentales. Los resultados numéricos se acercarán más a los experimentales cuando y^+ del modelo numérico sea lo más cercano a 1, y los gradientes de velocidad dentro de la subcapa viscosa que es la región de interés serán plenamente captados por la malla. Esto se logra variando el espesor de la última capa y el factor de expansión de la malla, como se indica en la Figura 3.3 en el Script SnappyHexMeshDict en OpenFOAM. Finalmente, en Tabla 3.18, se muestra la comparación entre la estimación numérica del espesor de la capa límite y la estimación teórica usando la solución de Blasius, usando la Tabla 2.3.

Tabla 3.18 Comparación estimación del espesor capa límite numérico y teórico

	Sol. Blasius δ [mm]	Numérico δ [mm]	%Error
$x/L: 0.14$	4.41	2.54	42.42%
$x/L: 0.19$	5.14	5.08	1.15%

Podemos observar en la Tabla 3.18 que el error porcentual para la posición $x/L:0.14$ es muy alta en comparación con la segunda posición $x/L:0.19$, esto se debe a que debemos tener presente que la solución de Blasius con la cual se realizó la estimación teórica es una formulación que considera una placa plana infinitamente larga por la cual circula un fluido viscoso incompresible. Por las formas del submarino en el borde de entrada, las formas son curvas, es de

esperarse que el espesor de la capa límite difiera en gran magnitud del estimado considerando una placa plana, pero a medida que la longitud en “x” aumenta el espesor numérico y teórico se acercan.

3.9 Análisis de presupuesto

Se presentan los costos asociados para la realización del proyecto actual, incluyendo los programas que fueron utilizados, el tiempo de uso del material informático, tiempos de consultas a personal técnico y universitario. El análisis de costos se realizó planteando un escenario de consultoría donde los costos de los softwares y equipos utilizados corresponden a los valores publicados en sus sitios web oficiales de venta. No se considera la posibilidad de contar con los softwares previamente instalados. Además, se consideran costos reales de los honorarios del personal técnico involucrado en el proyecto.

3.9.1 Desglose de costos unitarios

Los activos físicos sufren una depreciación con el paso del tiempo. El costo de amortización se calcula como:

$$a = \frac{V_C - V_R}{n_a} \quad (44)$$

$$t_h = \frac{a}{h} \quad (45)$$

Donde:

a : Amortización, \$/año

V_C : Valor de compra, \$

V_R : Valor residual al término del período de amortización, \$

n_a : Período de amortización, años

t_h : Tasa horaria, \$/hora

h : Tiempo de trabajo al año, horas

Para realizar el cálculo de la tasa horaria t_h , se tomaron en cuenta 30 horas semanales de trabajo, sin incluir semanas festivas de cada año. Se consideraron 46 semanas nos festivas, y se calcula que:

$$t = 46 \frac{\text{semana}}{\text{año}} \times 30 \frac{\text{horas}}{\text{semana}} = 1380 \frac{\text{horas}}{\text{año}}$$

Equipo Informático

- Computadora personal

El computador personal para la realización de este trabajo tiene las siguientes características:

- Modelo: PC Notebook DELL Inspiron 3467 Serie 3000
- Procesador: Intel(R) Core (TM) i7-4510U CPU @2.00GHz 2.60 GHz
- HDD: 1000 GB
- RAM: 8 GB
- Arquitectura: 64 bits

El precio de compra V_C se establece en \$1200, con un periodo de amortización a 5 años y valor residual V_R del 20%

$$a = \frac{V_C - V_R}{n_a} = \frac{1200 - 240}{5} = 192 \frac{\$}{\text{año}}$$

$$t_h = \frac{a}{h} = \frac{192}{1380} = 0.139 \frac{\$}{\text{hora}}$$

- Estación de cálculo HPC

Para las simulaciones grandes, se utilizó un hardware externo con mayor capacidad computacional que la del ordenador personal. Dicho hardware es provisto por el Laboratorio Nacional de Cálculo Científico HPC MODEMAT. Sus características son:

- Procesador: de servicio
- 8 puertos de canal de fibra de 8 Gbps

- Opción de añadir hasta 16 puertos FC o hasta 8 puertos iSCSI de 10 GbE u 8 puertos FC y 4 puertos iSCSI de 10 GbE
- Fuentes de alimentación y ventiladores redundantes
- RAID 1, RAID 5 y RAID 6 para protección de datos.
- 64 GB de memoria cache

El precio de adquisición de este equipo se estima un valor referencial de \$10000. Se considera que se encuentra en estado operativo todo el año. El valor residual se considera un 20% con un periodo de amortización de 8 años.

$$a = \frac{V_C - V_R}{n_a} = \frac{10000 - 2000}{8} = 1000 \frac{\$}{\text{año}}$$

$$t_h = \frac{a}{h} = \frac{1000}{8760} = 0.134 \frac{\$}{\text{hora}}$$

Software

- OpenFOAM®

Todas las versiones de OpenFOAM son programas de código abierto (OpenSource), es decir, su licencia es gratis.

- Paraview 5.6.0

Es un software de licencia gratuita.

- Paquete Microsoft® Office

El costo anual del paquete de Office es \$59.99

$$t_h = \frac{a}{h} = \frac{59.99}{1380} = 0.0043 \frac{\$}{\text{hora}}$$

- Rhinoceros®

El costo de compra del software es de \$995.0

- GnuPlot®

Es un software de licencia gratuita.

Lugar de trabajo

Se va a contemplar el costo de servicios de energía eléctrica por uso de equipo informático e internet para el desarrollo del proyecto. Para energía eléctrica se considerará una tarifa “dignidad” de \$0.04 por KWh (precio subsidiado por el Estado ecuatoriano) mientras que el costo mensual del servicio de internet es de \$55. La duración del proyecto se estima para 15 semanas por lo que el costo equivalente del servicio de internet es de \$220. Se considera el costo por alquiler de una oficina de trabajo de \$30 semanales.

Material de oficina

Se considerará para el material de oficina empleado, un cuaderno de apuntes con un valor de \$1.50, un bolígrafo de \$0.40 y dos marcadores de pizarra a \$1.60.

Personal

- Estudiante universitario

El estudiante universitario que ejecuta este proyecto lo ha realizado por 15 semanas, con un total de 480 horas.

$$t_h = 6.00 \frac{\$}{hora}$$

- Profesor, Doctor-Ingeniero Naval

Desarrolla funciones de tutor para seguimiento del proyecto.

$$t_h = 50.00 \frac{\$}{hora}$$

3.9.2 Presupuesto Total

En la Tabla 3.19 se detallan los rubros considerados para la estimación del presupuesto total de este estudio.

Tabla 3.19 Presupuesto total del proyecto

Concepto	Periodo (h)	Tasa horaria (\$/h)	Subtotal bruto (\$)	IVA (12%)	Total (\$)
EQUIPOS Y SOFTWARE					
Computadora personal	450	0.14	62.55	7.51	70.06
Estación de cálculo HPC	100	0.13	13.40	1.61	15.01
OpenFOAM V7	225	0.00	0.00	0.00	0.00
Paraview 5.6.0	225	0.00	0.00	0.00	0.00
Paquete Microsoft Office	190	0.004	0.82	0.10	0.92
Rhinoceros			995.00	119.40	1,114.40
GnuPlot	20	0.00	0.00	0.00	0.00
Subtotales			1,071.77	128.61	1200.38
PERSONAL					
Estudiante Universitario	450	6.00	2,700.00	324.00	3,024.00
Profesor director	30	50.00	1,500.00	180.00	1,680.00
Subtotales			4,200.00	504.00	4,704.00
OFICINA					
Material oficina			3.50	0.42	3.92
Servicio energía eléctrica	450	0.04	18.00	2.16	20.16
Servicio de internet fijo			220.00	26.40	246.40
Alquiler oficina	450	0.00	450.00	54.00	504.00
Subtotales			691.50	82.98	774.48
			TOTAL BRUTO		\$5,963.27
			IVA (12%)		\$ 715.59
			TOTAL		\$6,678.86

El presupuesto total del proyecto asciende a:

SEIS MIL SEISCIENTOS SETENTA Y OCHO DÓLARES CON OCHENTA Y SEIS CENTAVOS

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Las simulaciones numéricas que usan funciones cercanas de pared fueron realizadas con éxito y se pudo obtener el perfil de velocidad de la capa límite en la nariz de proa evaluadas al 14 y 19% de la proa.
- Se escogió el modelo de Low-Reynolds number para capturar la evolución de los gradientes de presión y velocidad dentro de la capa límite alrededor del cuerpo del submarino para tres condiciones de navegación con números de Froude de 0.13, 0.31 y 0.47 a una profundidad de $H/D=5.4$.
- La incertidumbre numérica de la predicción de la resistencia del modelo fue evaluada siguiendo las recomendaciones de la ITTC mediante el proceso de verificación y validación, es así como se validó el proceso de simulación numérica para una malla de 1'455,715 millones de elementos utilizada para la implementación de funciones de pared y cercanas de pared, a un Froude de 0.47 obteniendo una incertidumbre de validación de 5.23% y 4.35% respectivamente.
- Se logró realizar la comparación de los resultados y mallado implementado de las simulaciones numéricas utilizando funciones de pared y cercanas de pared, estableciendo gran similitud en la distribución de las ocho capas superficiales, pero obteniendo una notable diferencia en la distribución del parámetro y^+ en el casco y vela del modelo.
- Se mostró que el uso de funciones cercanas de pared logra una disminución significativa de la distribución del parámetro y^+ en la geometría del modelo frente al uso de funciones de pared. El modelo Low-Reynolds number logró para el número de Froude más bajo 0.13 una aproximación a y^+ promedio de 20.
- Mediante el uso del Cluster HPC MODEMAT de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), se logró la ejecución con éxito de una serie de simulaciones numéricas y que ayudó a la reducción significativa del tiempo computacional. Los resultados numéricos fueron visualizados y procesados

- con el uso de ParaView ya que OpenFOAM carece de interfaz gráfica. Los resultados numéricos mostraron que el número de Reynolds no genera un efecto significativo sobre la distribución del coeficiente de presión de la superficie de la nariz del modelo del submarino, siendo así una posición idónea para la colocación de sensores de velocidad sin que los gradientes de velocidad causen perturbaciones excesivas.
- La comparación numérica del perfil de capa límite con los resultados experimentales en túneles de viento del modelo DARPA SUBOFF, arrojaron que numéricamente se obtuvo un espesor del 1% del radio máximo del submarino para la posición $x/L:0.14$ y del 2% para $x/L:0.19$.
- Mediante un análisis de presupuesto de los costos que involucrarían la realización profesional de este estudio numérico se estimó un costo incluido impuestos de \$6,678.86

4.2 Recomendaciones

En trabajos futuros se recomienda que:

- Cuantificar la diferencia entre la velocidad medida por los sensores de velocidad electromagnéticos y la real mediante un análisis numérico en las posiciones analizadas al 14 y 19% de la eslora considerando los principios físicos que rigen su funcionamiento y estableciendo la relación física entre el caudal de agua que pasa por los sensores y el voltaje medido.
- Realizar un redimensionamiento de la malla y mejoramiento del radio de expansión pensando que la malla debe ser capaz de capturar los gradientes de presión y velocidad para números de Froude mayores a los analizados considerando efectos de superficie libre y diferentes estados de mar.
- Comparar los resultados numéricos obtenidos en este trabajo haciendo uso de funciones cercanas de pared con modelos Low-Reynolds number y High Reynolds-number, con la intención de determinar y comparar la convergencia de los resultados, tiempos de simulación, mallado y distribución del y^+ .
- Realizar simulaciones numéricas usando funciones cercanas de pared para todas las configuraciones disponibles del modelo DARPA SUBOFF y considerando efectos de superficie libre.

- Aplicar modelos LES y DES en el estudio de la caracterización numérica del fluido alrededor del submarino y comparar resultados con los obtenidos usando método RANS.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AGI, *AGILOG Overall System Manual For The Equadorian Navy (Type 209 submarine refit)*, Dorse, Poole, 2005.
- [2] F. M. White, *Fluid Mechanics*, New York: Connect Learn Succeed, 2008.
- [3] SAAB, «SAAB,» Enero 2020. [En línea]. Available: <https://www.saab.com/products/naval/submarines>.
- [4] M. Bettle, «Unsteady Computational Fluid Dynamics Simulations of Six Degrees-of-Freedom Submarine Manoeuvres,» New Brunswick, 2013, pp. 5-6.
- [5] J. A. Herdon, *Electromagnetic Speed Sensor*, Delaware: United States Patent Office, 1967.
- [6] M. Guerra, *Física. Elementos fundamentales. Mecánica y termodinámica clásicas*, 1984.
- [7] R. T. Eslava, *Medición de capa límite y turbulencia en el túnel de viento para calibración de instrumentos de medición de velocidad.*, Mexico D.F., 2003.
- [8] M. F. Osma, «aerodinamicaf1,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.aerodinamicaf1.com/>. [Último acceso: 16 diciembre 2020].
- [9] D. M. a. D. Pantelatos, *Experimental flow study over a blunt-nosed axisymmetric body at incidence*, *Journal of Fluids and Structures*, 2004.
- [10] A. N. a. V. Patel, *Measurements in the thick axisymmetric turbulent layer near the tail of a body of revolution*, 1974.
- [11] H. L. a. T. Huang, *Measurements of flows over an axisymmetric body with various appendages in a wind tunnel*, Seoul, Korea: *Symposium on Naval Hydrodynamics*, 1994.
- [12] I. H. Alayeto, *Aplicación de Código OpenFOAM al control activo de capa límite*, 2016.
- [13] C. Greenshields, *OpenFOAM User Guide*, 2019.
- [14] I. A. Modon, *Teoría de mecánica de los fluidos*, Cuyo, 2017.
- [15] P. d. I. T. Muñoz, *Large Eddy Simulation de flujo confinado entre paredes (Doctoral dissertation)*, 2019.

- [16] Y.-H. L. X.-C. Lin, The investigation of a Sliding Mesh Model for Hydrodynamic Analysis of a SUBOFF Model in Turbulent Flow Fields, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020.
- [17] G. Alfonsi, «On Direct Numerical Simulation of Turbulent Flows,» Calabria, 2011.
- [18] P. SAGAUT, *arge eddy simulation for incompressible flows: an introduction.*, 2006.
- [19] M. S. Chris Baker, «Train Aerodynamics,» 2019.
- [20] A. Straatman y R. Martinuzzi, *Engineering Turbulence Modelling and Experiments 5*, Mallorca: W. RODI nad N. FUEYO, 2002.
- [21] H. T. C. S. Groves NC, *Geometric Characteristics of DARPA Suboff models*, 1989.
- [22] I. T. T. Conference, «Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures,» de *ITTC - Recommended Procedures and Guidelines*, 2017.
- [23] U. P. d. Catalunya, *Estudio Aerodinámico del flujo alrededor de un ahmed body mediante OpenFOAM*, Catalunya, 2016.
- [24] F. LIU, «A through description of how wall functions are implemented in OpenFOAM,» Chalmers, 2017.
- [25] L. D. J. Backar, «Evaluation of numerical wall functions on the axisymmetric impinging,» Elsevier Inc, Gothenburg, 2017.
- [26] A. Saeidinezhad, A. Dehghan y M. Dehghan, *Boundary layer and surface pressure distribution behavior over a submarine nose model with two different nose shapes*, Teherán: Scientia Iranica B, 2019.
- [27] H.-L. Liu y T. Huang, *Summary of DARPA Suboff Experimental Program Data*, West Bethesda, 1998.
- [28] A. F. T. Guide, «Abo,» 29 01 2017. [En línea]. Available: <http://users.abo.fi/rzevenho/ansys%20fluent%2018%20tutorial%20guide.pdf>. [Último acceso: 2020].
- [29] M. T. Q. Rodriguez, «Caracterización numérica de la influencia de la superficie libre en el flujo alrededor del submarino DARPA SUBOFF-5470 usando OpenFOAM,» Guayaquil, 2020.
- [30] D. Paster, *Importance of hydrodynamic considerations for underwater vehicle design*, Washington D.C.: 86th OCEANS, 1986.

- [31] B. Munson, «Características de la capa límite,» de *Fundamentos de mecánica de fluidos*, Mexico, LIMUSA S.A, 2000, pp. 552-553.
- [32] «Calidad de Malla y Condiciones de Contorno periódicas,» [En línea]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3848/fichero/Volumen+%C3%9Anico%252F07.ANEXO+I.pdf>.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Tutorial para instalar OpenFOAM

Los pasos para instalar OpenFOAM v7 usando máquina virtual con Ubuntu, se detallan a continuación:

1. Se debe realizar la instalación el software “Oracle VM VirtualBox” que es una máquina virtual que nos permite la instalación de cualquier sistema operativo. Es la opción más recomendable si se desea instalar el sistema operativo Ubuntu si se tiene como sistema operativo Windows. Cualquier error o falla en el nuevo sistema basta con desinstalar la app sin tener que comprometer la BIOS de nuestro ordenador.

<https://www.oracle.com/virtualization/technologies/vm/downloads/virtualbox-downloads.html>

2. Escogemos la versión de 32 o 64 bits dependiendo del ordenador que se disponga y descargamos.
3. Descargamos el sistema operativo Ubuntu desde el siguiente link de descarga. Es recomendable escoger la versión más reciente del programa que hasta la fecha es la versión 20.04 LTS Ubuntu Desktop.

<https://ubuntu.com/#download>

Al final de la descarga se debe tener los instaladores especificados en la Figura 5.1.

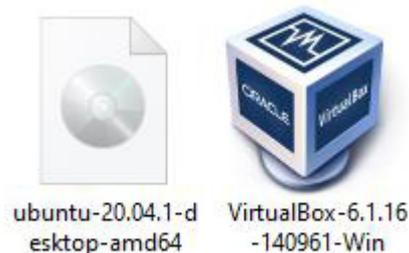


Figura 5.1 Instaladores requeridos

4. Ejecutamos “Oracle VM VirtualBox” en modo “Ejecutar como administrador” desde la carpeta de descargas y damos Aceptar a todas las opciones por default.
5. Una vez finalizada la instalación de la máquina virtual, se ejecuta el programa escogemos la opción “New” en la parte superior izquierda de la ventana Home y aparecerá la ventana especificada en la Figura 5.2.

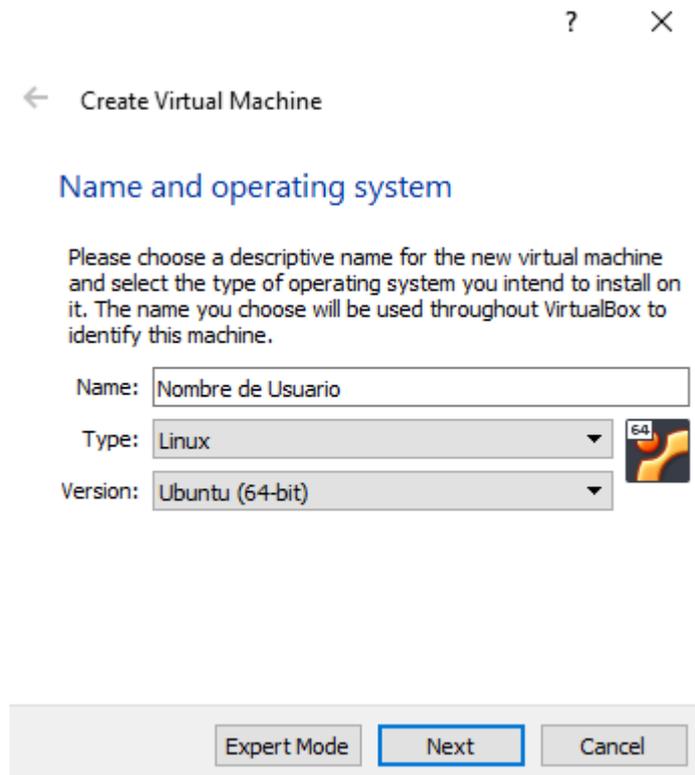


Figura 5.2 Creación del usuario de máquina virtual y sistema operativo

En “Name” damos un nombre al usuario de la máquina virtual, en “Type” escogemos Linux y finalmente en “Version” escogemos la versión del Ubuntu de acuerdo a las características del ordenador donde se desea instalar.

6. Se escoge la capacidad de la memoria destinada a la máquina virtual. Recomendable asignar 3024 MB, como se muestra en la Figura 5.3.

← Create Virtual Machine

Memory size

Select the amount of memory (RAM) in megabytes to be allocated to the virtual machine.

The recommended memory size is **1024** MB.



Next

Cancel

Figura 5.3 Capacidad de memoria RAM para la máquina virtual

7. En la siguiente ventana escogemos la opción "Create a virtual hard disk now" y damos click en la opción "Crear"
8. A continuación, escogemos la opción VDI (VirtualBoxD Disk Image), click en siguiente.
9. En la siguiente ventana escogemos la opción "Dinamically Allocated"
10. Escogemos el nombre del disco y recomendable asignar 30 GB de almacenamiento si se desean ejecutar simulaciones numéricas, como se especifica en la Figura 5.4.

← Create Virtual Hard Disk

File location and size

Please type the name of the new virtual hard disk file into the box below or click on the folder icon to select a different folder to create the file in.

DanielMiranda 

Select the size of the virtual hard disk in megabytes. This size is the limit on the amount of file data that a virtual machine will be able to store on the hard disk.

 30.00 GB
4.00 MB 2.00 TB

Create

Cancel

Figura 5.4 Asignación de nombre y espacio del disco

11. Creamos el disco y debemos tener lo que se muestra en la Figura 5.5, en la ventana de HOME

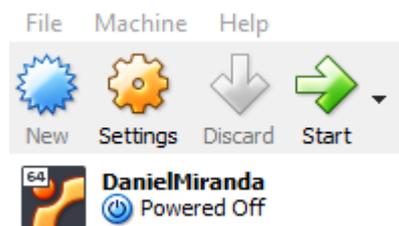


Figura 5.5 Creación del disco

12. Damos dobles click sobre el disco creado y aparecerá una nueva ventana como se observa en la Figura 5.6, donde se debe escoger la ubicación del instalador de Ubuntu que se descargó anteriormente. Y damos click en "Start" donde se ejecutará la instalación del nuevo sistema operativo en máquina virtual.

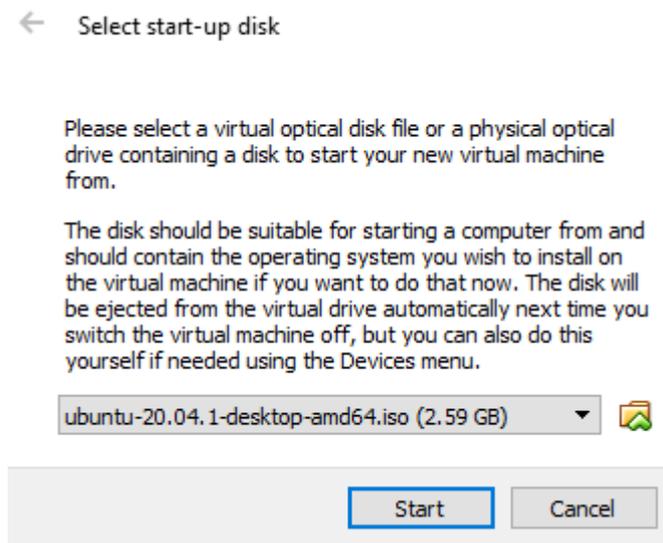


Figura 5.6 Selección del instalador del sistema operativo Ubuntu

13. Se espera hasta que inicie el ejecutor y aparecerá una nueva ventana como se muestra en la Figura 5.7, donde se debe escoger el idioma de preferencia, región, zona horaria y el nombre que se le asignará al usuario del sistema operativo junto a la contraseña de seguridad.

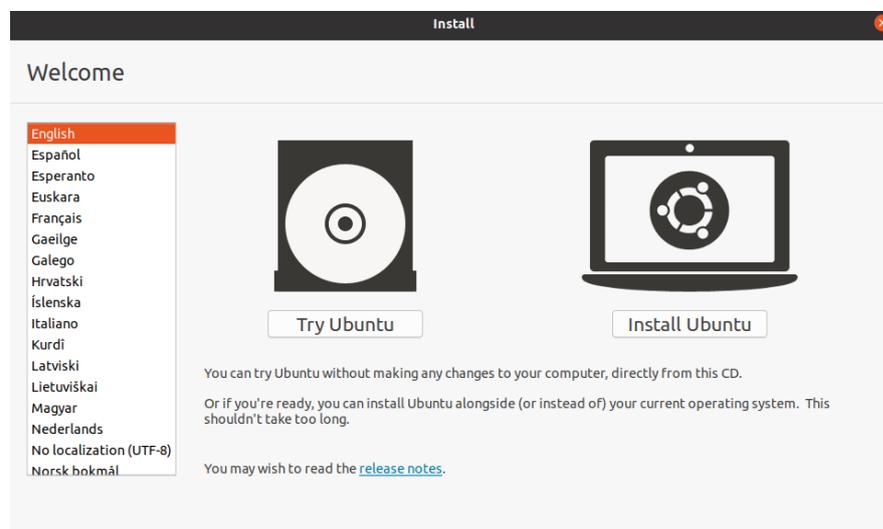


Figura 5.7 Configuración de Ubuntu

14. La instalación tarda alrededor de 15 minutos. Cuando se hay instalado el nuevo sistema operativo en el escritorio se ejecuta un Nuevo terminal donde aplicaremos los siguientes comandos especificados en la página oficial de OpenFOAM para la instalación de la versión v7.

<https://openfoam.org/download/7-ubuntu/>

Los comandos serán ejecutados en la ventana del terminal en el siguiente orden:

- I. `sudo sh -c "wget -O - https://dl.openfoam.org/gpg.key | apt-key add -"`
- II. `sudo add-apt-repository http://dl.openfoam.org/ubuntu`
- III. `sudo apt-get update`

Con el siguiente comando se procede a la instalación de OpenFOAM y Paraview.

- IV. `sudo apt-get -y install openfoam7`
- V. `sudo apt-get update`
- VI. `sudo apt-get upgrade`
- VII. `gedit ~/.bashrc`

Aparecerá un archivo de texto. En la última línea poner:

- VIII. `source /opt/openfoam7/etc/bashrc`

En la carpeta HOME → OpenFOAM, creamos una carpeta con el siguiente formato <USER>-7, y finalmente se ejecuta el último comando:

- IX. `mkdir -p $FOAM_RUN`
15. Con la ejecución de este último comando, se crea la carpeta “run” donde guardaremos todas las carpetas de resultados de OpenFOAM que deseemos ejecutar para la visualización de resultados.
 16. Podemos verificar en el siguiente directorio que la carpeta de OpenFOAM y ParaView se instalaron correctamente: Computer -> Opt