

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



TESIS

**Ecuación paramétrica de un casco de embarcación basada en
simulación numérica**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Naval.

Elaborado por

Jean Carlo Gutarra Socualaya

 [0009-0009-9083-8037](https://orcid.org/0009-0009-9083-8037)

Asesor

DSc. Juan José Uchuya López

 [0000-0002-6810-1065](https://orcid.org/0000-0002-6810-1065)

TOMO I DE I

LIMA – PERÚ

2023

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico de forma especial a mi familia por todo el apoyo y el oportuno consejo. Asimismo, a mis amigos de la universidad y docentes por la enseñanza y valores inculcados. Muchas gracias a todos ellos por su amor, apoyo y confianza depositada en mí.

Jean Gutarra

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi asesor, el Dr. Ing. Juan José Uchuya López, por su amistad y el apoyo brindado en la elaboración y culminación de este trabajo tesis.

También a los profesores y autoridades de la Universidad Nacional de Ingeniería por la formación académica y profesional desde que ingresé.

A los amigos, colegas, compañeros de aulas y de trabajo de los cuales he aprendido a ser mejor persona y profesional.

A mis padres, hermanos, familiares por ser parte y apoyo fundamental de mi vida.

Y a Dios, por todo.

*“Nuestra mayor debilidad es rendirse, la única manera
de tener éxito es intentarlo siempre una vez más”*

Thomas A. Edison

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad evaluar la resistencia al avance de una embarcación pesquera de tipo cerco afectado por una variación paramétrica de su forma. La ecuación paramétrica de la forma del casco se modifica por el parámetro del bulbo, cuyo coeficiente de bulbo aumenta según la eslora de bulbo. Se presentan cuatro formas de cascos comenzando por uno sin bulbo y siguiendo tres en que aumenta la eslora del bulbo. Cada forma de casco es evaluada en su resistencia al avance para cuatro velocidades en nudos, 20, 15, 10 y 5, respectivamente. La herramienta empleada para la evaluación en CFD es el software de simulación computacional CAESES y sus herramientas de funcionalidad intrínsecas de conservación de continuidad de flujo de presiones y continuidad de superficie mojada. Los resultados son presentados en una situación de mar calmo para mostrar el perfil de olas generado a una velocidad de navegación, la presión sobre el casco y el perfil de velocidades por la resistencia al avance.

ABSTRACT

The purpose of this research work is to evaluate the resistance to advance of a heavy seine-type vessel affected by a parametric variation of its shape. The hull shape parametric formula is modified by the bulbous parameter, whose bulbous ratio increases with bulbous length. Four forms of hulls are presented, starting with one without a bulb and following three in which the length of the bulb increases. Each hull shape is evaluated for its drag at four speeds in knots, 20, 15, 10, and 5, respectively. The tool used for the CFD evaluation is the CAESES computer simulation software and its intrinsic functionality tools for conservation of pressure flow continuity and wet surface continuity. The results are presented in a calm sea situation to show the wave profile generated at a navigation speed, the pressure on the hull and the speed profile due to the resistance to advance.

NOMENCLATURA

Simbología	Significado
ρ	Densidad del agua
R_T	Resistencia total
C_T	coeficiente de resistencia total
ρ	Densidad del agua
v_s	Velocidad del barco
S	Superficie mojada
R_{F0}	Rozamiento superficial
c_{FO}	Coefficiente de fricción de placa plana
C_{FITTC}	Coefficiente de fricción de la ITTC
R_R	Rozamiento Residual
C_R	Coefficiente residual
C_A	Coefficiente de tolerancia
Re	Número de Reynolds
L	Longitud del barco (eslora)
ν	Viscosidad cinemática
F_N	Número de Froude
g	Gravedad
k	Factor de forma
HF	Alta fidelidad
LF	Baja Fidelidad
n	Número de evaluación
k	Número de iteración
i	Partícula
N_p	Número de partículas
v_i^n	Velocidad de partícula i en n evaluaciones
x_i^n	Posición de partícula i en n evaluaciones
x	Factor de constricción
c_1	Tasa de aprendizaje cognitivo y social
c_2	Tasa de aprendizaje social
p_i	Atractor cognitivo
g	Atractor social
D	Conjunto de direcciones de búsqueda
c_k	tamaño del paso inicial

ϑ	Reducción de dominio variable
LBP	Longitud fija entre perpendiculares
Δ	Desplazamiento fijo
B	Manga fija
T	Calado fijo
WL	Línea de flotación
δ_s	Modificación de forma
ξ y η	Coordenadas curvilíneas sobre el semicasco
j	Número de función
α_j	Variables de diseño
Ψ_j	Función ortonormal
$f(x)$	Función objetivo
x	Vector de la variable de diseño
\sim	Predicción mediante un metamodelo
f_L y f_H	Alta y baja fidelidad
ε	Error
\mathcal{L}	Conjunto de entrenamiento para \hat{f}_L
ε	Conjunto de entrenamiento para $\tilde{\varepsilon}$. $\varepsilon \subseteq \mathcal{L}$
$U_{\hat{f}_L}$	Incertidumbre de predicción de \hat{f}_L
$U_{\tilde{\varepsilon}}$	Incertidumbre de predicción de $\tilde{\varepsilon}$
$U_{\hat{f}}$	Incertidumbre asociada a $\hat{f}(x)$
x^*	Maximización de $U_{\hat{f}}$
β	Parámetro de ajuste arbitrario
P_i	Minimizador personal de la función objetivo agregada $F(x_i)$
g_i	Punto más cercano a la i-ésima partícula
S^n	conjunto de soluciones no dominadas S en la n-ésima iteración
ϑ	Factor respecto a la iteración anterior
ηN_p	Presupuesto de evaluaciones
R_T	Resistencia hidrodinámica
L_{OA}	Eslora de buque
A_{WP}	Área de flotación prismática
Δ	Variación con respecto al casco original
∇	Volumen de casco
γ	Valor de convergencia
$U\Delta\widetilde{R}_T$	Incertidumbre máxima de la predicción
$AMFM$	Metamodelo adaptativo de fidelidad múltiple

<i>KLE</i>	Expansión de Karhunen-Loève
<i>FPM</i>	Modelado totalmente paramétrico
<i>PPM</i>	Modelado parcialmente paramétrico
<i>FFD</i>	Deformación de forma libre
<i>WARP</i>	Programa de resistencia a las olas
<i>SWATH</i>	casco gemelo de área de agua pequeña

ÍNDICE

PRÓLOGO	1
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	3
1.1 GENERALIDADES	3
1.2 REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	3
1.2.1 Problema	4
1.2.2 Problemas específicos.....	4
1.2.3 Solución.....	5
1.3 OBJETIVOS	5
1.3.1 Objetivo General.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos	5
1.4 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	5
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	14
2.1 MARCO TEÓRICO GENERAL	14
2.1.1 Resistencia del Buque	14
2.1.2 Métodos empíricos	17
2.1.3 Optimización basada en simulación y metamodelación adaptativa multifidelidad.....	18
2.1.4 Funcionalidad intrínseca de la CAESES	35
2.2 MARCO CONCEPTUAL	40
2.2.1 Simulación numérica	40
2.2.2 Parametrización.....	41
2.2.3 Casco	41
2.2.4 CFD (Computational Fluid Dynamics).....	41
2.2.5 Optimización.....	41
2.2.6 Resistencia al avance.....	41

2.2.7	Bulbo	42
2.2.8	Método empírico.....	42
2.2.9	Algoritmo	42
2.2.10	RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)	42
CAPITULO III: HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES		43
3.1	FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS	43
3.1.1	Hipótesis General	43
3.1.2	Hipótesis Específicas.....	43
3.2	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	43
CAPITULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN		45
4.1	TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	45
4.1.1	Tipo de Investigación.....	45
4.1.2	Diseño de la Investigación	46
4.2	UNIDAD DE ANÁLISIS	46
4.3	MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	46
CAPITULO V: DESARROLLO DE LA TESIS.....		48
5.1	DISEÑO DE LA EMBARCACIÓN	48
5.1.1	Dimensiones principales de embarcación de cerco típico del Perú.....	48
5.1.2	Modelamiento Tridimensional de la Embarcación	48
5.2	FUNCIONAMIENTO DEL CFD	49
5.2.1	Pre-procesamiento	50
5.2.2	Procesamiento.....	50
5.2.3	Post-procesamiento.....	50
5.3	PARÁMETROS DE ECUACIÓN PARAMÉTRICA.....	50
CAPITULO VI: ANÁLISIS Y RESULTADOS		52
6.1	DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA	52
6.1.1	Resistencia al avance de Casco 1 a velocidad de 20 nudos.....	52
6.1.2	Resistencia al avance de Casco 1 a velocidad de 15 nudos.....	53

6.1.3	Resistencia al avance de Casco 1 a velocidad de 10 nudos.....	55
6.1.4	Resistencia al avance de Casco 1 a velocidad de 5 nudos.....	56
6.1.5	Resistencia al avance de Casco 2 a velocidad de 20 nudos.....	58
6.1.6	Resistencia al avance de Casco 2 a velocidad de 15 nudos.....	60
6.1.7	Resistencia al avance de Casco 2 a velocidad de 10 nudos.....	61
6.1.8	Resistencia al avance de Casco 2 a velocidad de 5 nudos.....	63
6.1.9	Resistencia al avance de Casco 3 a velocidad de 20 nudos.....	65
6.1.10	Resistencia al avance de Casco 3 a velocidad de 15 nudos.....	66
6.1.11	Resistencia al avance de Casco 3 a velocidad de 10 nudos.....	68
6.1.12	Resistencia al avance de Casco 3 a velocidad de 5 nudos.....	70
6.1.13	Resistencia al avance de Casco 4 a velocidad de 20 nudos.....	71
6.1.14	Resistencia al avance de Casco 4 a velocidad de 15 nudos.....	73
6.1.15	Resistencia al avance de Casco 4 a velocidad de 10 nudos.....	75
6.1.16	Resistencia al avance de Casco 4 a velocidad de 5 nudos.....	76
6.2	RESULTADOS	78
6.2.1	Resultados de la resistencia al avance.....	78
	CONCLUSIONES	80
	RECOMENDACIONES.....	82
	BIBLIOGRAFÍA.....	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Descomposición de la resistencia al avance del barco.....	15
Figura 2.2 Funciones ortonormales $\Psi_j(\xi, \eta)$	24
Figura 2.3 Historial de convergencia de la función objetivo (izquierda) y detalle tras las 100 primeras evaluaciones de la función (derecha).....	25
Figura 2.4 El resultado de la optimización tras 1.536 evaluaciones de la función.	26
Figura 2.5 Resultado de la optimización después de 1.536 evaluaciones de funciones..	27
Figura 2.6 Metamodelo de multifidelidad, procedimiento de muestreo adaptativo.....	28
Figura 2.7 Varianza normalizada resuelta por un espacio de dimensionalidad reducida de dimensión N (suma acumulada de valores KLE).....	30
Figura 2.8 Los dos primeros modos KLE mostrados por los componentes x, y y z de SWATH	31
Figura 2.9 Incertidumbre global máxima en función del número de iteraciones	32
Figura 2.10 Conjunto de soluciones no dominadas para los problemas 1 y 2	33
Figura 2.11 Comparación de cascos para el problema 1 de SWATH.....	34
Figura 2.12 Comparación de cascos para el problema 2 de SWATH.....	34
Figura 2.13 Comparación del casco entre la solución A y B de SWATH.....	35
Figura 2.14 Visión general de la funcionalidad de CAESES® junto con una selección de sistemas de software frecuentemente acoplados y proveedores de herramientas y sistemas del consorcio HOLISHIP	36
Figura 2.15 Envoltura de herramientas a través de sus archivos de entrada y salida en CAESES®	37
Figura 2.16 Conexión de herramientas dentro de CAESES® a través de archivos de plantilla como parte de una cadena de procesos	38
Figura 2.17 Cambio de posición y longitud del cuerpo medio paralelo.....	40
Figura 5.1 Esquema de líneas de forma de una embarcación pesquera.....	49

Figura 5.2 Malla de volumen de celda.	49
Figura 6.1 Vista longitudinal del 3D del Casco 1.	52
Figura 6.2 Vista de planta de Casco 1 y perfil de olas a 20 nudos.	53
Figura 6.3 Vista de planta de Casco 1 y perfil de olas a 15 nudos.	53
Figura 6.4 Vista longitudinal de Casco 1 y perfil de olas a 15 nudos.	54
Figura 6.5 Presión sobre el Casco 1 a 15 nudos.	54
Figura 6.6 Perfil de velocidad del Casco 1 a 15 nudos.	54
Figura 6.7 Vista de planta de Casco 1 y perfil de olas a 10 nudos.	55
Figura 6.8 Vista longitudinal de Casco 1 y perfil de olas a 10 nudos.	55
Figura 6.9 Presión sobre el Casco 1 a 10 nudos.	56
Figura 6.10 Perfil de velocidad del Casco 1 a 10 nudos.	56
Figura 6.11 Vista de planta de Casco 1 y perfil de olas a 5 nudos.	57
Figura 6.12 Vista longitudinal de Casco 1 y perfil de olas a 5 nudos.	57
Figura 6.13 Presión sobre el Casco 1 a 5 nudos.	57
Figura 6.14 Perfil de velocidad del Casco 1 a 5 nudos.	58
Figura 6.15 Vista longitudinal del 3D del Casco 2.	58
Figura 6.16 Vista de planta de Casco 2 y perfil de olas a 20 nudos.	59
Figura 6.17 Presión sobre el Casco 2 a 20 nudos.	59
Figura 6.18 Perfil de velocidad del Casco 2 a 20 nudos.	59
Figura 6.19 Vista de planta de Casco 2 y perfil de olas a 15 nudos.	60
Figura 6.20 Vista longitudinal de Casco 2 y perfil de olas a 15 nudos.	60
Figura 6.21 Presión sobre el Casco 2 a 15 nudos.	61
Figura 6.22 Perfil de velocidad del Casco 2 a 15 nudos.	61
Figura 6.23 Vista de planta de Casco 2 y perfil de olas a 10 nudos.	62
Figura 6.24 Vista longitudinal de Casco 2 y perfil de olas a 10 nudos.	62
Figura 6.25 Presión sobre el Casco 2 a 10 nudos.	62
Figura 6.26 Perfil de velocidad del Casco 2 a 10 nudos.	63
Figura 6.27 Vista de planta de Casco 2 y perfil de olas a 5 nudos.	63

Figura 6.28 Vista longitudinal de Casco 2 y perfil de olas a 5 nudos.....	64
Figura 6.29 Presión sobre el Casco 2 a 5 nudos.....	64
Figura 6.30 Perfil de velocidad del Casco 2 a 5 nudos.....	64
Figura 6.31 Vista longitudinal del 3D del Casco 3.....	65
Figura 6.32 Vista de planta de Casco 3 y perfil de olas a 20 nudos.....	65
Figura 6.33 Presión sobre el Casco 3 a 20 nudos.....	66
Figura 6.34 Perfil de velocidad del Casco 3 a 20 nudos.....	66
Figura 6.35 Vista de planta de Casco 3 y perfil de olas a 15 nudos.....	67
Figura 6.36 Vista longitudinal de Casco 3 y perfil de olas a 15 nudos.....	67
Figura 6.37 Presión sobre el Casco 3 a 15 nudos.....	67
Figura 6.38 Perfil de velocidad del Casco 3 a 15 nudos.....	68
Figura 6.39 Vista de planta de Casco 3 y perfil de olas a 10 nudos.....	68
Figura 6.40 Vista longitudinal de Casco 3 y perfil de olas a 10 nudos.....	69
Figura 6.41 Presión sobre el Casco 3 a 10 nudos.....	69
Figura 6.42 Perfil de velocidad del Casco 3 a 10 nudos.....	69
Figura 6.43 Vista de planta de Casco 3 y perfil de olas a 5 nudos.....	70
Figura 6.44 Vista longitudinal de Casco 3 y perfil de olas a 5 nudos.....	70
Figura 6.45 Presión sobre el Casco 3 a 5 nudos.....	71
Figura 6.46 Perfil de velocidad del Casco 3 a 5 nudos.....	71
Figura 6.47 Vista longitudinal del 3D del Casco 4.....	72
Figura 6.48 Vista de planta de Casco 4 y perfil de olas a 20 nudos.....	72
Figura 6.49 Presión sobre el Casco 4 a 20 nudos.....	72
Figura 6.50 Perfil de velocidad del Casco 4 a 20 nudos.....	73
Figura 6.51 Vista de planta de Casco 4 y perfil de olas a 15 nudos.....	73
Figura 6.52 Vista longitudinal de Casco 4 y perfil de olas a 15 nudos.....	74
Figura 6.53 Presión sobre el Casco 4 a 15 nudos.....	74
Figura 6.54 Perfil de velocidad del Casco 4 a 15 nudos.....	74
Figura 6.55 Vista de planta de Casco 4 y perfil de olas a 10 nudos.....	75

Figura 6.56 Vista longitudinal de Casco 4 y perfil de olas a 10 nudos.....	75
Figura 6.57 Presión sobre el Casco 4 a 10 nudos.....	76
Figura 6.58 Perfil de velocidad del Casco 4 a 10 nudos.....	76
Figura 6.59 Vista de planta de Casco 4 y perfil de olas a 5 nudos.	77
Figura 6.60 Vista longitudinal de Casco 4 y perfil de olas a 5 nudos.....	77
Figura 6.61 Presión sobre el Casco 4 a 5 nudos.....	77
Figura 6.62 Perfil de velocidad del Casco 4 a 5 nudos.....	78
Figura 6.63 Resistencia al avance vs casco y velocidad.....	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Comparación entre la predicción del metamodelo y la evaluación real del HF	35
Tabla 3.1 Matriz de operacionalización de variables.....	44
Tabla 4.2. Matriz de consistencia.....	47
Tabla 5.1. Características generales.....	48
Tabla 6.1. Resumen de la resistencia al avance por casco (en N) a diferentes velocidades.....	78

PRÓLOGO

La actividad pesquera es atractiva en el litoral peruano por el vasto recurso hidrobiológico que cuenta, pero el desarrollo de esta actividad requiere embarcaciones con mayor autonomía y soportar las condiciones de faena y de navegación con pesca.

En Perú es habitual ver embarcaciones pesqueras de tipo cerco, pero estas tienen un problema en el consumo de combustible por la alta resistencia al avance debido a los diseños que fueron proyectos con bajos criterios de la aplicación de la hidrodinámica. A decir verdad, la construcción de este tipo de embarcación se ha realizado de forma tradicional, con ciertas modificaciones en las formas de planos discontinuados, que carecen de un estudio profundo de estabilidad y dinámica del buque, entre otros.

La presente tesis pretende estudiar el diseño de las embarcaciones con la aplicación de ecuaciones paramétricas que darán forma al casco y ser evaluadas, a través de la simulación numérica, una velocidad de navegación del casco, y un perfil de olas, la presión sobre el casco y perfil de velocidades por la resistencia al avance.

En el desarrollo de este trabajo, la presente tesis se divide en los siguientes capítulos:

Capítulo I: Introducción: Aquí se presentan los antecedentes bibliográficos, las generalidades, la descripción de la problemática y objetivos del trabajo de investigación.

Capítulo II: Marco Teórico y Conceptual: se presenta en este capítulo los conceptos sobre resistencia al avance, métodos empíricos, la simulación numérica y metamodelación, el programa CAESSES, entre otros conceptos como el CFD, parametrización, entre otros, con el fin de que el lector sostenga una comprensión del trabajo de investigación.

Capítulo III: Hipótesis y operacionalización de variables: Se presentan los supuestos y el tratamiento de las variables objeto de estudio según los objetivos planteados.

Capítulo IV: Metodología de investigación: Se presenta el tipo y diseño de la investigación, la unidad de análisis y la matriz de consistencia.

Capítulo V: Desarrollo de la tesis: Se presenta el tipo y dimensiones de la embarcación pesquera tipo cerco, modelamiento tridimensional, funcionamiento del CFD y parámetros de la ecuación paramétrica para la evaluación de la resistencia al avance y análisis numérico.

Finalmente, se presentan las conclusiones donde se ratifica el cumplimiento de los objetivos planteados y las recomendaciones.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

El objetivo de una embarcación moviéndose a través de las olas es controlar la resistencia al avance, para ello debe estudiarse el comportamiento de las olas, quiere decir el patrón de las olas generadas. Las olas contienen energía que deben disiparse por el casco para disminuir la fuerza contraria al movimiento, siendo el componente más sobresaliente el de la resistencia del buque. Las ecuaciones paramétricas que describen el casco y alteran la definición de sus formas o complejidad estructural por una ecuación, se utilizan para interactuar con las olas a través de métodos de flujo potencial y turbulento que simula el patrón del flujo alrededor del casco, como flujo circulante, utilizado para estudiar la superficie libre e interacción de proa con bulbo con olas. En este tipo de estudio se desprecian los efectos viscosos del fluido para que el cálculo del flujo sea relativamente simple, rápido y preciso. El casco del barco y la superficie del agua en los códigos de flujo potencial generalmente se diferencian mediante paneles triangulares o cuadriláteros; por lo tanto, el fluido se comportará bajo el modelo RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), que son ecuaciones del fluido variado que pasan por una promediación de la suma de todas las magnitudes del valor medio de los componentes fluctuacionales.

1.2 REALIDAD PROBLEMÁTICA

Hoy en día existe una tendencia a nivel mundial de conseguir cascos de buques sofisticados, que permitan a disminuir el consumo de combustible que aumenta por la alta

resistencia al avance de un buque, vale decir, la resistencia contraria al movimiento del buque. Esta disminución energética conlleva a generar modelos matemáticos para generar los cascos, a partir de estrategias de parametrización u optimización, llamadas ecuaciones paramétricas, los cuales son función de parámetros convencionales como la eslora, manga, puntal, entre otros. A pesar de los esfuerzos realizados en la búsqueda de modelos de cascos matemáticos aún existen algunas inconsistencias que se deben debido al tipo de proa, popa y buques con bulbos, esas variables geométricas generan problemas al establecer una metodología numérica para establecer una ecuación paramétrica para la forma del casco de buques que generen menor resistencia al avance. Aun así, el uso de la simulación numérica disminuye el costo computacional para predecir el comportamiento de los cascos sometidos a modificación de forma por una ecuación numérica, apenas comprobando la resistencia al avance.

Desde los primeros trabajos intentados para generar y variar la forma de los cascos matemáticamente por Taylor y desde el surgimiento de diseño de cascos asistidos por computadoras innumerables métodos de diseños vía curvas y superficies han sido elaborados. Entre las metodologías más comunes son destacadas las que consideran una topología de superficie de dominio complejo múltiple con volumen asociado.

1.2.1 Problema

¿Cómo las ecuaciones paramétricas afectan la forma del casco mediante simulaciones numéricas?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cómo las ecuaciones paramétricas afectan la resistencia al avance al utilizar simulaciones numéricas?
- ¿Cómo las ecuaciones paramétricas consideran la continuidad al utilizar simulaciones numéricas?

- ¿Por qué los parámetros del casco afectan la forma del casco al evaluarlas mediante simulaciones numéricas?
- ¿Por qué los parámetros del bulbo afectan la forma del casco al evaluarlas mediante simulaciones numéricas?

1.2.3 Solución

Realizar un estudio de ecuaciones paramétricas en que, por medio de simulaciones numéricas, se pueda evaluar el efecto que se tiene sobre la geometría del casco de una embarcación.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Obtener las ecuaciones paramétricas que afectan la forma del casco mediante simulaciones numéricas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Obtener las ecuaciones paramétricas que afectan la resistencia al avance al utilizar simulaciones numéricas.
- Obtener las ecuaciones paramétricas que afectan la continuidad al utilizar simulaciones numéricas.
- Evaluar los parámetros del casco que afectan la forma del casco al usar simulaciones numéricas.
- Evaluar los parámetros del bulbo que afectan la forma del casco al usar simulaciones numéricas.

1.4 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Para direccionar el estado de arte del presente trabajo es desarrollada una revisión bibliográfica, la cual considera trabajos relevantes, internacionalmente, por ser un tema de investigación reciente. Los antecedentes revisados contienen temas de parametrización y optimización de cascos mediante modelos matemáticos, siendo importante destacar que

hoy en día esta optimización es crucial en el diseño de casco de busque. Continuamente se presenta la referencia bibliográfica desarrollada en la presente propuesta de tesis.

Choo et al. (2020), presenta un concepto de diseño y optimización automatizada de buques mediante la hibridación de algoritmos evolutivos y morphing (HEAM) para permitir un proceso de diseño de buques más inteligente y eficiente, que lograría la eficiencia global del diseño y la optimización de las formas del casco. Se mapea toda la forma del casco del barco en un genotipo utilizando el Algoritmo Genético de Ordenación No Dominante II (NSGA-II) y la modificación flexible a través del morphing para crear diseños eficientes para la forma del casco. Se utilizaron 12 diseños de formas de casco existentes en la población inicial y se demuestra que se consiguió una mejora del rendimiento del 11,67% que, a su vez, muestra que logra una mayor eficiencia y una mínima dependencia del usuario.

Ang et al. (2019), introduce un algoritmo evolutivo híbrido y morphing (HEAM) con la finalidad de brindar un diseño inteligente automatizado. Funciona mapeando la forma completa del casco (fenotipo) en un cromosoma (genotipo), que permite la modificación global de la forma mediante un nuevo método de morphing 2D. Combinando el morphing 2D y el algoritmo genético (GA), permite producir más rápidamente diseños óptimos de cascos sin la intervención del usuario. Una característica única del enfoque propuesto es la forma en que se realiza el cruce, donde dos o más estructuras de casco pueden combinarse sin problemas para producir una nueva forma de casco ya que con el anterior método de diseño algunos resultaban inviables. Los resultados muestran que es posible mejorar aún más el diseño del casco con una reducción de hasta el 5,58% de la resistencia total. Con ello se demuestra que existe la posibilidad de realizar un proceso de diseño y optimización de la forma del casco totalmente automatizado, capaz de producir una forma de casco óptima con un rendimiento hidrodinámico mejorado.

Nikolopoulos & Boulougouris (2020), presentan una metodología que se adopta a enfoques holísticos, con consideraciones sobre el ciclo de vida y que apuntan a diseños robustos. Está construida dentro del software CAESES y consta de un núcleo de modelo

geométrico con diferentes módulos integrados que cubren la estabilidad, la resistencia, la potencia y la propulsión, la seguridad, la economía, así como un módulo de simulación de operaciones, que permite al usuario simular la respuesta en variaciones de las variables geométricas y de diseño del buque bajo distintos tipos de incertidumbre en las que se incluyen: la incertidumbre económica, medioambiental y operativa, así como la inexactitud de los propios métodos. Se concluye que la metodología que se propone para el diseño impulsado por la simulación con el ciclo de vida, la cadena de suministro y el funcionamiento real en los parámetros de servicio puede desencadenar con éxito una reducción de la RFR y la EEOI a través de la variación sistemática y las técnicas de optimización avanzadas. Sin embargo, la investigación es un trabajo preliminar con la que se busca ilustrar la aplicabilidad y el potencial de este método.

Yang & Huang (2016), presenta este artículo de revisión donde se muestra una visión general de la optimización del diseño hidrodinámico basado en la simulación de las formas del casco del buque. Se discute en detalle una herramienta computacional que tiene como objetivo lograr el diseño basado en la simulación en las primeras etapas en términos de rendimiento hidrodinámico. Los principales componentes de esta herramienta computacional consisten en un módulo hidrodinámico, un módulo de modelado de la superficie del casco y un módulo de optimización. Estas herramientas CFD integradas se utilizan para evaluar las prestaciones hidrodinámicas en las distintas fases de diseño. El módulo de modelado de la superficie del casco incluye varias técnicas de representación y modificación de la superficie del casco del buque y se utiliza para producir automáticamente las formas del casco o modificar las existentes en términos de rendimiento hidrodinámico y restricciones de diseño. El módulo de optimización incluye varios algoritmos de optimización y modelos sustitutos, que se utilizan para determinar diseños óptimos en términos de rendimiento hidrodinámico dado. Como ilustración de la herramienta computacional, se optimiza un casco de la serie 60 para reducir la resistencia aerodinámica utilizando tres estrategias de modificación diferentes para esbozar el procedimiento específico para llevar a cabo el diseño hidrodinámico basado en la

simulación de las formas del casco del buque utilizando la presente herramienta. Los resultados numéricos muestran que esta herramienta es muy adecuada para la optimización del diseño de la forma del casco en la fase inicial del diseño, ya que puede producir diseños óptimos eficaces en un corto período de tiempo. Resulta adecuada para el diseño hidrodinámico innovador de las formas del casco de los buques en la fase inicial del diseño.

Park et al. (2015), despliega técnicas de optimización con el fin de obtener la forma óptima del casco de KSUEZMAX en las condiciones de calado a plena carga y velocidad de diseño mediante la simulación del manual de trabajo del astillero. Las funciones objetivo son los valores mínimos del coeficiente de resistencia de formación de olas y presión viscosa para la proa y la popa. Las funciones de modificación paramétrica para la variación de la forma del casco de proa son la forma SAC, la forma de la sección (tipo U-V, tipo DLWL), forma de la bombilla (altura y tamaño de la bombilla); y los de popa son SAC y forma de sección (tipo U-V, tipo DLWL). Las pruebas del modelo se han llevado a cabo en un tanque de remolque para evaluar el rendimiento de resistencia de la forma de casco optimizada. Se ha observado que la forma de casco optimizada brinda 2,4% y 6,8% reducción de los coeficientes de resistencia total y residual en comparación con los de la forma original del casco. La eficacia del propulsor aumenta en un 2,0% y la potencia entregada se reduce en un 3,7%, mientras que la velocidad de rotación de la hélice aumenta ligeramente en 0,41 rpm. El resultado de la prueba modelo muestra que la forma optimizada del casco brinda una reducción del 1,7% en la potencia efectiva además de una reducción del 3,7% en la potencia demandada. Este trabajo contribuirá a que el diseño de la forma del casco en un astillero se refleje en la información objetiva, a la reducción del período de desarrollo a través de la automatización y a la mejora del rendimiento de la velocidad.

Park & Choi (2013), desarrollan un procedimiento de diseño de un buque con una resistencia mínima utilizando un método de optimización numérica denominado SQP (Sequential Quadratic Programming) combinado con la técnica de dinámica de fluidos

computacional (CFD). El coeficiente de resistencia a la fricción se estimó mediante la fórmula de la línea de correlación modelo-barco del CIMT 1957, y el coeficiente de resistencia al oleaje se evaluó mediante el método del panel de flujo potencial con las condiciones de contorno de la superficie libre no lineal. Los modelos de los cascos principales y optimizados se probaron en aguas tranquilas para demostrar la validez de la metodología propuesta. El algoritmo de optimización del casco se aplicó al casco de la serie 60 ($CB = 0,60$) como casco principal y generó la forma de casco optimizada desde el punto de vista de la resistencia mínima. Se realizaron pruebas con el modelo para validar el algoritmo aplicado y los resultados calculados se compararon con los resultados experimentales que mostraron que la carena optimizada ofrecía una reducción del 13% en la resistencia y del 40% en la resistencia residual. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la tasa de reducción de la resistencia depende sobre todo de la elección de la carena madre. No obstante, los resultados indican que el algoritmo optimizado propuesto y las condiciones de restricción pueden aplicarse eficazmente para diseñar una mejor forma de casco.

Jeong & Kim (2013), desarrollan un marco de exploración de diseño de alta eficiencia para la forma del casco donde el marco consiste en la optimización multiobjetivo de la forma donde se introduce un algoritmo genético multiobjetivo (MOGA) que utiliza la metodología de la superficie de respuesta para lograr una exploración eficiente del espacio de diseño y se aplica el modelo Kriging. También se adopta aquí un nuevo método de modificación de la superficie que utiliza el método de desplazamiento y la interpolación de la función de base radial para representar varias formas de casco que permite realizar modificaciones globales y locales de la forma del casco con menos variables de diseño. Por otro lado, en la extracción del conocimiento de diseño, para adquirir conocimiento de diseño útil sobre una forma de casco, se aplican dos técnicas de minería de datos; el análisis funcional de la varianza (ANOVA) y el mapa autoorganizado (SOM). El presente marco se ha aplicado a la optimización de la forma del casco explorando la configuración de arrastre mínimo de olas bajo un amplio rango de velocidades. Se demuestra que el

método reduce notablemente el periodo de diseño. A partir de los resultados de la minería de datos, es posible identificar las variables de diseño que controlan el rendimiento de la resistencia a las olas en diferentes regiones de velocidad y sus correspondientes características geométricas.

Feng et al. (2011), propone un método de morphing paramétrico del casco, utilizando la tecnología de desarrollo secundario de CAD para desarrollar los módulos de software correspondientes, adopta el marco de optimización integrada iSIGHT para integrar el módulo de integración paramétrica del buque, el análisis de rendimiento CFD y el algoritmo de optimización, y se construye sobre la base del marco de diseño óptimo integrado CAD / CFD. Para verificar la viabilidad del método de morphing de buques, se realizó la optimización de la proa del buque portacontenedores 1,300TEU mediante un algoritmo genético. Los resultados mostraron que el método de morphing de buques basado en CAD tiene las siguientes ventajas: (1) utiliza completamente la función de modelado paramétrico del software CAD, las variables de optimización son menores; (2) proporciona una forma precisa del casco para el análisis de resistencia; (3) adquiere la información de desplazamiento, centro longitudinal de flotabilidad, etc. del modelo CAD; (4) refleja directamente los resultados de la optimización en el modelo tridimensional del buque. El método aprovecha las notables capacidades de modelado del software CAD; no sólo generando el buque de ingeniería práctica, sino que también acortando el tiempo de optimización. Asimismo, puede proporcionar un modelo de forma precisa para el cálculo del rendimiento de la resistencia; y puede obtener automáticamente la información de la geometría del buque, como el desplazamiento y el centro de flotación en el proceso de optimización; los resultados de la optimización son el modelo CAD tridimensional y se aplicaron directamente al diseño posterior. Por lo tanto, el método de diseño de optimización del rendimiento de la resistencia del buque basado en el modelo CAD paramétrico tiene importancia práctica.

Tahara et al. (2011), lleva a cabo la optimización numérica del diseño inicial de un catamarán rápido (modelo B de investigación de transporte marítimo de alta velocidad,

HSSL-B) mediante un marco de diseño basado en la simulación (SBD), que a su vez es basado en un solucionador avanzado de Navier-Stokes con promediación de Reynolds en superficie libre (URANS) y un solucionador de flujo potencial, y algoritmos de optimización global (GO). El SBD de dinámica de fluidos computacional (CFD) de flujo potencial se utilizó para guiar el SBD de URANS CFD. El análisis fluidodinámico del flujo que pasa por el catamarán demostró que el uso del solver URANS era fundamental para tratar el problema de la interferencia de los multicascos. En el caso investigado, la distancia de separación era pequeña y el flujo viscoso bastante distorsionado por la proximidad de los cascos, por lo que sólo los solvers viscosos podían capturar correctamente los detalles del flujo. También son relevantes los efectos de hundimiento y trimado, debidos al alto rango de velocidades y, de nuevo, a la pequeña distancia de separación investigada. Se resolvió con éxito tres problemas de optimización, incluyendo problemas de optimización mono y multiobjetivo, propuestos por los diseñadores de Bath Iron Works, y finalmente se llevó a cabo una campaña experimental para validar el diseño óptimo. Estos resultados se evaluaron utilizando una nueva metodología de V&V para evaluar las incertidumbres y los errores en la optimización basada en la simulación. Basándose en la verificación numérica para identificar mejoras significativas sobre el diseño original, el diseño óptimo URANS CFD SBD/MO ID-151 para el problema del caso 3 fue seleccionado para una campaña EFD. Los resultados confirmaron el éxito de los procesos de optimización. A la velocidad de diseño, el número de Froude es 0,541, por lo que los valores del diseño óptimo se redujeron con éxito; y a través del mencionado procedimiento de V&V, se verificaron numérica y experimentalmente las tendencias de la resistencia total, el hundimiento y el trimado entre los diseños original y óptimo, y se validó la tendencia de la resistencia total. Mediante la práctica de este enfoque, se llega a la conclusión para la optimización basada en CFD de que el PF CFD es capaz de proporcionar algunas tendencias importantes que serán útiles para guiar la optimización del diseño; sin embargo, la tendencia debe ser corregida mediante el uso de métodos CFD de mayor fidelidad, como el URANS CFD, para producir un diseño óptimo más exitoso. Por último, el éxito de los procesos de optimización

se confirmó mediante las mediciones experimentales, y se verificaron y validaron numérica y experimentalmente las tendencias de la resistencia total, el hundimiento y el trimado entre los diseños originales y los óptimos.

Tahara et al. (2006), busca el desarrollo y la demostración de un método de optimización multiobjetivo basado en la dinámica computacional de los fluidos (CFD) para el diseño de buques. Los módulos de diseño asistido por ordenador CAD, CFD y optimizador, son funcionalmente independientes y reemplazables. El CAD utilizado en el presente estudio es el sistema NAPA. El método CFD es FLOWPACK versión 2004d. Además, se desarrolla y aplica un modelo de simulación de maniobras para predecir el rendimiento de la maniobrabilidad del buque. También, se utilizan dos algoritmos de optimización no lineal, la programación cuadrática sucesiva y el algoritmo genético multiobjetivo, mientras que el primero se utiliza principalmente para verificar los resultados del segundo. La demostración del sistema se lleva a cabo para minimizar simultáneamente la potencia entregada y el ángulo de rebasamiento obtenido a partir del simulador de autopropulsión y del método de simulación de maniobras, respectivamente. Es decir, el objetivo es minimizar simultáneamente rendimientos hidrodinámicos opuestos en el diseño. En combinación con el modelo CAD, se propone un método práctico de modificación de la forma del casco, es decir, que se basa en la mezcla de la forma del casco de un parámetro y el control de la curva de potencia C_p de dos parámetros. Resulta que el modelado geométrico basado en CAD evita con éxito la modificación irreal de la forma del casco y el método puede implementarse directamente en el proceso de diseño en curso. Además, los resultados obtenidos de la optimización multiobjetivo llegan a ser significativos y prometedores. En conclusión, el enfoque desarrollado en el trabajo es prometedor y puede ser ampliado para obtener un método de optimización multiobjetivo basado en CFD más capaz en diseños prácticos y productivos de formas de casco. La extensión del problema y la dirección de la investigación futura implicarán la aplicación a buques de alta velocidad en asociación con el desarrollo y la adopción de algoritmos de optimización global (GO) de nivel más avanzado y métodos CFD.

Suzuki et al. (2005), proponen métodos de optimización para la forma del casco de popa, en los que se introduce una técnica de optimización no lineal. Además, se presentan ejemplos numéricos de la forma del casco de un petrolero y de la forma del casco de un contenedor. A partir de estos estudios, el método de optimización sugerido puede confirmarse como un método de diseño simplificado y práctico para seleccionar las líneas de la estructura de los cascos de popa. En los presentes estudios, se ha introducido la hipótesis de la energía mínima del flujo secundario basada en el análisis del flujo potencial. De acuerdo con esta hipótesis, cabe esperar que las formas de casco que tienen líneas de marco con una energía mínima de flujo secundario puedan reducir la resistencia de la forma. En la primera parte de este artículo, se evaluó la energía del flujo secundario para el flujo potencial de doble modelo mediante el método de Hess y Smith, y para el flujo potencial de superficie libre mediante el método de la fuente de Rankine. A través de varios ejemplos numéricos para las formas de casco del petrolero SR221B y SR229 y la forma de casco del contenedor HTC, se confirmó la hipótesis de la energía mínima del flujo secundario. A continuación, se propusieron algunos métodos de optimización para la forma del casco de popa basados en la hipótesis de la energía mínima del flujo secundario para los casos sin y con efecto de superficie libre. En el proceso de optimización, se utilizó el SQP para minimizar la energía del flujo secundario. Estos procedimientos de optimización para las formas de proa, basados en la minimización del coeficiente de resistencia a la formación de olas, y para las formas de popa, basados en la hipótesis de la energía mínima del flujo secundario, pueden aceptarse como herramientas de diseño mutuamente eficaces para las formas totales del casco del buque.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

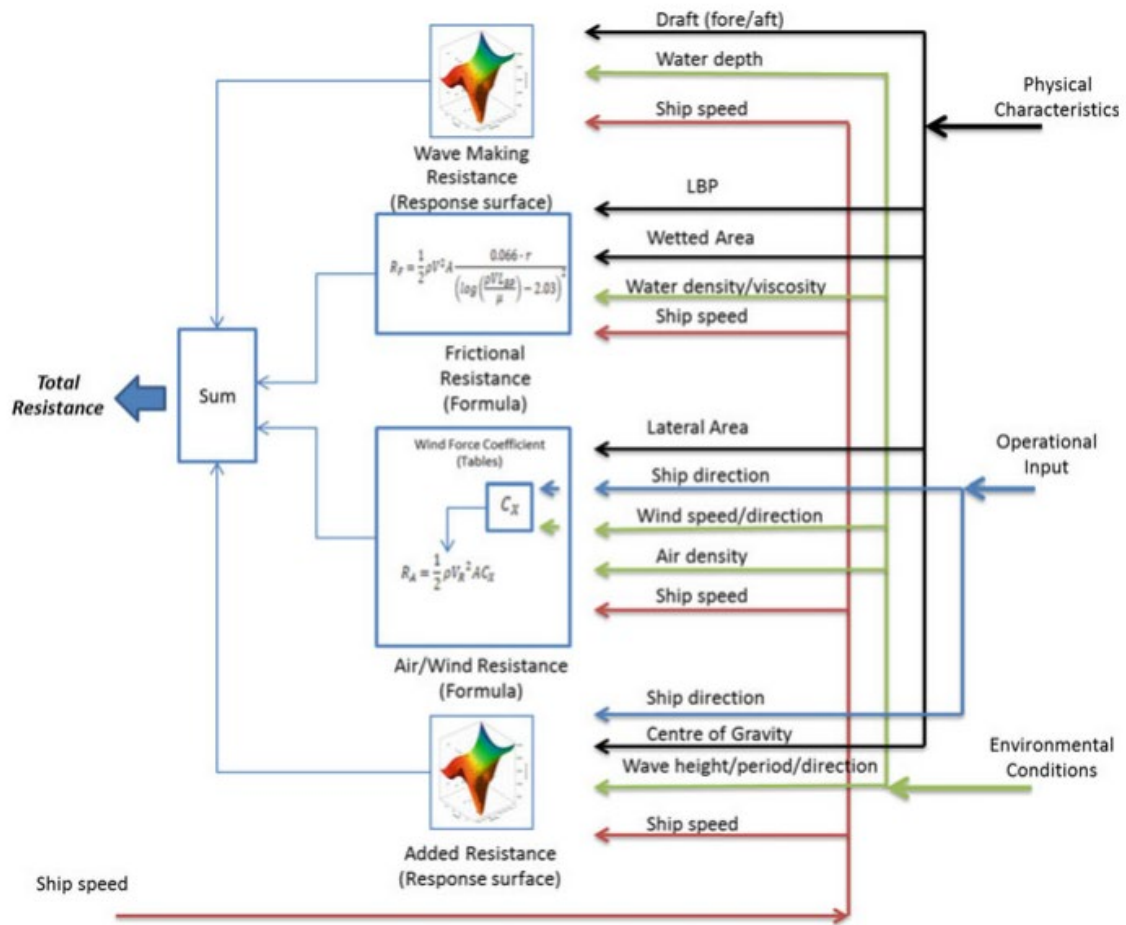
2.1 MARCO TEÓRICO GENERAL

2.1.1 Resistencia del Buque

Según Marzi & Broglia (2018), la resistencia del buque está formada por diferentes componentes: (i) la resistencia al oleaje relacionada con la presión o la forma, (ii) la resistencia viscosa y (iii) la resistencia añadida debida al viento y las olas. Éstas son responsables de hasta el 70% de la energía necesaria a bordo de un buque mercante. Debido a las diferentes causas de los componentes de la resistencia, relacionados con la presión (del casco) o con la fricción (de la superficie), deben tratarse con diferentes herramientas y deben considerarse en diferentes etapas del ciclo de vida del buque. Los componentes relacionados con la presión que dependen del casco son una característica de diseño que viene determinada por el casco en una fase muy temprana. Por otro lado, la resistencia viscosa depende en gran medida de la calidad y el tamaño de la superficie. Mientras que esta última es también una característica de diseño, la primera depende tanto de la calidad inicial de la producción como del revestimiento del casco y del mantenimiento durante el funcionamiento. Especialmente, esta última está claramente relacionada con la fase de funcionamiento del buque. Lo mismo ocurre con la resistencia añadida debida al viento y las olas, en la que se puede influir mediante el trazado de rutas meteorológicas y, en cierta medida, también mediante un diseño inteligente. La Figura 2.1 muestra la descomposición de la resistencia del buque que se suele utilizar en los trabajos de diseño y análisis.

Figura 2.1

Descomposición de la resistencia al avance del barco.



Nota: fuente Marzi & Broglia (2018)

En la actualidad, una combinación sensata de herramientas con diferentes niveles de complejidad y fidelidad sigue siendo la más prometedora para las primeras tareas de diseño y optimización. Las fuerzas fluidodinámicas que actúan sobre un cuerpo sólido suelen expresarse como un producto de la velocidad, el tamaño del cuerpo, la densidad del fluido y un coeficiente. Por tanto, la resistencia al avance del buque suele expresarse como:

$$R_T = C_T \frac{\rho}{2} v_s^2 S$$

Donde: ρ es la densidad del agua, v_s es la velocidad del barco y S es la superficie mojada. El coeficiente C_T es el coeficiente de resistencia (total).

Siguiendo un enfoque clásico de la arquitectura naval, la resistencia suele descomponerse en componentes más simples que luego se superponen. Según la hipótesis de Froude, la resistencia total de un buque está formada por dos componentes, el rozamiento superficial y la resistencia residual:

$$R_T = R_{F0}(Re) + R_R(F_N)$$

Donde se supone que la primera parte (componente de fricción) depende sólo del número de Reynolds $Re = v_s L / \nu$, y la segunda parte (residual) sólo del número de Froude F_N , que se define como $F_N = \frac{v_s}{\sqrt{gL}}$. En las relaciones anteriores, ν denota la viscosidad cinemática del agua y L una longitud de referencia (normalmente la longitud del barco). Tanto el número de Reynolds como el número de Froude son parámetros principales resultantes de las leyes de similitud que son necesarias para escalar los resultados de las pruebas del modelo físico inicial (y todavía en uso) al buque a escala real. Mientras que el número de Reynolds se utiliza para escalar los efectos viscosos, que cambian con el tamaño, el número de Froude escala los efectos de la gravedad, que pueden determinarse simplemente utilizando el factor de escala. Aunque el método de Froude inicial incluye algunas deficiencias inherentes, con el tiempo se han desarrollado métodos más precisos que tienen en cuenta los efectos de presión relacionados con la viscosidad, incluidos inicialmente en la componente residual. Un enfoque conveniente es el método del factor de forma de Hughes-Prohaska o un factor de correlación específico a escala real que se utiliza en varias cuencas del modelo para los datos de predicción a escala real. Siguiendo el concepto de similitud, la mejor forma de expresarlos es mediante una formulación de coeficientes:

$$C_T = (1 + k)C_{F0} + C_R$$

Para el enfoque del factor de forma de Hughes-Prohaska, donde k es el factor de forma derivado de experimentos a muy baja velocidad, donde la resistencia residual tiende a cero, o de la predicción numérica de un modelo doble sumergido del casco, donde k

resultaría de la diferencia entre la resistencia total y la estimación de la fricción de la placa plana según $c_{FO} = 0,074 Re^{-1/5}$. El coeficiente de resistencia residual c_R puede tomarse de una prueba de modelo. El método alternativo utiliza un enfoque de factor de correlación:

$$c_T = c_{FO} + c_R + c_A$$

En la fórmula anterior, c_{FO} se basa en la fórmula de la Conferencia Internacional de Tanques de Remolque (ITTC 1957) $C_{FITTC} = \frac{0,075}{(\log Re - 2)^2}$ y debe predecirse para el buque y la escala del modelo, c_R es el coeficiente de resistencia residual tomado de las pruebas del modelo, y el coeficiente de tolerancia c_A se basa en la analítica de la cuenca del modelo. La forma de predecir el valor de c_A suele describirse en el informe de los ensayos con modelos.

2.1.2 Métodos empíricos

De acuerdo con Marzi & Broglia (2018), una vez establecida la predicción de la resistencia al rozamiento basada en la hipótesis de Froude o en mejoras posteriores, la tarea restante se centra en la predicción de la resistencia al oleaje, que es inherentemente una función de la forma del casco del buque. Esto ofrece la posibilidad de utilizar métodos de predicción más sencillos que la solución RANS completa mencionada anteriormente. Con el tiempo, han evolucionado numerosos métodos de predicción estadística. La mayoría de ellos se basan en el análisis de buques existentes y, por lo tanto, son inherentemente un reflejo de la época en que se desarrollaron. Esto es evidente si se comparan las formas de casco típicas en las que se basan dichos métodos. Un primer ejemplo es el método de la serie 60, que tiene su origen en los años 50. Este método se basa en formas de casco clásicas de la época que siguen una filosofía de diseño anterior a la guerra. Posteriormente, se han desarrollado otros métodos, por ejemplo, el de Guldhammer y Harvald en 1963, que se publicó una década después. A éste le siguió el método Holtrop-Mennen, aun ampliamente utilizado, que tiene su origen en 1982. Un método más reciente es el de Hollenbach en 1998, que desarrolló un método estadístico

para la predicción de la resistencia y la potencia de los buques de uno y dos husillos. Este último se basa, por supuesto, en las formas de casco más recientes y típicas y se utiliza ampliamente en la actualidad. La base común de todos los métodos abordados es, por supuesto, una evaluación estadística de un amplio conjunto de datos experimentales, disponibles en la literatura o en forma normalizada directamente desde una cuenca modelo.

2.1.3 Optimización basada en simulación y metamodelación adaptativa multifidelidad

Marzi & Broglia (2018) comentan que, en las últimas décadas, el proceso de diseño de sistemas complejos de ingeniería oceánica y, en particular, de los cascos de los buques, ha experimentado una mejora significativa, debido a la disponibilidad de sistemas informáticos de alto rendimiento (hardware) y de solucionadores precisos basados en la física (software). El tradicional y costoso procedimiento de construcción y prueba (inevitablemente asociado a un estudio paramétrico más que a un proceso real de optimización) ha sido sustituido por el enfoque más avanzado y flexible del diseño basado en la simulación (SBD), que integra simulaciones por ordenador, métodos de modificación del diseño y algoritmos de optimización. El SBD suele implementarse como un proceso iterativo que combina métodos de modificación del diseño, simulaciones numéricas y algoritmos de optimización para identificar nuevos diseños optimizados. Para lograr soluciones finales precisas, se necesitan solucionadores de alta fidelidad basados en la física (como los implementados para CFD, análisis estructural, etc.), lo que resulta en análisis computacionalmente costosos. Además, la integración de estos solvers con algoritmos de optimización (que pueden requerir un gran número de evaluaciones de funciones para converger a la solución final) hace que el coste computacional sea muy elevado y que el SBD sea un reto tecnológico. Para reducir el coste computacional del proceso de SBD, se han desarrollado métodos de metamodelado que se han aplicado con éxito en varios campos de la ingeniería. Además de los metamodelos, se han desarrollado

métodos de aproximación de fidelidad múltiple (o de fidelidad variable) con el objetivo de combinar hasta cierto punto la precisión de los solucionadores de alta fidelidad (HF) con el coste computacional de los solucionadores de baja fidelidad (LF). La combinación de los métodos de metamodelación con las aproximaciones de fidelidad múltiple puede conducir a una mayor reducción del coste computacional. Los métodos de corrección aditiva y/o multiplicativa pueden utilizarse para construir metamodelos de fidelidad múltiple, utilizando evaluaciones de alta y baja fidelidad. Las evaluaciones de alta y baja fidelidad pueden estar determinadas por el modelo físico, el tamaño de la malla computacional y/o la combinación de datos experimentales con simulaciones numéricas. Los metamodelos de fidelidad múltiple se han utilizado tanto para la optimización del diseño como para la cuantificación de la incertidumbre.

2.1.3.1 Hibridación local de algoritmos globales deterministas sin derivadas

Según Marzi & Broglia (2018), en el SBD, se resuelve un problema inverso, es decir, el resultado de la optimización del diseño es tal que minimiza el coste (definido por una función objetivo adecuada), dado un conjunto de especificaciones de diseño (es decir, funciones de restricción). En general, las funciones objetivo y de restricción suelen venir dadas por sistemas de ecuaciones diferenciales parciales, por lo que es probable que las funciones (que suelen calcularse mediante soluciones aproximadas adecuadas) se vean afectadas por los residuos, y sus derivadas no se proporcionan directamente. Además, no se puede excluir a priori la existencia de mínimos locales en el espacio de diseño. Por estas razones, se han desarrollado algoritmos de optimización global sin derivadas, que proporcionan una solución global aproximada al problema de diseño. La robustez y versatilidad de estos métodos han permitido su aplicación con éxito no sólo a la optimización del diseño, sino también a la identificación y predicción de sistemas hidrodinámicos complejos. Cuando se utilizan técnicas globales con solucionadores costosos en tiempo de CPU (para hidrodinámica, estructuras, etc.), el proceso de optimización es computacionalmente caro y su eficacia y eficiencia siguen siendo un reto algorítmico y tecnológico. Además, aunque los enfoques de optimización global son un

buen compromiso entre la exploración y la explotación del espacio de investigación, pueden quedar atrapados en mínimos locales y no se puede demostrar la convergencia al mínimo global. Si se conoce a priori la región de investigación que se va a explorar, los enfoques de optimización local pueden ofrecer una aproximación precisa al mínimo local. Sin embargo, su convergencia puede ser costosa desde el punto de vista informático y la información no suele estar disponible a priori. Por estos motivos, la hibridación de algoritmos de optimización global con métodos de búsqueda local se ha revelado como una alternativa interesante. Cabe destacar que una gran variedad de métodos globales y locales sin derivadas disponibles en la literatura son probabilísticos. Estos métodos hacen uso de coeficientes aleatorios y se han desarrollado con el objetivo de sostener la variedad de la búsqueda del óptimo. Esta propiedad implica que sólo se pueden obtener resultados estadísticamente significativos mediante extensas campañas numéricas. Este enfoque puede resultar demasiado caro (a menudo casi inasequible) en la optimización de SBD para aplicaciones industriales, cuando se utilizan directamente simulaciones informáticas costosas en tiempo de CPU como herramientas de análisis. Por esta razón, se han desarrollado y aplicado con éxito enfoques deterministas a la optimización de SBD, incluyendo problemas hidrodinámicos. Como ejemplo, se recuerdan brevemente cuatro algoritmos de optimización global e híbrida, global/local sin derivadas y se aplican a la optimización hidrodinámica del casco de un destructor de la clase USS Arleigh Burke, concretamente el modelo DTMB 5415. Se evalúa su rendimiento y se compara con el de los algoritmos originales. En concreto, dos algoritmos con enfoques de optimización global bien conocidos: (i) el algoritmo DIRECT y (ii) una versión determinista del método de optimización de enjambre de partículas (PSO) (DPSO).

Los otros dos algoritmos son técnicas híbridas globales/locales integradas en (i) y (ii), respectivamente. En concreto, un método híbrido DIRECT está acoplado a la optimización sin derivación basada en la búsqueda de líneas (DIRMIN-2) y un híbrido DPSO acoplado a la optimización sin derivación basada en la búsqueda de líneas (LS-DF_PSO).

Considerándose la siguiente función objetivo:

$$f(\alpha): \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}$$

y el problema de optimización global

$$\min_{\alpha \in \mathcal{L}} f(\alpha), \mathcal{L} \subset \mathbb{R}^N$$

donde $\alpha = \{\alpha_j\}$ es el vector de variables de diseño y \mathcal{L} es un subconjunto cerrado y acotado de \mathbb{R}^N , identificado aquí por los límites inferior (l_j) y superior (u_j) de cada variable de diseño $\{\alpha_j\}$. La minimización global de la función objetivo $f(\alpha)$ requiere encontrar un vector $a \in \mathcal{L}$ para que:

$$\forall b \in \mathcal{L}: f(a) \leq f(b)$$

Entonces, $\alpha=a$ es un mínimo global para la función $f(\alpha)$ sobre \mathcal{L} . Sin embargo, la identificación exacta de un mínimo global puede ser bastante complicada, por lo que las soluciones aproximadas proporcionadas por procedimientos heurísticos suelen considerarse aceptables para efectos prácticos. Aquí se muestran los algoritmos globales deterministas sin derivadas (DIRECT y DPSO) y sus hibridaciones globales/local (DIRMIN-2 y LS-DF_PSO).

2.1.3.2 El algoritmo DIRECT

De acuerdo con Marzi & Broglia (2018), DIRECT es un algoritmo de optimización global determinista sin derivadas y una modificación del método de optimización Lipschitziano. En este método, el dominio de búsqueda \mathcal{L} del problema se transforma en el hipercubo unitario D . Como primera conjetura, $f(\alpha)$ se evalúa en el centro (c) del hipercubo unitario; a continuación, el hipercubo se divide en un conjunto de hiperrectángulos más pequeños y $f(\alpha)$ se evalúa en sus centros (c). En la k -ésima iteración genérica del algoritmo, partiendo de la partición actual, se construye la nueva partición subdividiendo un conjunto de hiper-rectángulos prometedores de la anterior. La identificación de los hiper-rectángulos "potencialmente optimizados" se basa en alguna medida del propio hiper-rectángulo y en el valor de $f(\alpha)$ en su centro (c_i). El refinamiento de la partición continúa hasta que se haya realizado un número prescrito de evaluaciones

de la función o se cumpla otro criterio de parada. El mínimo de $f(\alpha)$ sobre todos los centros de la partición final, y los centros correspondientes, proporcionan una solución aproximada al problema.

2.1.3.3 Hibridación local del algoritmo DIRECT: DIRMIN-2

De acuerdo con Serani et al (2016), el DIRMIN-2 es una hibridación global/local del algoritmo DIRECT y una variante de DIRMIN. A diferencia de DIRMIN, que realiza tantas búsquedas locales como el número de hiper-rectángulos potencialmente optimizados identificados, DIRMIN-2 realiza una única minimización local sin derivadas por iteración, partiendo del mejor punto producido al dividir los hiper-rectángulos potencialmente optimizados. La minimización local de DIRMIN-2 se utiliza cuando el número de evaluaciones de la función alcanza el activador $\gamma \in (0, 1)$, una proporción del número máximo de evaluaciones de la función ($N_{f_{max}}$). La minimización local continúa hasta que el número de evaluaciones de la función supera $N_{f_{max}}$ o el tamaño del paso cae por debajo de una tolerancia determinada.

2.1.3.4 El algoritmo DPSO

De acuerdo con Serani et al (2016), la optimización por enjambre de partículas, conocida por PSO, pertenece a la clase de algoritmos heurísticos para la optimización global libre de derivadas de un solo objetivo. Con el fin de hacer que PSO sea más eficiente para su uso dentro de SBD, se formuló una versión determinista del algoritmo (DPSO) como:

$$\begin{cases} v_i^{n+1} = \chi[v_i^n + c_1[p_i - x_i^n] + c_2(g - x_i^n)] \\ x_i^{n+1} = x_i^n + v_i^{n+1} \end{cases}$$

Las ecuaciones anteriores actualizan la velocidad v_i^n y la posición x_i^n de la i -ésima partícula en la k -ésima iteración, donde χ es el factor de constricción, c_1 y c_2 son la tasa de aprendizaje cognitivo y social; p_i y g son el atractor cognitivo y social (definidos en el espacio variable). En concreto, p_i es la mejor posición encontrada por la i -ésima partícula,

mientras que g es la mejor posición encontrada por todo el enjambre. Se utiliza la configuración: número de partículas (N_p) igual a 4, inicializadas mediante una secuencia de muestreo sobre el dominio variable y la frontera con velocidad inicial no nula. Los coeficientes se fijan como $\chi = 0,721$ y $c_1 = c_2 = 1,655$.

2.1.3.5 Hibridación local del algoritmo DPSO: LS-DF_PSO

De acuerdo con Serani et al (2016), las propiedades de convergencia global de un esquema PSO modificado pueden obtenerse combinando adecuadamente el PSO con un método libre de derivadas basado en la búsqueda de líneas, de forma que se pueda forzar la convergencia a puntos estacionarios a un coste razonable. Se proporciona un método robusto para forzar la convergencia de una subsecuencia de puntos hacia un punto estacionario, que satisface las condiciones de optimización de primer orden para la función objetivo. El método LS-DF_PSO parte de acoplar el esquema DPSO con un método basado en la búsqueda de líneas. En concreto, se utiliza un conjunto de spanning positivo, donde el conjunto de direcciones de búsqueda (D) está definido por los vectores unitarios $\pm e_i, 1, \dots, n$, tal y como se muestra en la siguiente ecuación (es decir, $n=2$):

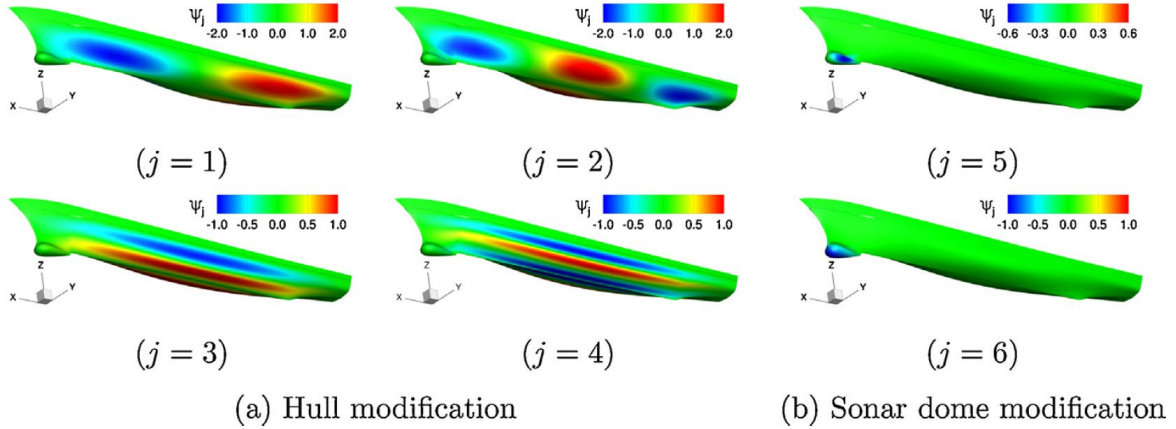
$$D = \left\{ \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}$$

Después de cada iteración DPSO, se realiza la búsqueda local si el enjambre no ha encontrado un nuevo mínimo global. El tamaño del paso inicial (ζ_k) para la búsqueda local se establece igual a 0,25 veces el rango de dominio variable, y se reduce en $\vartheta=0,5$ en cada iteración de búsqueda local. Las búsquedas locales continúan en cada dirección hasta que el tamaño del paso es mayor que $\mu=10^{-3}$. Si la búsqueda local se detiene sin proporcionar un nuevo mínimo global, el mínimo global actual se declara como un punto estacionario. El método de búsqueda lineal no puede violar las restricciones de caja.

La aplicación del SBD que se muestra como ejemplo es la optimización hidrodinámica de la forma del casco del modelo DTMB 5415 (Figura 2.2).

Figura 2.2

Funciones ortonormales $\Psi_j(\xi, \eta)$



Nota: fuente Serani et al (2016)

Aquí, una optimización de un solo objetivo de velocidad tiene como objetivo la reducción de la resistencia total en aguas tranquilas a 18 nudos, lo que corresponde a un número de Froude $F_N = 0,25$. El barco está libre de hundirse y trimarse. Se utiliza una expansión de funciones de base ortogonal para la modificación de la forma del casco y la cúpula del sonar. Las restricciones geométricas incluyen una longitud fija entre perpendiculares (LBP) y un desplazamiento fijo (Δ), con una viga (B) y un calado (T) que varían entre $\pm 5\%$ del casco original. Las LBP y Δ se satisfacen mediante un escalado geométrico automático, mientras que las restricciones para B y T se manejan mediante un método de función de penalización lineal. La modificación de la forma δ_s se define utilizando $N=6$ funciones base ortonormales de coordenadas curvilíneas ξ y η sobre el semicasco:

$$\delta_s(\xi, \eta) = \sum_{j=1}^N \alpha_j \psi_j(\xi, \eta)$$

Donde: $\alpha_j \in \mathbb{R}, j = 1, \dots, N$ son las variables de diseño, y la siguiente ecuación.

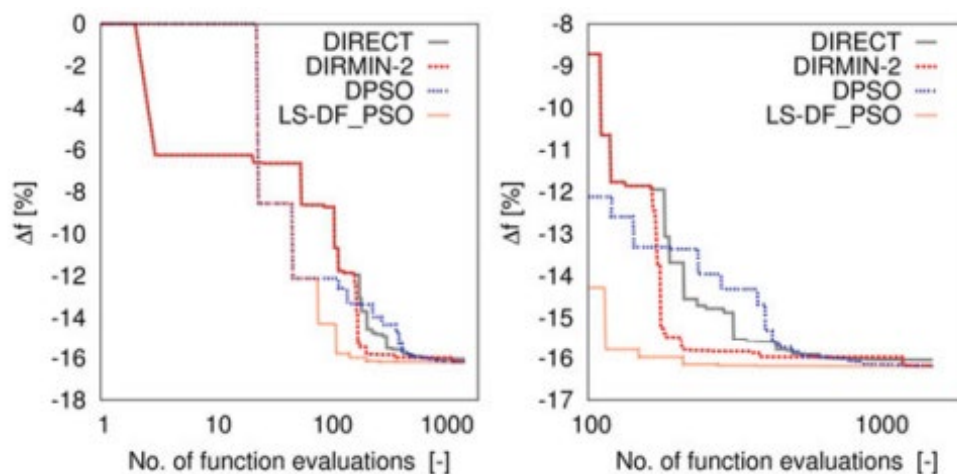
$$\Psi_j(\xi, \eta): S = [0, L_\xi] \times [0, L_\eta] \in \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3, j = 1, \dots, N$$

$$\int \int \psi_i(\xi, \eta) \cdot \psi_j(\xi, \eta) d\xi d\eta = \delta_{ij}$$

Para el casco se utilizan cuatro funciones y variables de diseño, mientras que para la cúpula del sonar se utilizan dos funciones/variables. Las funciones base correspondientes se muestran en la Figura 2.2 Las simulaciones se realizan con la herramienta hidrodinámica WARP. Para el proceso de optimización de la forma del casco, se establece un límite al número de evaluaciones de la función igual a 1.536, es decir, 256. El ejercicio de optimización se ha realizado para: (i) un número bajo de evaluaciones de funciones (192) (que corresponde a 32, un octavo del presupuesto completo) y (ii) para el presupuesto completo de 1.536 (ver Figura 2.4) evaluaciones de funciones (que corresponde a 256). Para el caso (i), el procedimiento de optimización consigue una reducción de la resistencia del 13,7 y 15,5% utilizando DIRECT y DIRMIN-2, respectivamente, y una reducción del 13,5 y 16,0% utilizando DPSO y LS-DF_PSO, respectivamente. Los dos algoritmos híbridos global/local superan a su versión global. En particular, LS-DF_PSO resulta ser el algoritmo más eficiente para el presente problema de SBD, logrando el mejor diseño con la tasa de convergencia más rápida. Para el caso (ii), el procedimiento de optimización consigue una reducción de la resistencia del 16,0 y 16,2% utilizando DIRECT y DIRMIN-2, respectivamente, y una reducción del 16,2% utilizando tanto DPSO como LS-DF_PSO.

Figura 2.3

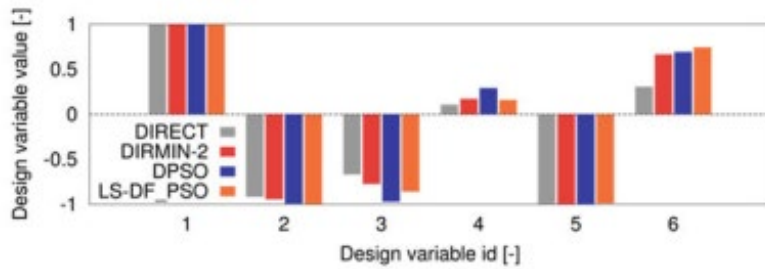
Historial de convergencia de la función objetivo (izquierda) y detalle tras las 100 primeras evaluaciones de la función (derecha)



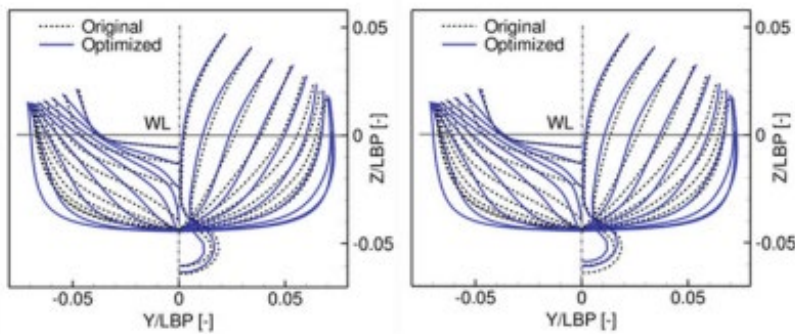
Nota: fuente Serani et al (2016)

Figura 2.4

El resultado de la optimización tras 1.536 evaluaciones de la función.

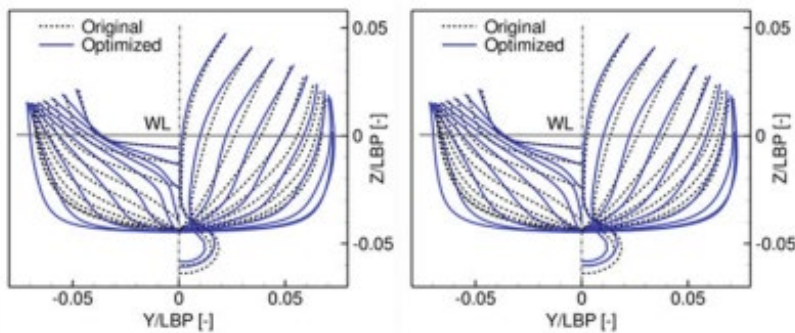


(a) Objective function convergence of optimised design variables



(b) DIRECT

(c) DIRMIN-2



(d) DPSO

(e) LS-PS_PSO

Nota: fuente Serani et al (2016)

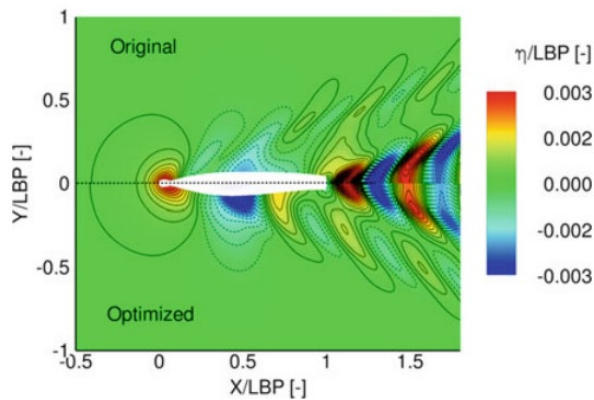
El historial de convergencia de la función objetivo hacia el mínimo se muestra en la Figura 2.3, lo que confirma la eficacia y la solidez de los dos enfoques híbridos global/local DIRMIN-2 y LS-DF_PSO. Más en detalle, LS-DF_PSO consigue la reducción más significativa de la función objetivo en general, aunque todas las soluciones están muy cerca unas de otras. La Figura 2.4 presenta los valores de las correspondientes variables de diseño optimizadas y muestra las formas optimizadas en comparación con las originales.

2.1.3.6 Hibridación local del algoritmo DPSO: LS-DF_PSO

Según Marzi & Broglia (2018), en el metamodelo adaptativo de multifidelidad, la aproximación de multifidelidad se construye como la suma de un metamodelo entrenado de baja fidelidad y el metamodelo de la diferencia (error) entre las simulaciones de alta y baja fidelidad, es decir, el modelo de alta fidelidad se utiliza para mejorar la precisión de la predicción de baja fidelidad. El uso de un metamodelo permite tanto reducir las estimaciones de baja y/o alta fidelidad como proporcionar la evaluación de la incertidumbre requerida que guía la necesidad de un nuevo elemento de baja o alta fidelidad del conjunto de entrenamiento. Ver resultados de la optimización en la Figura 2.5.

Figura 2.5

Resultado de la optimización después de 1.536 evaluaciones de funciones.



Nota: fuente Marzi & Broglia (2018)

Considerándose una función objetivo $f(x)$, donde $x \in R^N$ es el vector de la variable de diseño. El metamodelo de multifidelidad asociado $\hat{f}(x)$ se define como:

$$\hat{f}(x) = \hat{f}_L(x) + \varepsilon(x)$$

$$\varepsilon(x) = f_H(x) - f_L(x)$$

donde el superíndice (\sim) denota la predicción mediante un metamodelo adecuado, como por ejemplo la función de base radial estocástica, y $\varepsilon(x)$ es la diferencia (error) entre las simulaciones de alta y baja fidelidad (f_L y f_H , respectivamente). El conjunto de entrenamiento para \hat{f}_L se denota por \mathcal{L} , mientras que el conjunto de entrenamiento para ε

se denota por ε . Hay que tener en cuenta que por definición de $\tilde{\varepsilon}$, es $\varepsilon \subseteq \mathcal{L}$. Denotando con $U_{\tilde{f}_L}$ y $U_{\tilde{\varepsilon}}$ la incertidumbre de predicción de \tilde{f}_L y $\tilde{\varepsilon}$, respectivamente, bajo el supuesto de incertidumbres no correlacionadas, la incertidumbre asociada a $\hat{f}(x)$ es $U_{\hat{f}} = \sqrt{U_{\tilde{f}_L}^2 + U_{\tilde{\varepsilon}}^2}$. A continuación, se añaden nuevas evaluaciones al conjunto de entrenamiento basadas en el siguiente problema de maximización de $U_{\hat{f}}$:

$$x^* = \arg \max_x [U_{\hat{f}}[x]]$$

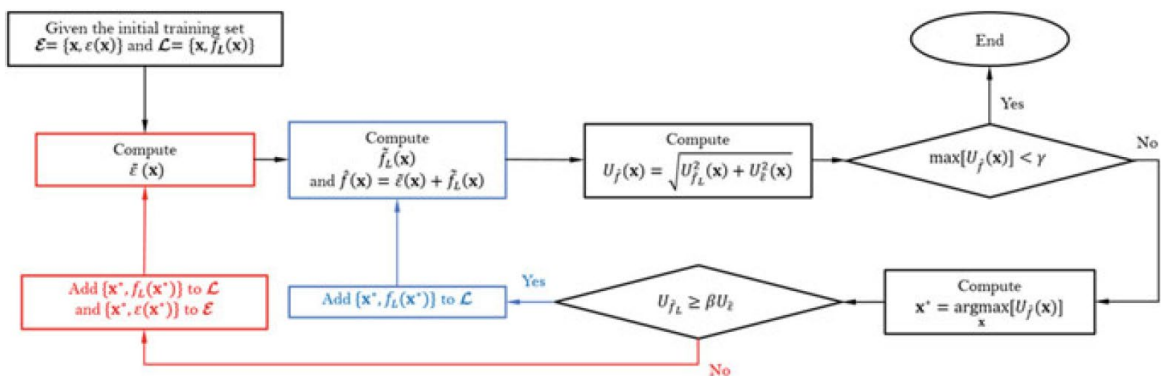
Una vez encontrado x^* , los conjuntos de entrenamiento \mathcal{L} y/o ε se actualizan como:

$$\begin{cases} \text{Si } U_{\tilde{f}}(x^*) \geq \beta U_{\varepsilon}(x^*) \text{ se añade } \{x^*, f_L(x^*)\} \text{ a } \mathcal{L} \\ \text{se añade } \{x^*, f_L(x^*)\} \text{ a } \mathcal{L} \text{ y } \{x^*, \varepsilon(x^*)\} \text{ a } \varepsilon \end{cases}$$

donde $\beta \in [0, 1]$ es un parámetro de ajuste arbitrario que tiene en cuenta la relación de costes de cálculo entre la estimación de baja y alta fidelidad. Hay que tener en cuenta que la estimación de alta fidelidad sólo es necesaria en el segundo caso. El esquema del procedimiento de muestreo se presenta en la Figura 2.6.

Figura 2.6

Metamodelo de multifidelidad, procedimiento de muestreo adaptativo.



Nota: fuente Marzi & Broglia (2018)

Para la optimización multiobjetivo final se utiliza una formulación híbrida global/local de la PSO determinista multiobjetivo combinada con un algoritmo local del tipo de búsqueda lineal sin derivadas (es decir, la solución de la ecuación). El algoritmo híbrido multiobjetivo determinista global/local (MODHA, Pellegrini et al. 2017b) combina una

formulación PSO determinista multiobjetivo (MODPSO) y un algoritmo de optimización local multiobjetivo sin derivadas (DFMO).

La formulación MODPSO es la siguiente:

$$\begin{cases} v_i^{n+1} = x[v_i^n + C_1(P_i - x_i^n) + C_2(g_j - x_i^n)] \\ x_i^{n+1} = x_i^n + v_i^{n+1} \end{cases}$$

donde P_i es el minimizador personal de la función objetivo agregada $F(x_i) = \sum_{m=1}^M f_m(x_i)$ y g_i es el punto más cercano a la i -ésima partícula del conjunto de soluciones no dominadas S en la n -ésima iteración (S^n). DFMO es un algoritmo sin derivadas para problemas multiobjetivo restringidos no lisos; incorpora un enfoque de búsqueda lineal que tiene en cuenta la presencia de múltiples objetivos. En cada iteración, la aptitud de S^n se evalúa en términos de convergencia y agrupación de $s \in S^n$ a través de la métrica del hipervolumen (Diez et al. 2015). La búsqueda local se inicia si el valor del hipervolumen en la n -ésima iteración no mejora en un factor ϑ respecto a la iteración anterior. DFMO se inicia desde todos los puntos de S^n , con un presupuesto de ηN_p evaluaciones. El número de partículas para MODPSO se fija en 8, inicializadas mediante una secuencia Hammersley de muestreo sobre dominio y frontera variable con velocidad inicial no nula. Los coeficientes de MODPSO se fijan como para el DPSO. Los parámetros MODHA se fijan como $\vartheta = 1,0$ y $\eta = 10$. El número de evaluaciones del problema, donde una evaluación del problema implica una evaluación de cada función objetivo, se establece igual a 2.000.

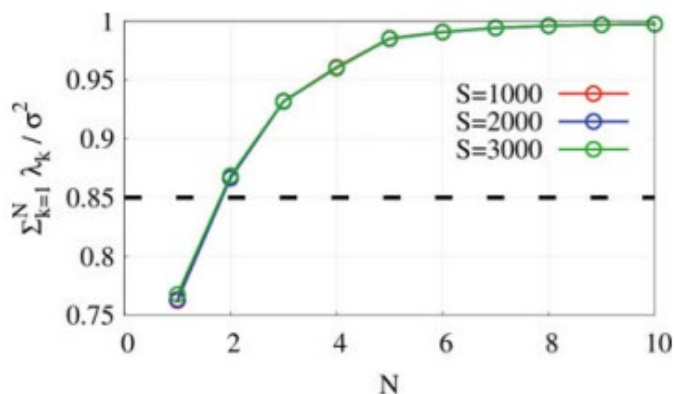
Como ejemplo del algoritmo descrito anteriormente, se informa aquí de la optimización de la forma del casco de un casco gemelo de área de agua pequeña (SWATH) para la reducción de la resistencia y el aumento de la carga útil. El metamodelo adaptativo de fidelidad múltiple considera la herramienta RANSE de Xnavis y el solucionador de flujo potencial WARP como los solucionadores de alta y baja fidelidad, respectivamente. La geometría paramétrica del SWATH se produce con el entorno de diseño asistido por ordenador (CAD) integrado en el software CAESSES®, desarrollado por FRIENDSHIP SYSTEMS. Se han utilizado 27 variables de diseño; los parámetros geométricos

significativos controlados por las variables de diseño son la longitud total, la holgura de los puntales, la curvatura de la nariz del torpedo y el diámetro del torpedo. La distancia entre ejes se mantiene constante. En el presente trabajo, se ha utilizado el motor Sobol disponible en CAESES® para producir variaciones pseudoaleatorias de los 27 parámetros geométricos, proporcionando una distribución uniforme de los parámetros del espacio de diseño original.

Se realiza una reducción de la dimensionalidad del espacio de diseño del modelo paramétrico mediante la expansión de Karhunen-Loève. Se produce un número de $S=3.000$ diseños aleatorios asumiendo una distribución uniforme.

Figura 2.7

Varianza normalizada resuelta por un espacio de dimensionalidad reducida de dimensión N (suma acumulada de valores KLE)



Nota: fuente Marzi & Broglia (2018)

La Figura 2.7 muestra los resultados de KLE en términos de variabilidad del diseño asociado a un espacio de dimensionalidad reducida de dimensión N para $S=1.000$, 2.000 y 3.000 muestras. Los resultados son convergentes frente a S . El número de variables de diseño se reduce a $N=2$, conservando el 85% de la variabilidad original. Los modos KLE correspondientes se muestran en la Figura 2.8 por Componentes x , y y z . Cabe destacar que cada fila de la figura representa modificaciones simultáneas de la forma por una (nueva) variable de diseño. Ambos modos están dominados por el componente x del vector de modificación de la forma. Para la optimización multiobjetivo final se utiliza el algoritmo

determinista híbrido global/local descrito anteriormente. El problema de optimización aborda la minimización de la resistencia hidrodinámica y la maximización del desplazamiento (carga útil) a la velocidad de servicio, correspondiente a $F_N=0,489$. La optimización se formula mediante dos problemas (alternativos). El problema 1 aborda la minimización de la resistencia hidrodinámica (RT) y la maximización del desplazamiento (Δ), sujeto a una restricción para el área mínima del plano de agua, es decir:

$$\text{Minimiza } \{\Delta R_T(x), -\Delta \nabla(x)\}^T \text{ con } x \in D \subset \mathbb{R}^N$$

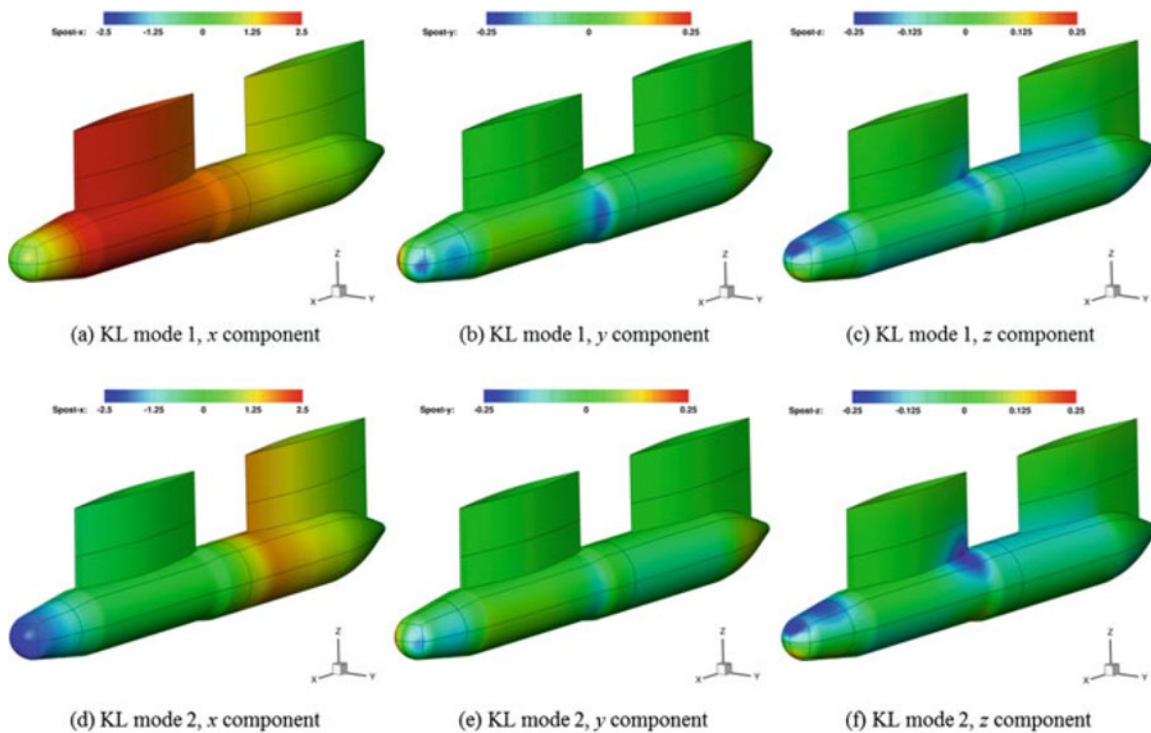
$$\text{con respecto a } \frac{L_{OA}(x)}{L_{OAmax}} - 1 \leq 0$$

$$\text{y para } -\Delta A_{WP}(x) \leq 0$$

$$\text{y para } x_1 \leq x \leq x_u$$

Figura 2.8

Los dos primeros modos KLE mostrados por los componentes x, y y z de SWATH.



Nota: fuente Marzi & Broglia (2018)

El problema 2 aborda la minimización de la resistencia hidrodinámica y la maximización del área del plano de flotación, sujeto a una restricción para el desplazamiento mínimo, es decir

$$\text{Minimiza } \{\Delta R_T(x), -\Delta A_{wp}(x)\}^T \text{ con } x \in D \subset \mathbb{R}^N$$

$$\text{con respecto a } \frac{L_{OA}(x)}{L_{OAmax}} - 1 \leq 0$$

$$\text{y para } -\Delta \nabla(x) \leq 0$$

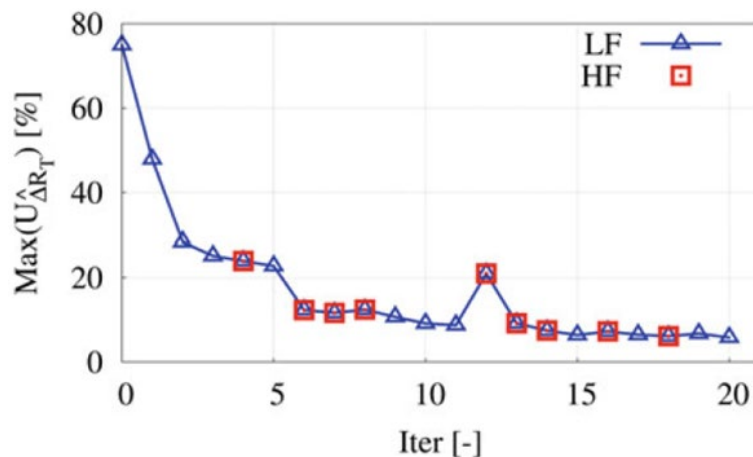
$$\text{y para } x_1 \leq x \leq x_u$$

donde $\Delta(\cdot)$ indica la variación con respecto al casco original y LOA, max es la máxima eslora total permitida.

El entrenamiento del metamodelo se basa únicamente en el cálculo de la resistencia hidrodinámica. Se utiliza un subconjunto de valores del análisis de sensibilidad como conjunto de entrenamiento inicial para el AMFM, lo que da lugar a cinco evaluaciones de alta y cinco de baja fidelidad. Se establece un valor de convergencia (γ) para la incertidumbre máxima de la predicción $\max[U\Delta\tilde{R}_T]$ igual al 5% del rango de la función calculado en la iteración inicial. Se utiliza un número máximo de 20 iteraciones para el procedimiento de muestreo adaptativo.

Figura 2.9

Incertidumbre global máxima en función del número de iteraciones.

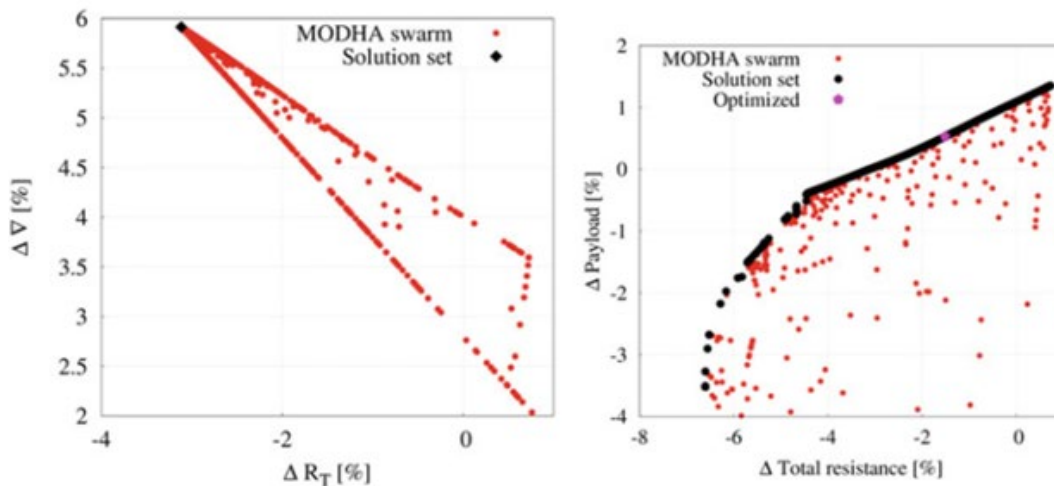


Nota: fuente Marzi & Broglia (2018)

La Figura 2.9 muestra la convergencia de $\max [U\Delta\bar{R}_T]$ así como las evaluaciones HF y LF, frente al número de iteraciones AMFM. Cabe destacar que, para las primeras cuatro iteraciones, las evaluaciones LF son capaces de reducir significativamente la incertidumbre máxima. En la duodécima iteración, la incertidumbre máxima aumenta porque la evaluación HF cambia significativamente el entrenamiento del metamodelo y la predicción asociada. Finalmente, el AMFM se entrena con 14 evaluaciones HF y 25 LF. Después de 20 iteraciones, la incertidumbre global máxima es inferior al 6%, cerca del valor deseado del 5%.

Figura 2.10

Conjunto de soluciones no dominadas para los problemas 1 y 2.



Nota: fuente Marzi & Broglia (2018)

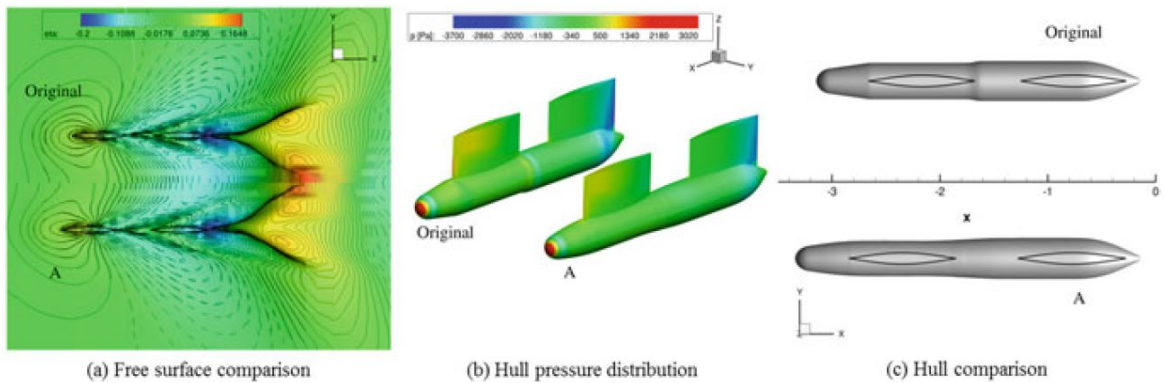
La Figura 2.10 (izquierda) muestra el conjunto de soluciones no dominadas del problema 1. Este se reduce a un único punto, lo que demuestra que los dos objetivos son concurrentes. La solución se denomina en lo sucesivo solución **A**. La Figura 2.10 (derecha) muestra el conjunto de soluciones no dominadas del problema 2. Con el fin de identificar una buena solución candidata para la verificación de la predicción del metamodelo, se selecciona la solución **B**.

Las Figuras 2.11 y 2.12 muestran la comparación del casco original con **A** y **B**, respectivamente. La elevación de la superficie libre de **A** y **B** es ligeramente inferior a la del original. Tanto **A** como **B** muestran un gradiente de presión en el casco menor que el

original y una mayor presión en el borde de ataque de la parte delantera. Las figuras también muestran una comparación geométrica de **A** y **B** con el casco original, respectivamente. Ambos cascos optimizados son más largos que el original. Además, **B** muestra un puntal trasero más largo, lo que produce el aumento de la A_{WP} . Por último, la Figura 2.13 destaca la diferencia entre **A** y **B**. **B** tiene un morro de torpedo más corto que **A**, mientras que el puntal trasero es más largo. Cabe destacar que la diferencia entre los dos cascos se debe al segundo modo KLE.

Figura 2.11

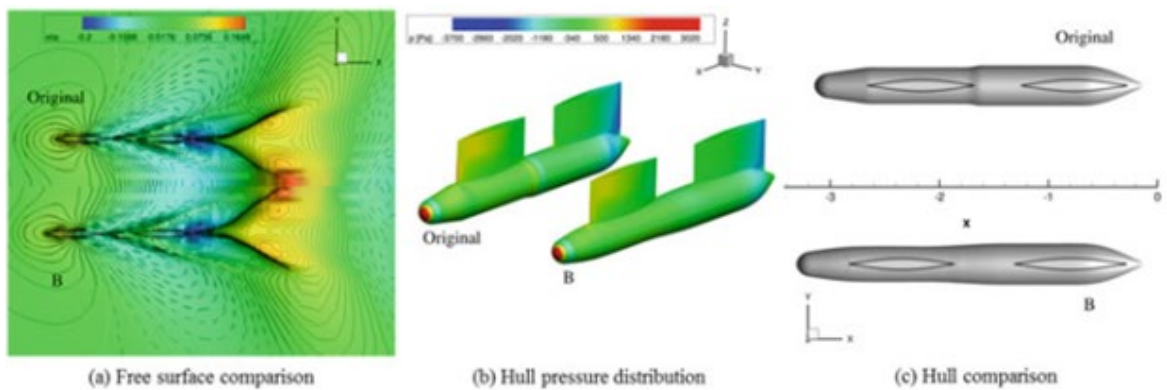
Comparación de cascos para el problema 1 de SWATH.



Nota: fuente Marzi & Broglia (2018)

Figura 2.12

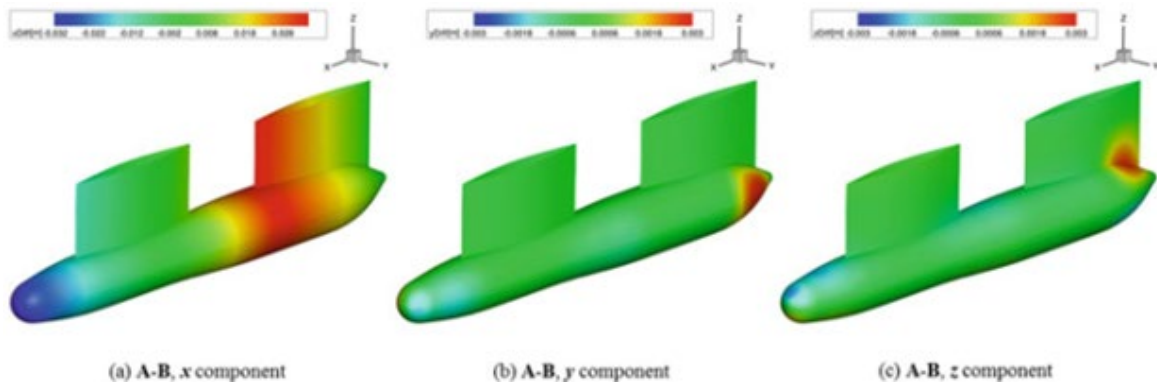
Comparación de cascos para el problema 2 de SWATH.



Nota: fuente Marzi & Broglia (2018)

Figura 2.13

Comparación del casco entre la solución A y B de SWATH.



Nota: fuente Marzi & Broglia (2018)

La Tabla 2.1 resume la comparación entre la predicción del metamodelo y la evaluación real de RaNSE del ΔR_T , mostrando una notable concordancia.

Tabla 2.1

Comparación entre la predicción del metamodelo y la evaluación real del HF.

Solution	AMFM	HF	Geometric constrains			KLE variable value	
	$\Delta R_T(\%)$	$\Delta R_T(\%)$	ΔV	$\Delta A_{WP}(\%)$	$\Delta L_{OA}(\%)$	X_1	X_1
A	-3,12	-3.21	5,92%	0,00	-1,57	0,00	0,493
B	-1,51	-1,61	4,945	0,55	-2,56	0,00	0,290

Nota: fuente Marzi & Broglia (2018)

2.1.4 Funcionalidad intrínseca de la CAESES

De acuerdo con Harries & Abt (2018), CAESES® adopta un enfoque diferente al de otros entornos PIDO. No sólo proporciona varios mecanismos de acoplamiento y una amplia gama de estrategias de optimización, sino que también ofrece CAD paramétrico para modelos robustos de geometría variable. La funcionalidad general se resume en la Figura 2.14 (cuadros verdes con componentes azules).

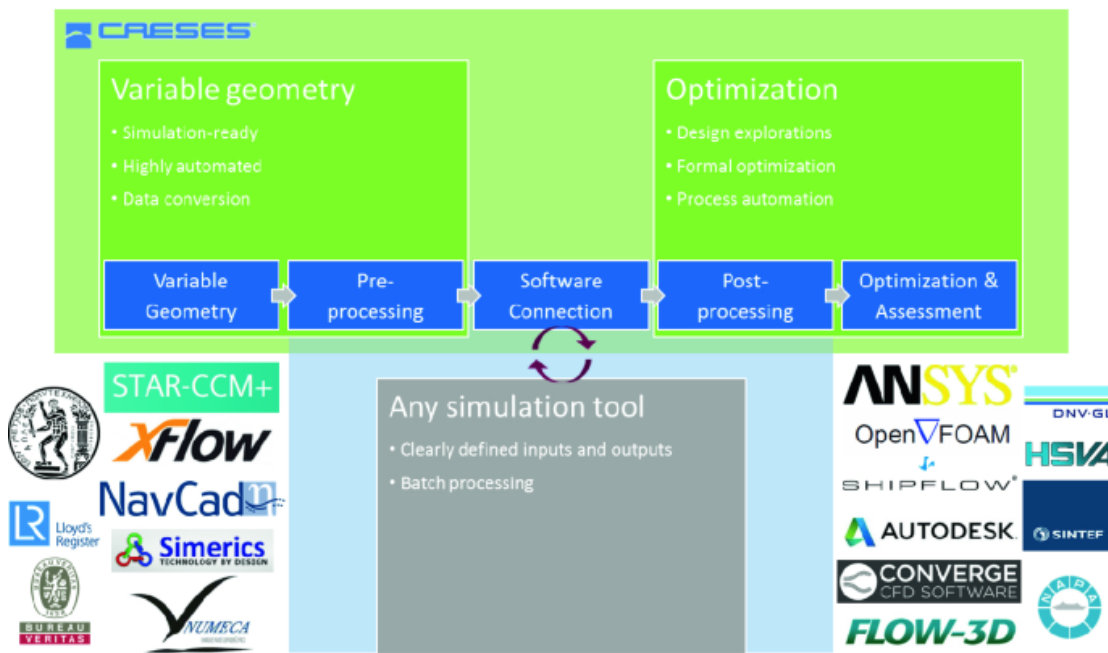
Desarrollado, originalmente, para simulación de formas funcionales, ha demostrado el CAESES® capacidad para procesos fluidodinámicos, vale decir, formas complejas como los apéndices de los barcos, el caso del bulbo, entre otras partes importantes como la

hélice, parte del sistema de propulsión, entre otros casos. Siendo un proceso típico de diseño y optimización, se reúnen varios componentes (los llamados cinco grandes de CAESES®):

1. Geometría variable: Se desarrolla un modelo paramétrico y se crea una variante de forma como instancia del conjunto de parámetros elegido.
2. Preprocesamiento: La variante es preprocesada para permitir la realización de la(s) simulación(es).
3. Simulación(es): Para todas las variantes de interés, se realizan una o varias simulaciones.
4. Post-procesamiento: Las variantes y sus datos son post-procesados (por ejemplo, la visualización de los campos de flujo para la comparación).
5. Optimización y evaluación: Las variantes se producen y evalúan de acuerdo con la estrategia de optimización seleccionada (por ejemplo, Sobol,MOGA), repitiendo la secuencia desde la geometría variable hasta el post-procesamiento una y otra vez.

Figura 2.14

Visión general de la funcionalidad de CAESES® junto con una selección de sistemas de software frecuentemente acoplados y proveedores de herramientas y sistemas del consorcio HOLISHIP.



Nota: fuente Harries & Abt (2019)

2.1.4.1 Enfoque de integración adoptado en HOLISHIP sobre la base de la CAESES

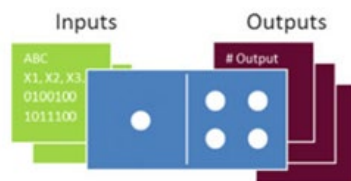
De acuerdo con Harries & Abt (2018), es posible que las herramientas de análisis y simulación se ejecuten por lotes, los cálculos de forma interactiva dentro de una interfaz gráfica de usuario (GUI) específica. Los datos de entrada necesarios se almacenan fácilmente o pueden registrarse en un conjunto de archivos de entrada incluyendo configuraciones, características y geometrías. Lo relevante es que los resultados intermedios se almacenan en los archivos de salida para una ejecución posterior en modo batch, utilizando los mismos datos de entrega.

Figura 2.15

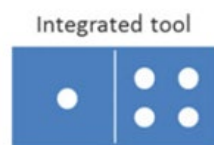
Envoltura de herramientas a través de sus archivos de entrada y salida en CAESES®.



(A) Standard tool execution: Tool is run interactively (GUI) or in batch-mode



(B) Tool can be run in batch-mode on the basis of interactive work (e.g. using recorded input)



(C) Integrated tool with input file(s) and output files(s) encapsulated (i.e., inputs and outputs are taken care of by CAESES®)

Nota: fuente Harries & Abt (2018)

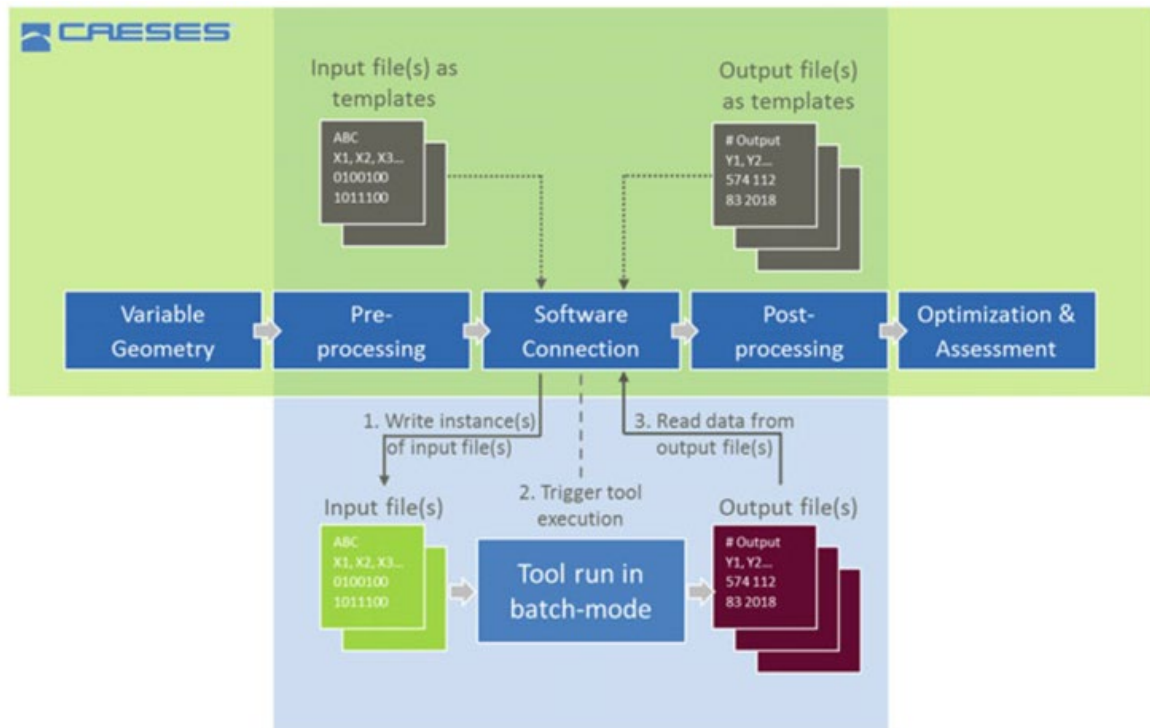
Sin embargo, si hubiera una modificación de un dato de entrada, la salida también sería diferente. La entrada y salida de datos junto con su encapsulación se muestran en la Figura 2.15. Dentro de CAESES®, cada herramienta que puede ser ejecutada en modo batch y enlazada a las entradas y salidas, bajo una etiqueta, es sustituido por un valor diferente o de forma completa. Esto se hace a menudo en el caso de los archivos de

geometría, por ejemplo, al cambio de todas las posiciones de los vértices de una representación NURBS en un archivo iges. Además, cualquier elemento de datos de un archivo de salida puede identificarse y leerse para su uso posterior.

Para establecer la integración, todos los archivos de entrada y de salida se dan a conocer a CAESES®. Se utilizan como plantillas, lo que significa que sólo hay que sustituir y recuperar un pequeño número de datos, respectivamente, mientras que la mayoría de los datos se mantienen tal cual, lo que hace que las integraciones sean ligeras y flexibles. Los elementos de datos no modificados constituyen la entrada y la información de fondo para el análisis y se consideran constantes para una tarea de diseño concreta. Hay que tener en cuenta que sólo se gestionan los elementos de datos que se modificarán, que son necesarios para el propio diseño y/o que se pasarán a otra herramienta. La Figura 2.16 ilustra el uso de plantillas y el flujo de datos.

Figura 2.16

Conexión de herramientas dentro de CAESES® a través de archivos de plantilla como parte de una cadena de procesos.



Nota: fuente Harries & Abt (2018)

2.1.4.2 Modelización geométrica

De acuerdo con Harries & Abt (2018), la geometría es fundamental para optimizar un diseño especialmente en buques y plataformas marinas, pues estos tienen como objetivo aprovechar la mayor capacidad de carga permitida con el menor consumo de energía posible, lo que conlleva a evaluar el comportamiento del buque en una determinada condición de mar, así como manejar la seguridad, comodidad, entre otros factores. Dada las formas curvas, complejas del buque, en un principio puede manejarse la geometría en modo batch acoplándose al CAESES®, con una exportación de datos geométricos en formatos estándar (por ejemplo, el iges), como medida (archivos de paneles y de offset), CAESES® puede utilizarse tanto como plataforma para la integración como motor CAD principal.

La geometría pueda variarse con eficacia y calidad, haciendo mayor eficiente el esfuerzo de una actualización de la geometría (que lleve segundos en vez de una hora), dando un entorno interactivo del modelado para un pequeño conjunto de parámetros factibles de control de geometría ahorrando tiempo en la simulación. Existen dos enfoques distintivos que CAESES® admite tanto por separado como en combinación (dando lugar a modelos híbridos):

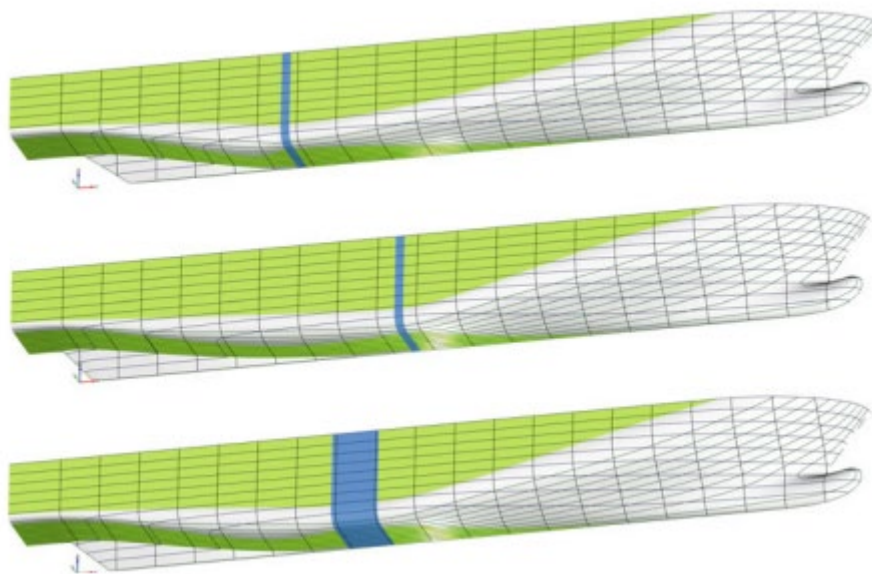
- Modelado totalmente paramétrico (FPM) y
- Modelado parcialmente paramétrico (PPM)

El primero aplica un modelo jerárquico construido desde cero en el que cualquier variante constituye una instancia relacionada con los valores de los parámetros elegidos, mientras que el segundo toma un modelo CAD existente y (sólo) lo modifica paramétricamente. El más potente de los dos enfoques es el modelado totalmente paramétrico, ya que puede comprender y combinar expresiones matemáticas, cláusulas if-then, dependencias en cascada, todas las entidades de curva y superficie posibles, optimizaciones internas (por ejemplo, para capturar las restricciones de igualdad), operaciones booleanas, etc. El modelado parcialmente paramétrico es más fácil y rápido de realizar. Se toma como punto de partida una línea de base existente, es decir, un

modelo CAD que suele denominarse geometría "muerta" y que puede proceder de cualquier herramienta CAD. A continuación, se imponen una serie de transformaciones a la línea de base, que conducen a variantes que presentan una nueva geometría para la topología inicial. El escalado sería la transformación PPM más trivial, pero muy consecuente. Un método destacado con raíces en la animación y los juegos es la deformación de forma libre (FFD). En la arquitectura naval, el desplazamiento de Lackenby es un representante popular de PPM en el que un balanceo concertado de las secciones permite la entrada y la salida del volumen de desplazamiento de un buque. Las modificaciones parcialmente paramétricas pueden limitarse a ciertas partes de la geometría y, lo que es más importante, en CAESSES® pueden concatenarse varias transformaciones. Sin embargo, la esencia y la topología de la línea de base siempre permanecen.

Figura 2.17

Cambio de posición y longitud del cuerpo medio paralelo.



Nota: fuente Harries & Abt (2018)

2.2 MARCO CONCEPTUAL

2.2.1 Simulación numérica

Según Laín (2014), la simulación numérica es una herramienta importante y difundida en el campo de la investigación para evaluar el diseño de productos, la predicción

y optimización de procesos técnicos e industriales, entre otras utilidades en que integra las herramientas matemáticas para modelar, simular, o predecir el comportamiento de productos o procesos.

2.2.2 Parametrización

La parametrización es utilizar parámetros o variables que describan un objeto para que pueda ser alterado por una ecuación o sistema de ecuaciones. Este método es útil para definir las formas y estructuras complejas de buques.

2.2.3 Casco

En la embarcación, el casco representa la estructura interna compuesta por elementos primarios y secundarios como la quilla, cuadernas, varengas, vagnas, baos, el forro exterior y la cubierta. (también conocido como la estructura del buque)

2.2.4 CFD (Computational Fluid Dynamics)

Según Norton (2006), la dinámica de fluidos computacional (en sus siglas en inglés CFD) es una potente herramienta numérica con una alta difusión y utilización para simular procesos sencillos a complejos en diferentes industrias. Los recientes avances en la eficacia de la computación, junto con la reducción de los costes de los paquetes de software de CFD, han hecho avanzar la CFD como una técnica viable para proporcionar soluciones de diseño eficaces y eficientes.

2.2.5 Optimización

Según Thévenin (2008), la optimización es el diseño y el funcionamiento de un sistema o proceso para que sea lo mejor posible en algún sentido definido.

2.2.6 Resistencia al avance

Según Huenante (2018), la resistencia al avance es definida como el conjunto de fuerzas que se opone al avance de un buque a una dada velocidad constante, y ésta tiene relación directa con la velocidad del buque y su forma.

2.2.7 Bulbo

El bulbo es un apéndice como una protuberancia encontrada en las proas o popas de una embarcación. Es habitual verlos en la proa y su función es reducir la resistencia al avance, pudiendo constituir un ahorro de combustible de hasta el 15%.

2.2.8 Método empírico

El método empírico es un modelo de investigación que obtiene conocimiento a través de la observación de la realidad, prácticamente, basado en la experiencia.

2.2.9 Algoritmo

Según Cormen (2009), el algoritmo es un procedimiento computacional definido por las variables y parámetros que toman un valor o conjunto de valores en la entrada y salida como resultado, siguiendo una secuencia de pasos que procesan y transforman los datos de entrada a los de la salida.

2.2.10 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)

Según Capote et al. (2008), los modelos RANS son ecuaciones del fluido variado que pasan por un promedio de la suma de todas las magnitudes del valor medio de los componentes fluctuacionales.

CAPITULO III

HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.1 FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS

3.1.1 Hipótesis General

Las ecuaciones paramétricas obtenidas desde simulaciones numéricas afectan la forma del casco.

3.1.2 Hipótesis Específicas

- Las ecuaciones paramétricas afectan la resistencia al avance al utilizar simulaciones numéricas.
- Las ecuaciones paramétricas afectan la continuidad al utilizar simulaciones numéricas.
- Los parámetros del casco afectan la forma del casco al usar simulaciones numéricas.
- Los parámetros del bulbo afectan la forma del casco al usar simulaciones numéricas.

3.2 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

En esta sección se presentan las variables, mediante la tabla 3.1, su definición, dimensión e indicadores, así como el instrumento de análisis.

Tabla 3.1*Matriz de operacionalización de variables.*

VARIABLES	DEFINICIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES
Ecuación Paramétrica	Parámetros geométricos que conforman aspectos específicos	Parámetros del casco	Coficiente de bloque, sección media, eslora, manga, puntal.
		Parámetros del bulbo	Forma del bulbo, coeficiente de sección transversal.
Casco	Forma geométrica del casco de un buque, que establece la resistencia que generará en el fluido sumergido a una velocidad dada.	Resistencia al avance	Coficiente al arrastre, fuerza.
		Continuidad	Tangencialidad, área de sección transversal.

Nota: elaboración propia.

CAPITULO IV

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

PlanoClark y Ivankova (2016) describen los métodos mixtos como “la integración intencional de enfoques de investigación cuantitativos y cualitativos para abordar mejor un problema de investigación”. La presente investigación considera un enfoque mixto para evaluar el aspecto cualitativo de la variable independiente, ecuación paramétrica, y cuantifica la variable dependiente de la forma del casco mediante simulaciones numéricas.

4.1.1 Tipo de Investigación

Según Hernández et al. (2014), la investigación explicativa, “va más allá de la descripción de conceptos o fenómenos o del establecimiento de relaciones entre conceptos; es decir, está dirigida a responder por las causas de los eventos y fenómenos físicos o sociales. Como su nombre lo indica, su interés se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta o por qué se relacionan dos o más variables”. Para el desarrollo de este trabajo se seleccionará un tipo de investigación explicativa. Se explicará como las ecuaciones paramétricas afectan la forma de un casco de embarcación. Además, se realizará la evaluación, mediante simulaciones numéricas con el fin de obtener la afectación a la resistencia al avance y la continuidad de la forma del casco.

4.1.2 Diseño de la Investigación

Según Hernández-Sampieri et al. (2014), “el término diseño se refiere al plan o estrategia concebida para obtener la información que se desea con el fin de responder al planteamiento del problema”, aunque sea dos acepciones, una general y otra particular. Este trabajo de investigación considera un diseño no experimental por considerar un diseño no experimental, porque los datos que se tomarán serán obtenidos sin ninguna manipulación, considerando la forma del casco de embarcación afectada por ecuaciones paramétricas. Además, será utilizado un diseño longitudinal, debido a que se recabarán datos mediante diferentes simulaciones numéricas, para evaluar la afectación que tienen las ecuaciones paramétricas a la forma del casco de una embarcación, analizando su resistencia al avance y su continuidad.

4.2 UNIDAD DE ANÁLISIS

Para realizar la parametrización mediante una ecuación es utilizada una embarcación pesquera del tipo cerco de 44,7 m de eslora, manga de 10,27 m y puntal 5,28 m.

4.3 MATRIZ DE CONSISTENCIA

De acuerdo con Pérez et al. (2016), la matriz de consistencia “consiste en presentar y resumir en forma adecuada, general y sucinta los elementos básicos del proyecto de investigación, la cual mide, evalúa y presenta una visión panorámica elaborada al inicio del proceso... en conclusión, la matriz de consistencia posibilita el análisis e interpretación de la operatividad teórica del Proyecto de Investigación”.

Para el presente trabajo de investigación se elaboró la siguiente matriz de consistencia, plasmada en la tabla 4.2.

Tabla 4.2.

Matriz de consistencia.

FORMULACIÓN DE PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES
<p>PROBLEMA GENERAL: ¿Cómo las ecuaciones paramétricas afectan la forma del casco mediante simulaciones numéricas?</p> <p>PROBLEMA ESPECÍFICOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ ¿Cómo las ecuaciones paramétricas afectan la resistencia al avance al utilizar simulaciones numéricas? ➤ ¿Cómo las ecuaciones paramétricas consideran la continuidad al utilizar simulaciones numéricas? ➤ ¿Por qué los parámetros del casco afectan la forma del casco al evaluarlas mediante simulaciones numéricas? ➤ ¿Por qué los parámetros del bulbo afectan la forma del casco al evaluarlas mediante simulaciones numéricas? 	<p>OBJETIVO GENERAL: Obtener las ecuaciones paramétricas que afectan la forma del casco mediante simulaciones numéricas.</p> <p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Obtener las ecuaciones paramétricas que afectan la resistencia al avance al utilizar simulaciones numéricas. ➤ Obtener las ecuaciones paramétricas que afectan la continuidad al utilizar simulaciones numéricas. ➤ Evaluar los parámetros del casco que afectan la forma del casco al usar simulaciones numéricas. ➤ Evaluar los parámetros del bulbo que afectan la forma del casco al usar simulaciones numéricas. 	<p>HIPÓTESIS GENERAL: Las ecuaciones paramétricas obtenidas desde simulaciones numéricas afectan la forma del casco.</p> <p>HIPÓTESIS ESPECÍFICOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Las ecuaciones paramétricas afectan la resistencia al avance al utilizar simulaciones numéricas. ➤ Las ecuaciones paramétricas afectan la continuidad al utilizar simulaciones numéricas. ➤ Los parámetros del casco afectan la forma del casco al usar simulaciones numéricas. ➤ Los parámetros del bulbo afectan la forma del casco al usar simulaciones numéricas. 	<p>VARIABLE DEPENDIENTE:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Ecuación Paramétrica <p>VARIABLE INDEPENDIENTE:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Casco

Nota: elaboración propia.

CAPITULO V

DESARROLLO DE LA TESIS

5.1 DISEÑO DE LA EMBARCACIÓN

5.1.1 Dimensiones principales de embarcación de cerco típico del Perú

Como fue mencionado en el subcapítulo 4.2, las características de la embarcación pesquera de cerco típica, cuyas características son mostradas en la Tabla 5.1. Además, en la Figura 5.1 es mostrada la embarcación pesquera que tiene bulbo, esta característica es importante porque en los análisis uno de los parámetros considerados para el estudio paramétrico está relacionado al bulbo de proa.

Tabla 5.1

Características generales.

Eslora total	44,70 m
Eslora en flotación	40,70 m
Manga	10,27 m
Puntal	5,28 m
Capacidad de bodega	520 m ³
Potencia del motor	1.400 BHP @750 RPM

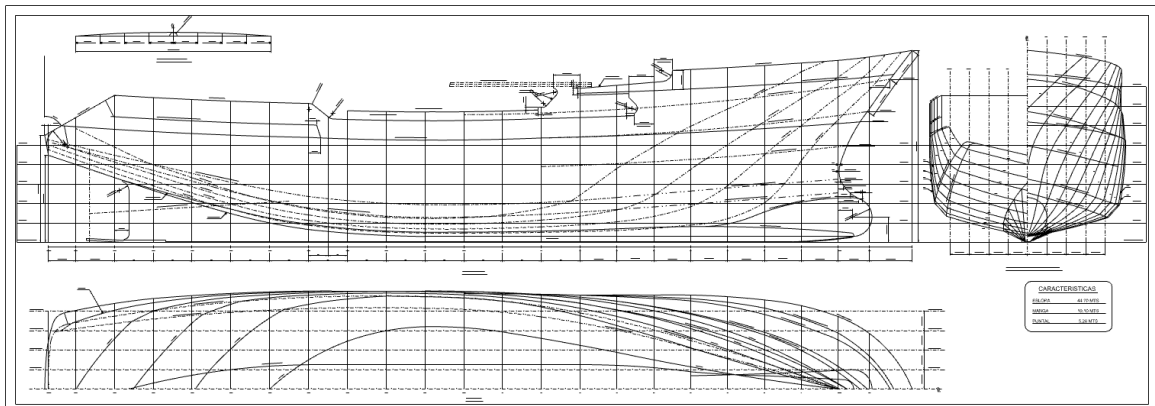
Nota: elaboración propia.

5.1.2 Modelamiento Tridimensional de la Embarcación

Para el modelamiento en 3D, se utilizó el software Rhinoceros v7, cuyas líneas de forma tiene relación con lo presentado en la Figura 5.1, y serán presentados cinco casos de modelos y exportados al programa de análisis CFD.

Figura 5.1

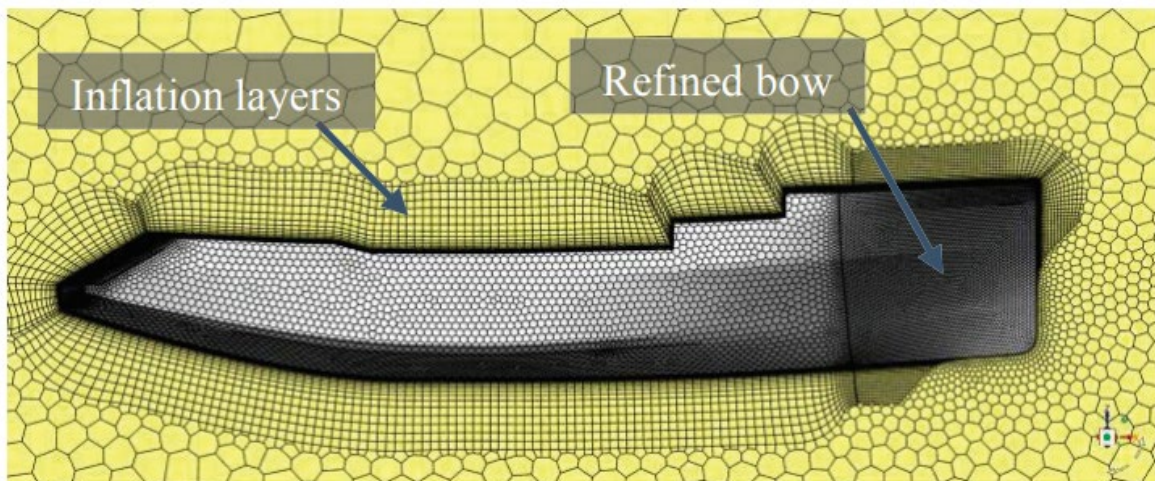
Esquema de líneas de forma de una embarcación pesquera.



Nota: elaboración propia.

Figura 5.2

Malla de volumen de celda.



Nota: elaboración propia.

Para realizar el análisis del estudio paramétrico es utilizado un elemento denominado “*cell volume*” o volumen de celda realizando refinamientos en la zona del casco y mallas poliédricas, ver Figura 5.2. Los análisis numéricos son realizados mediante CFD y CAESES. Este último, contiene los parámetros del casco y los parámetros del bulbo, de esta forma es parametrizado el casco de la embarcación pesquera.

5.2 FUNCIONAMIENTO DEL CFD

El CFD se base en tres etapas, el pre-procesamiento, el procesamiento y el post-procesamiento, y se definen, de forma resumida, como:

5.2.1 Pre-procesamiento

Es la etapa de preparación de la forma geométrica de elemento a estudiar, que mayormente es preparada en un software de diseño; en el caso de esta tesis es el software Rhinoceros, y exportadas a un software de CFD. Seguidamente, se establece el dominio computacional que, a modo de un espacio o región, enmarca las condiciones del fluido que circulará e interactuará con el elemento de análisis.

Luego de la forma geométrica y el dominio establecido, se realiza el enmallado de la geometría, que suele ser compleja debido a la complejidad de la forma, gobernada por ecuaciones de flujo discretizados para resolver analíticamente el conjunto estudiado por el comportamiento del fluido. Las mallas más comunes para la geometría 3D son tetraedros, pirámide, hexaedro o híbridas, mallas estructuradas caracterizadas por la conectividad irregular entre las celdas.

5.2.2 Procesamiento

Es la etapa de resolución numérica del CFD regido por la ecuación del flujo con exactitud e iterativo, por lo que se recomienda establecer criterios de convergencia para el valor residual igual a cero. Los softwares vienen por defecto con los criterios de convergencia recomendados, pero con geometrías complejas se establece un predeterminado valor residual entre 1-4. Esta etapa precisa de monitoreo según el comportamiento del fluido y el tiempo de cálculo.

5.2.3 Post-procesamiento

Esta etapa muestra los resultados con una interfase comprensible e interpretable. Aquí se muestran las variables como resultados y se juzga la calidad de la precisión y fidelidad con la realidad del modelamiento.

5.3 PARÁMETROS DE ECUACIÓN PARAMÉTRICA

Los parámetros de la ecuación paramétrica del modelo son:

- 1) Coeficiente de bloque del bulbo: La forma del casco, cuyas dimensiones son definidas en la tabla 5.1, es constante y se presentarán casos en que el primer caso es un casco sin bulbo, pero los siguientes casos son afectados por la presencia de un bulbo que varía según el aumento de la eslora de bulbo. Como el casco ya tiene un coeficiente de bloque a su calado de diseño, este coeficiente aumenta en medida que aumente el coeficiente de bloque del bulbo.
- 2) Forma tangencial del casco para generar la integridad y continuidad de la superficie mojada: La forma del casco es caracterizado para que el flujo circulante tenga continuidad tangencial para conservar la integridad del fluido en su interacción con el casco.
- 3) Funcionalidad intrínseca de CAESES para conservar la continuidad del flujo de presiones: El CAESES es un software de optimización de modelos geométricos y paramétrico flexible como lo es un casco y puede optimizar con sus herramientas de mallado y simulación de forma eficiente. Es un paquete de sus herramientas, intrínseca, dar continuidad de flujo de presiones en la forma, quiere decir, a la conservación de fuerzas o influencias a medida que mantienen la estabilidad del casco.

CAPITULO VI

ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo, se describe el estudio de caracterización del casco de la embarcación de estudio a través de la evaluación de la resistencia al avance. Aquí se emplea el software CAESES.

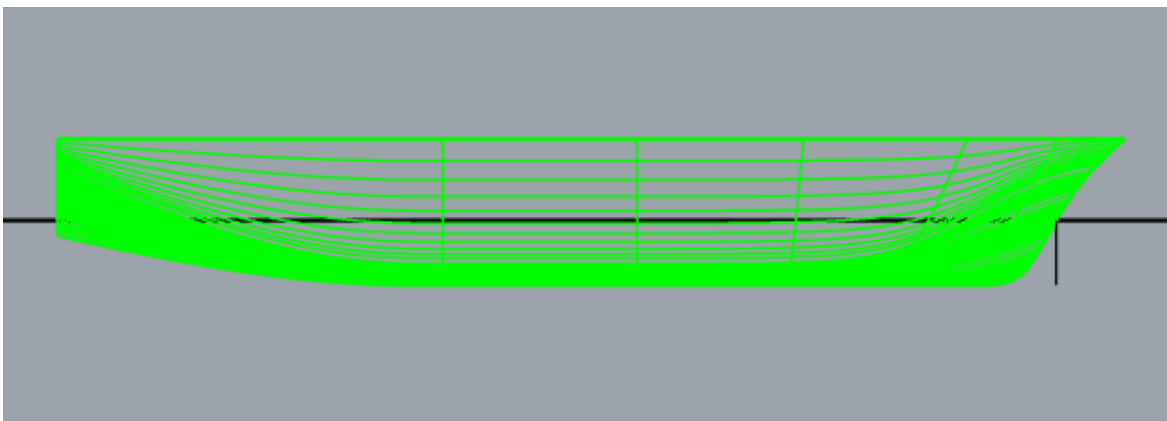
6.1 DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA

6.1.1 Resistencia al avance de Casco 1 a velocidad de 20 nudos

Se presenta la forma geométrica del Casco 1 con velocidad de navegación del casco de 20 nudos, así también el perfil de olas, presión sobre el casco y perfil de velocidades por la resistencia al avance.

Figura 6.1

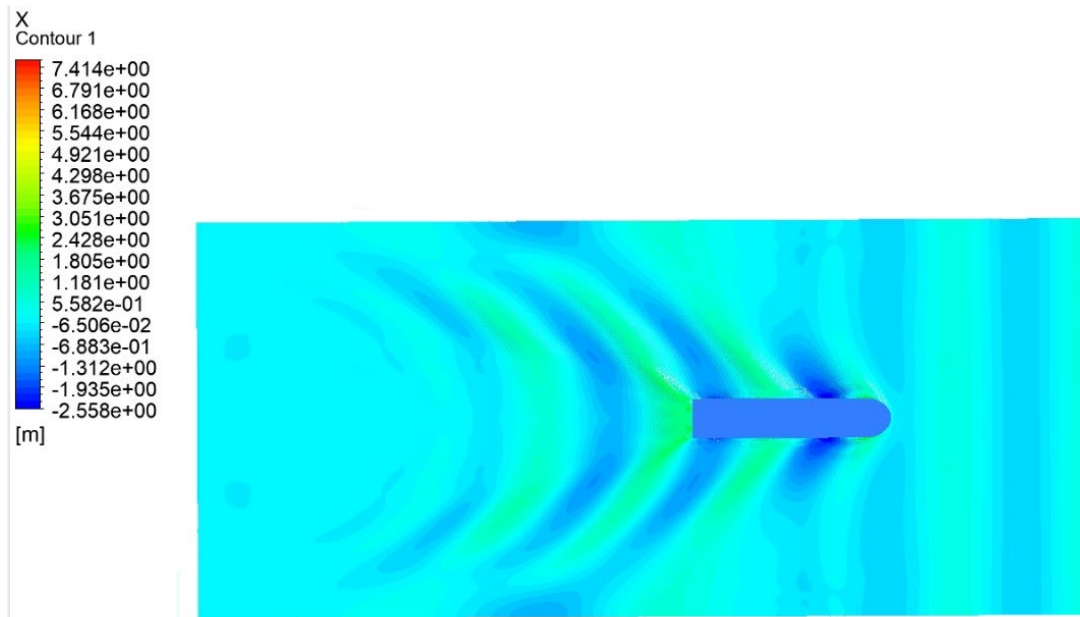
Vista longitudinal del 3D del Casco 1.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.2

Vista de planta de Casco 1 del perfil de olas a 20 nudos.



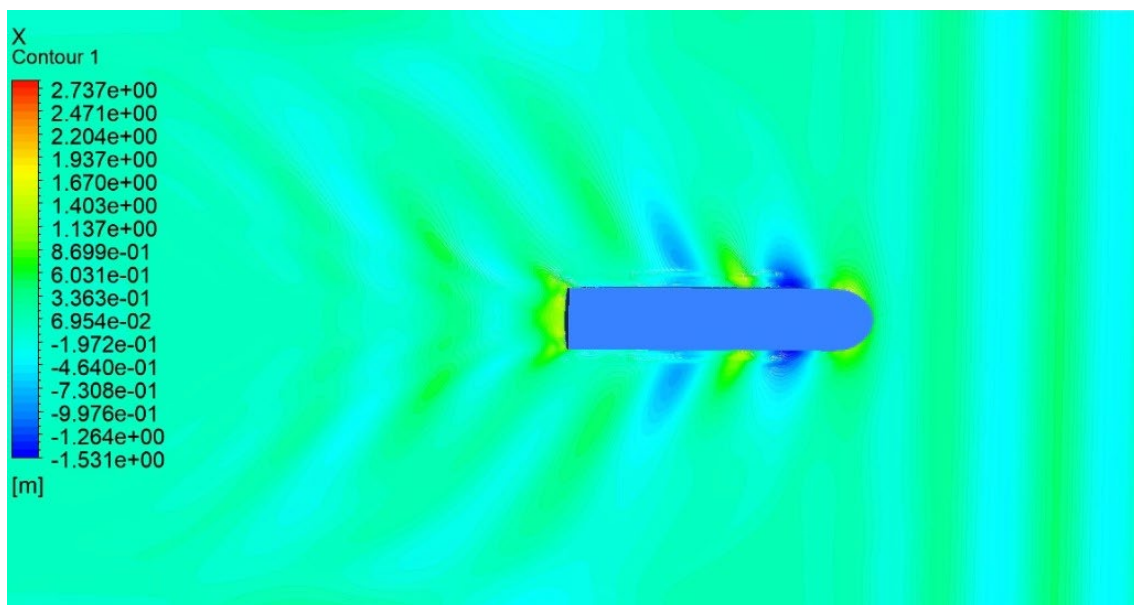
Nota: elaboración propia.

6.1.2 Resistencia al avance de Casco 1 a velocidad de 15 nudos

Se presenta la forma geométrica del Casco 1 con velocidad de navegación del casco de 15 nudos, así también el perfil de olas, presión sobre el casco y perfil de velocidades por la resistencia al avance.

Figura 6.3

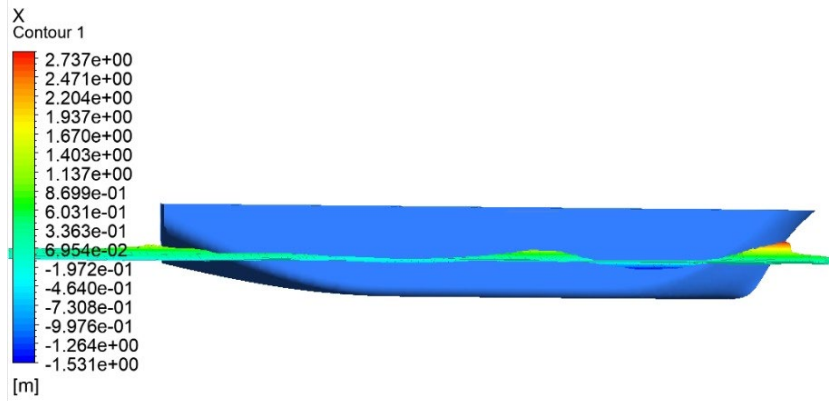
Vista de planta de Casco 1 y perfil de olas a 15 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.4

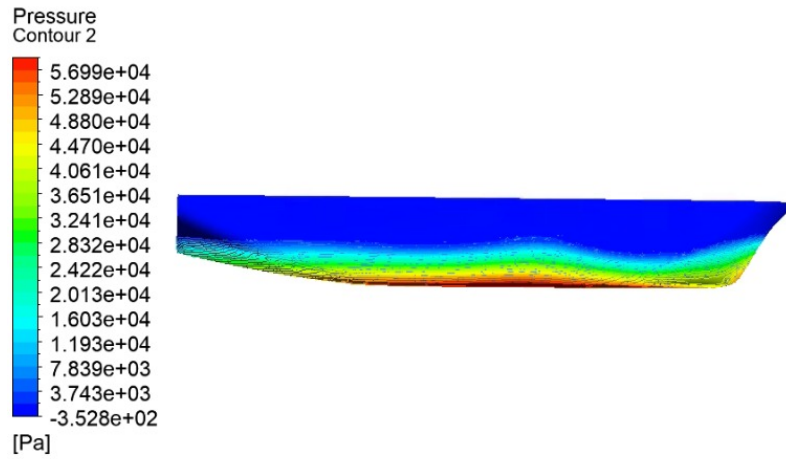
Vista longitudinal de Casco 1 y perfil de olas a 15 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.5

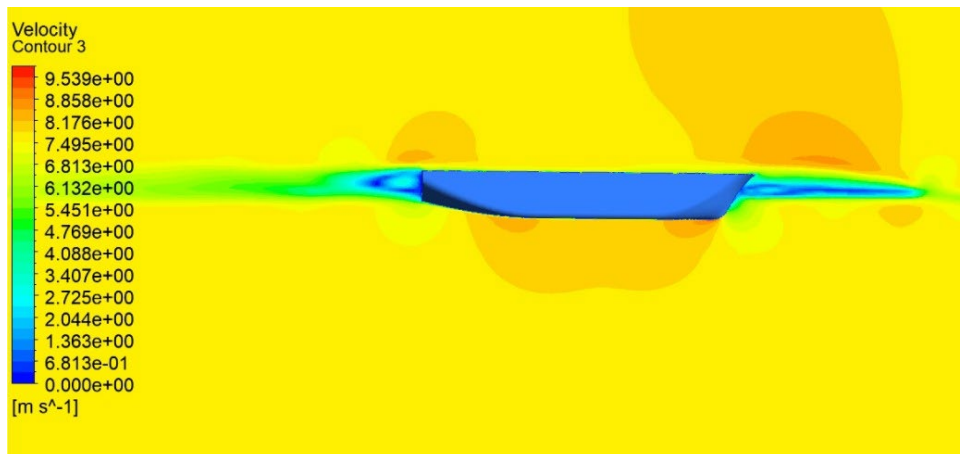
Presión sobre el Casco 1 a 15 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.6

Perfil de velocidad del Casco 1 a 15 nudos.



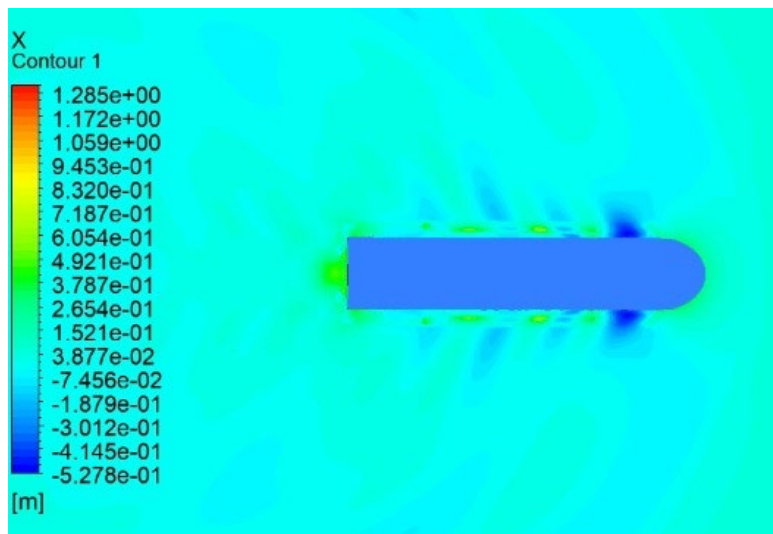
Nota: elaboración propia.

6.1.3 Resistencia al avance de Casco 1 a velocidad de 10 nudos

Se presenta la forma geométrica del Casco 1 con velocidad de navegación del casco de 10 nudos, así también el perfil de olas, presión sobre el casco y perfil de velocidades por la resistencia al avance.

Figura 6.7

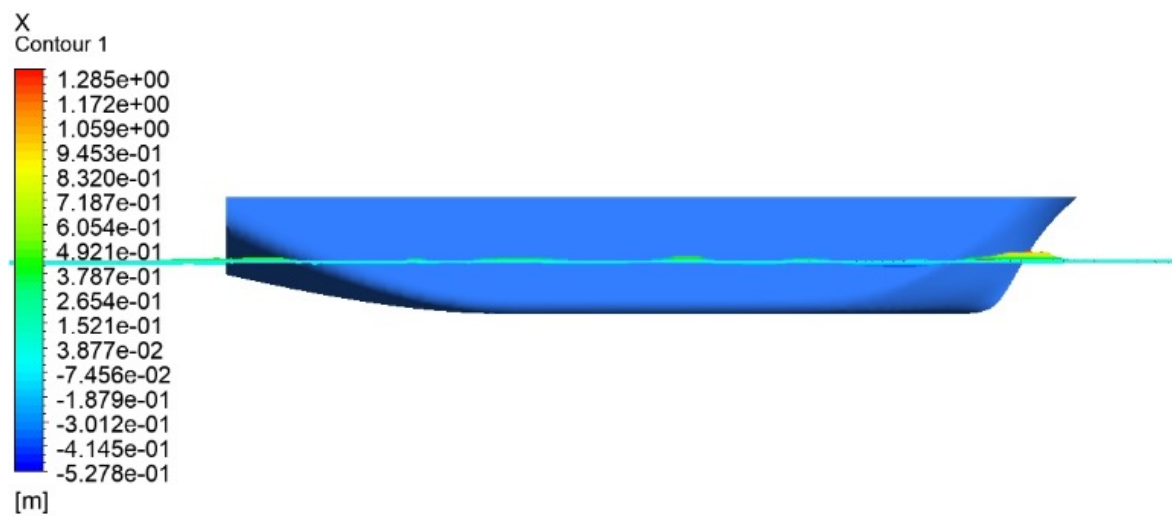
Vista de planta de Casco 1 y perfil de olas a 10 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.8

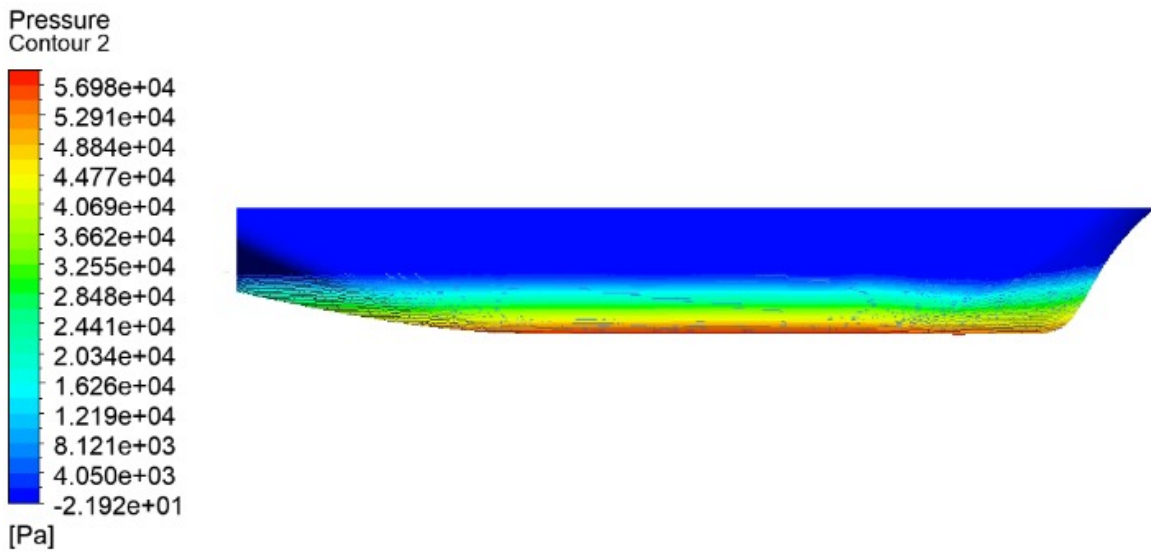
Vista longitudinal de Casco 1 y perfil de olas a 10 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.9

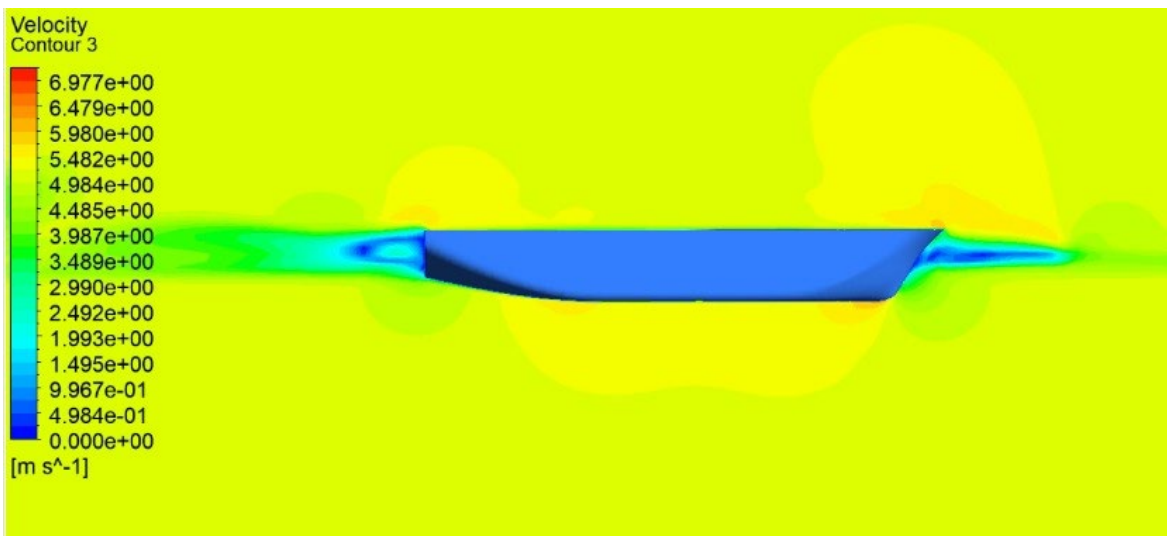
Presión sobre el Casco 1 a 10 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.10

Perfil de velocidad del Casco 1 a 10 nudos.



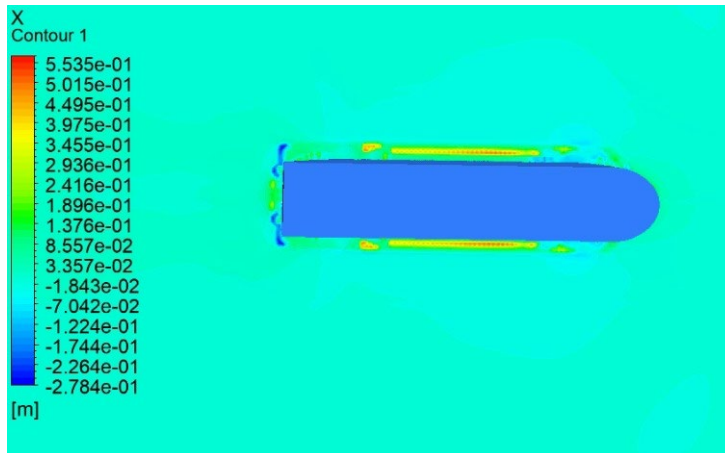
Nota: elaboración propia.

6.1.4 Resistencia al avance de Casco 1 a velocidad de 5 nudos

Se presenta la forma geométrica del Casco 1 con velocidad de navegación del casco de 5 nudos, así también el perfil de olas, presión sobre el casco y perfil de velocidades por la resistencia al avance.

Figura 6.11

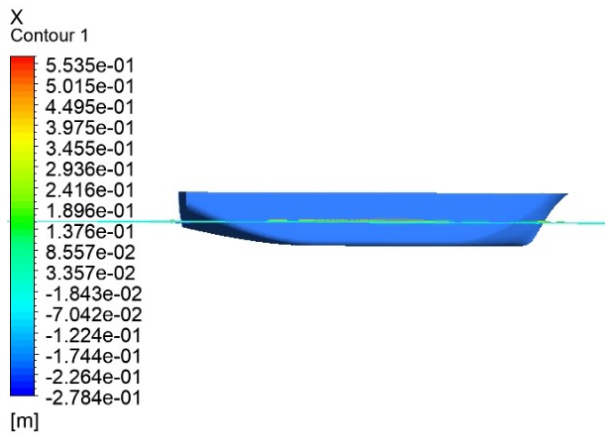
Vista de planta de Casco 1 y perfil de olas a 5 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.12

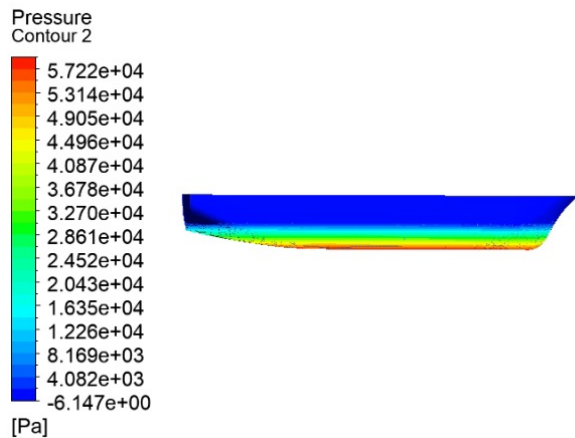
Vista longitudinal de Casco 1 y perfil de olas a 5 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.13

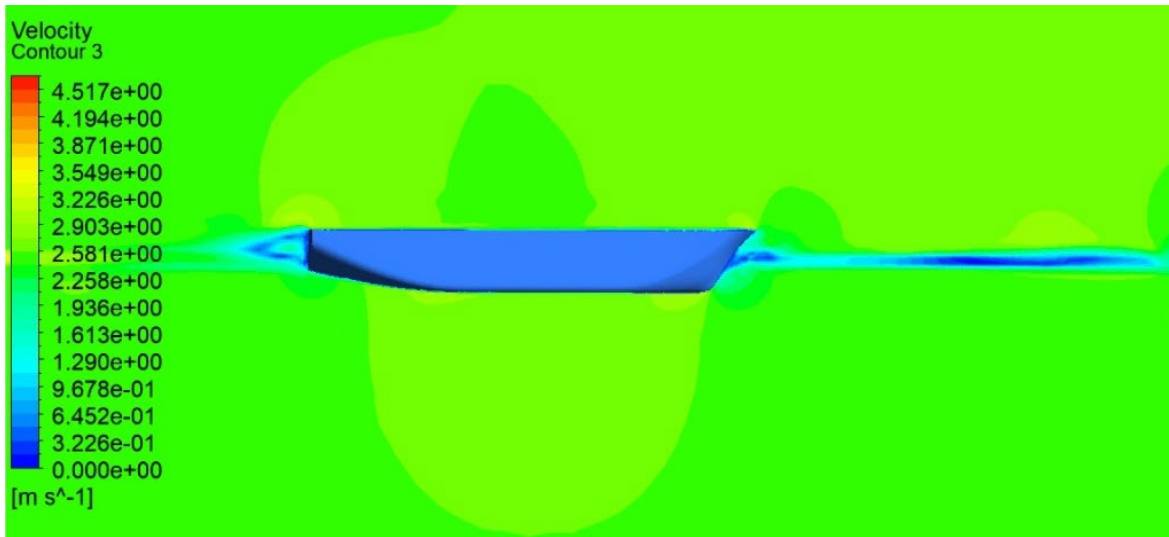
Presión sobre el Casco 1 a 5 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.14

Perfil de velocidad del Casco 1 a 5 nudos.



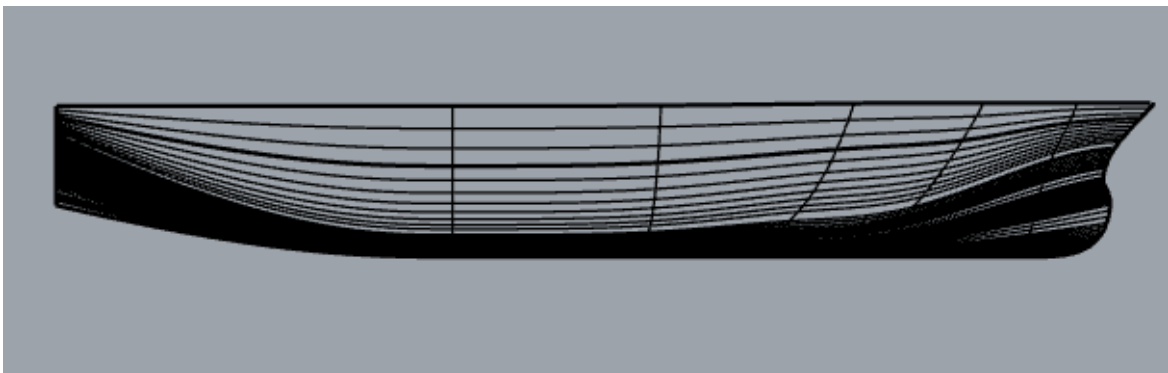
Nota: elaboración propia.

6.1.5 Resistencia al avance de Casco 2 a velocidad de 20 nudos

Se presenta la forma geométrica del Casco 2 con velocidad de navegación del casco de 20 nudos, así también el perfil de olas, presión sobre el casco y perfil de velocidades por la resistencia al avance.

Figura 6.15

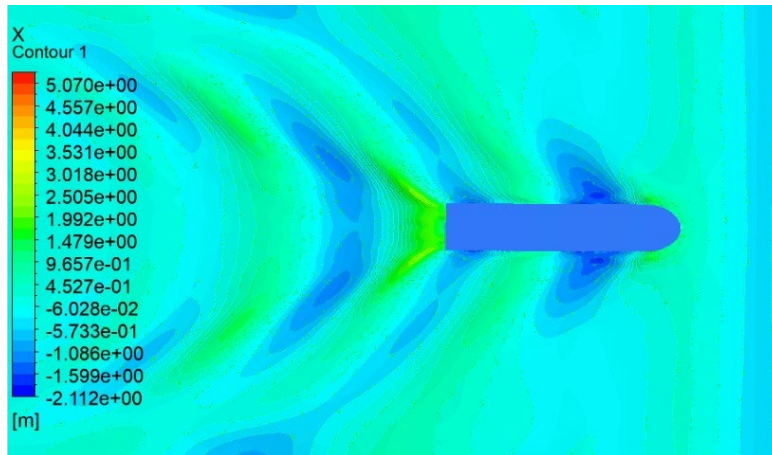
Vista longitudinal del 3D del Casco 2.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.16

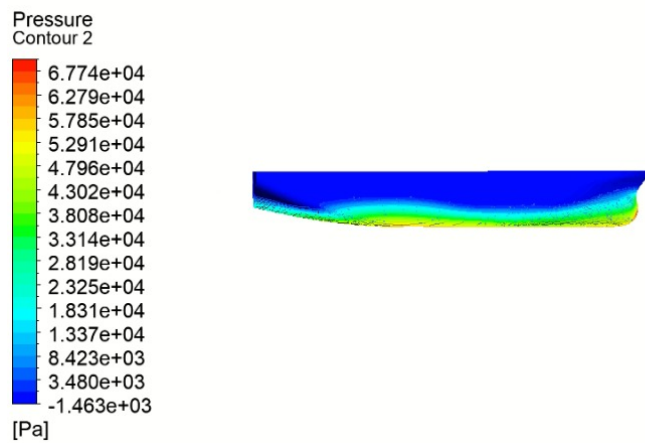
Vista de planta de Casco 2 y perfil de olas a 20 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.17

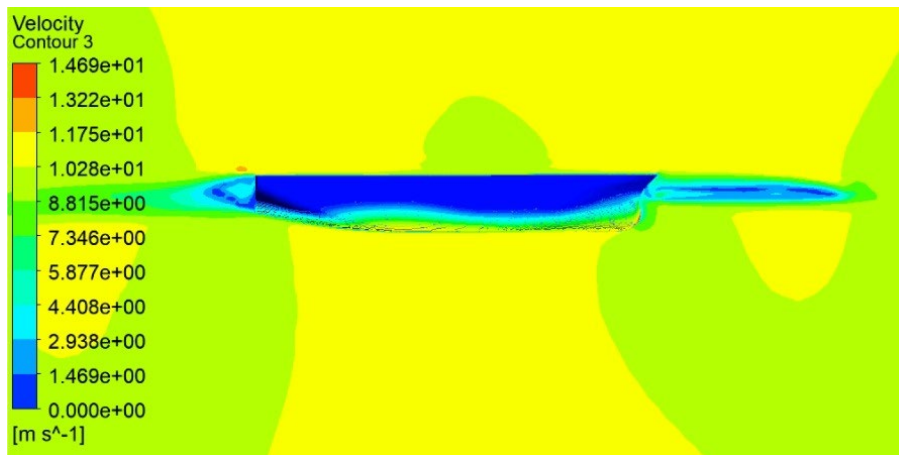
Presión sobre el Casco 2 a 20 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.18

Perfil de velocidad del Casco 2 a 20 nudos.



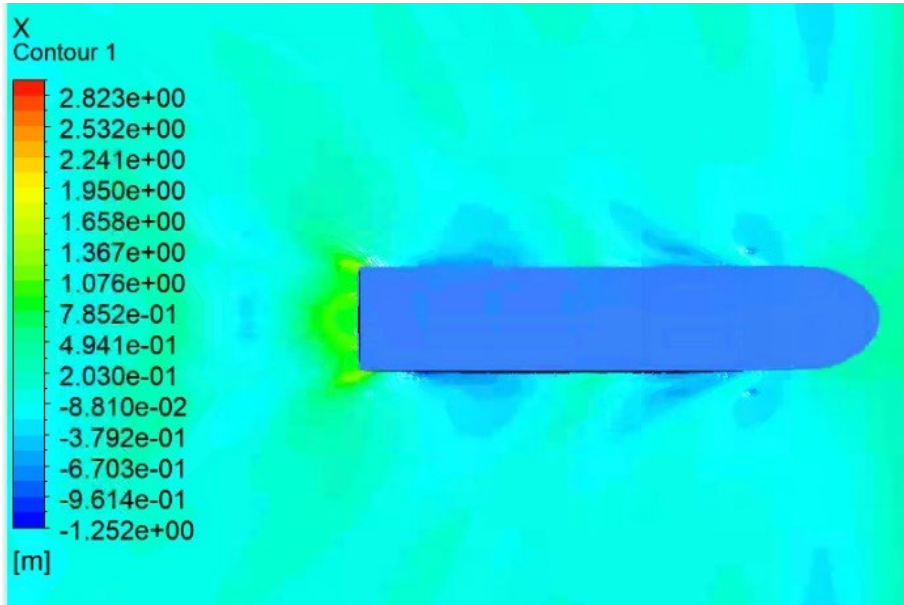
Nota: elaboración propia.

6.1.6 Resistencia al avance de Casco 2 a velocidad de 15 nudos

Se presenta la forma geométrica del Casco 2 con velocidad de navegación del casco de 15 nudos, así también el perfil de olas, presión sobre el casco y perfil de velocidades por la resistencia al avance.

Figura 6.19

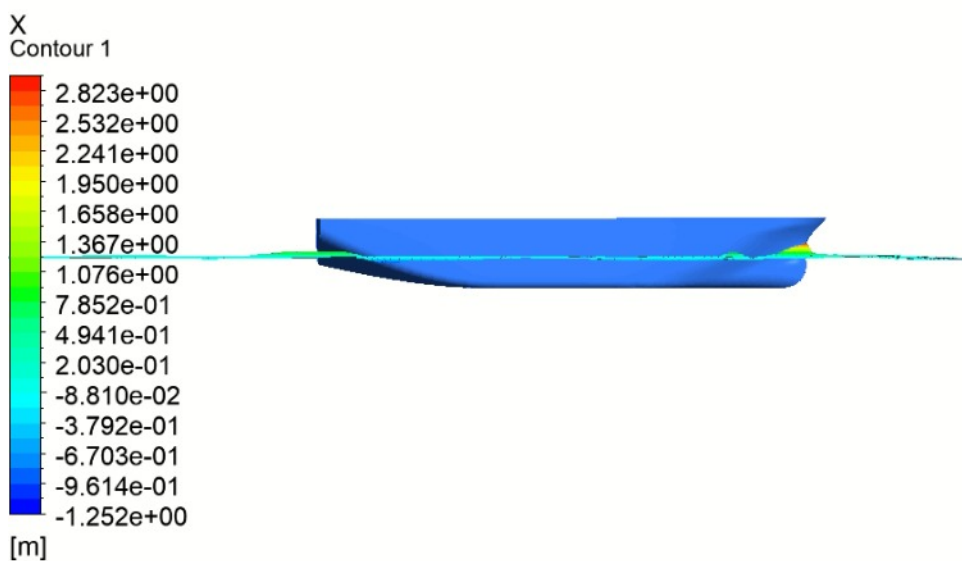
Vista de planta de Casco 2 y perfil de olas a 15 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.20

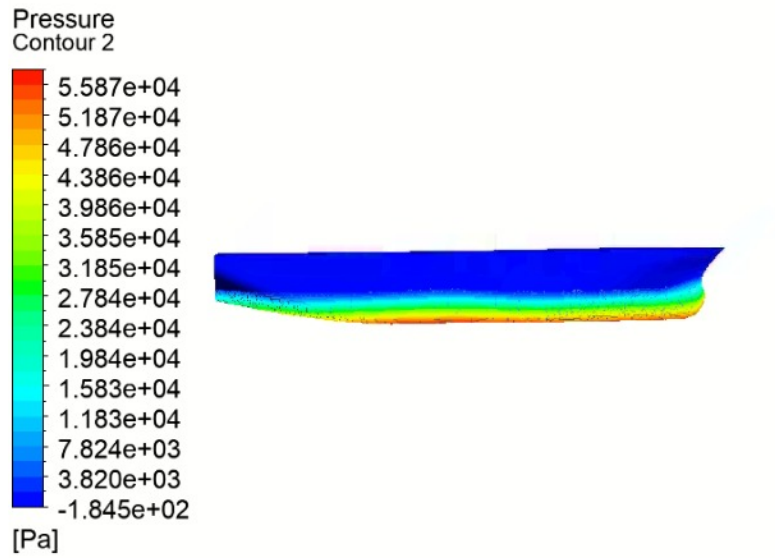
Vista longitudinal de Casco 2 y perfil de olas a 15 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.21

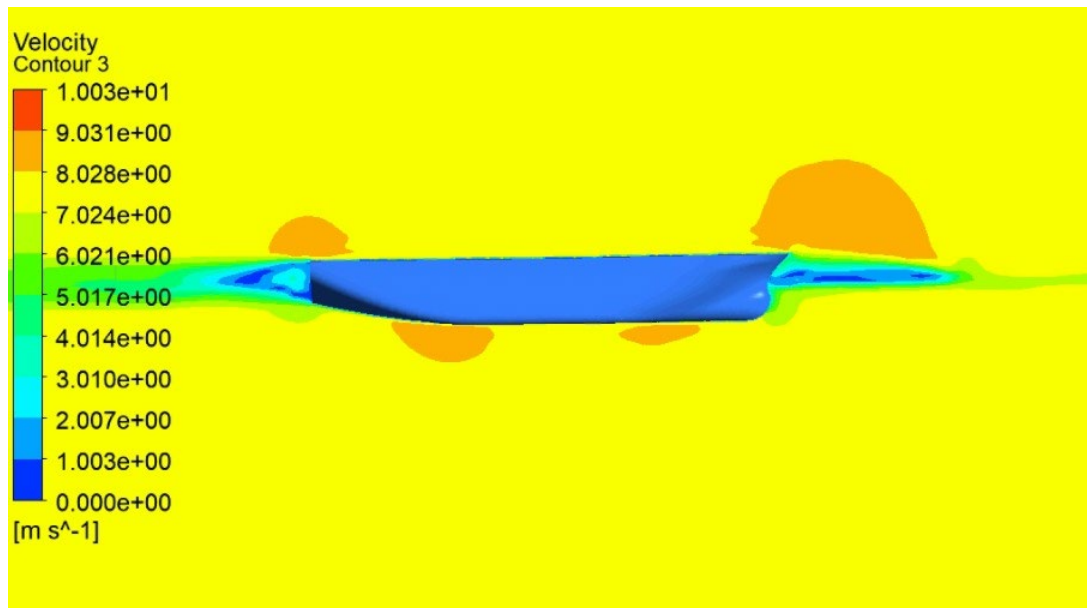
Presión sobre el Casco 2 a 15 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.22

Perfil de velocidad del Casco 2 a 15 nudos.



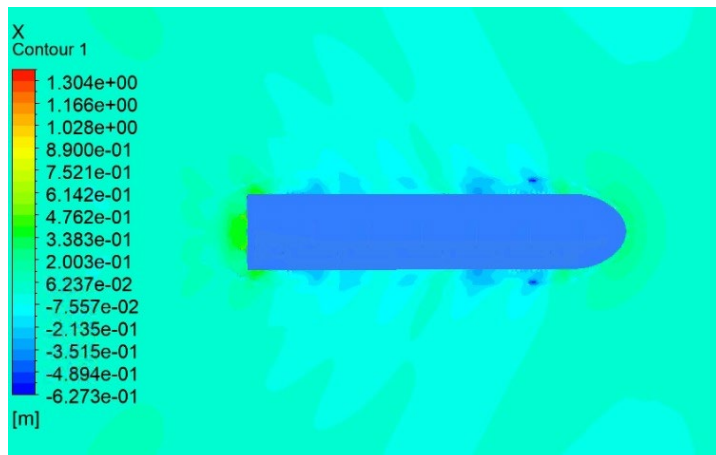
Nota: elaboración propia.

6.1.7 Resistencia al avance de Casco 2 a velocidad de 10 nudos

Se presenta la forma geométrica del Casco 2 con velocidad de navegación del casco de 10 nudos, así también el perfil de olas, presión sobre el casco y perfil de velocidades por la resistencia al avance.

Figura 6.23

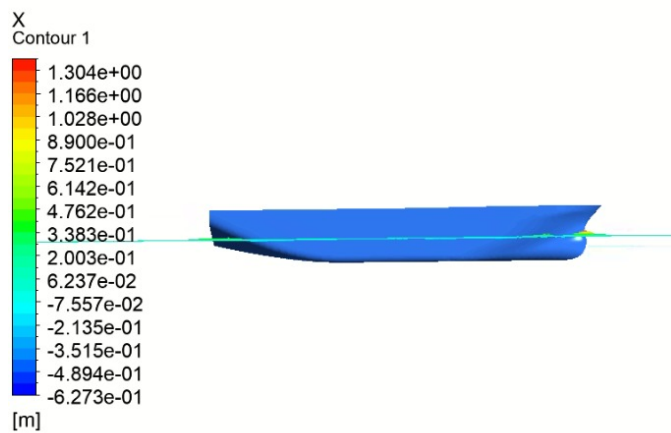
Vista de planta de Casco 2 y perfil de olas a 10 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.24

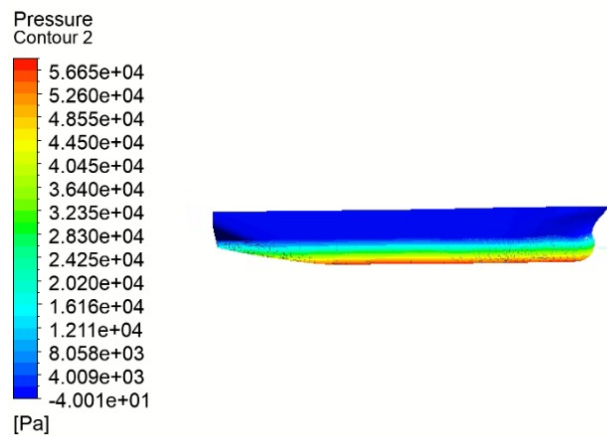
Vista longitudinal de Casco 2 y perfil de olas a 10 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.25

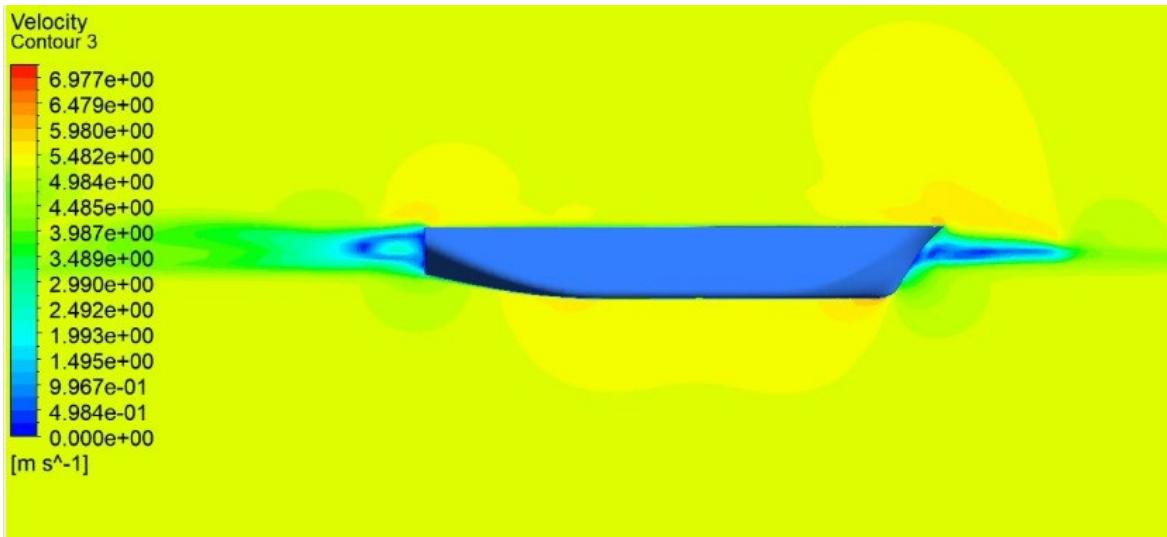
Presión sobre el Casco 2 a 10 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.26

Perfil de velocidad del Casco 2 a 10 nudos.



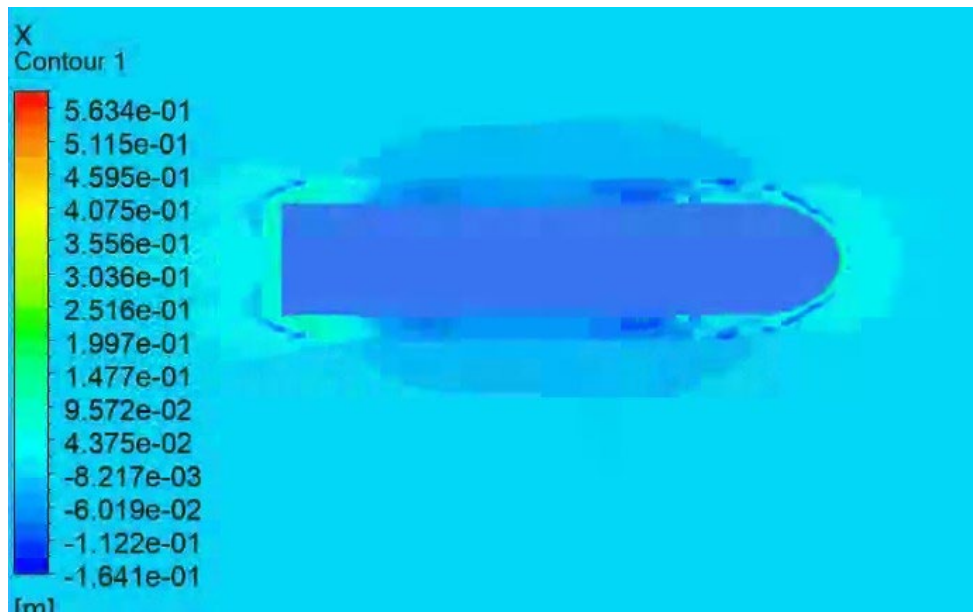
Nota: elaboración propia.

6.1.8 Resistencia al avance de Casco 2 a velocidad de 5 nudos

Se presenta la forma geométrica del Casco 2 con velocidad de navegación del casco de 5 nudos, así también el perfil de olas, presión sobre el casco y perfil de velocidades por la resistencia al avance.

Figura 6.27

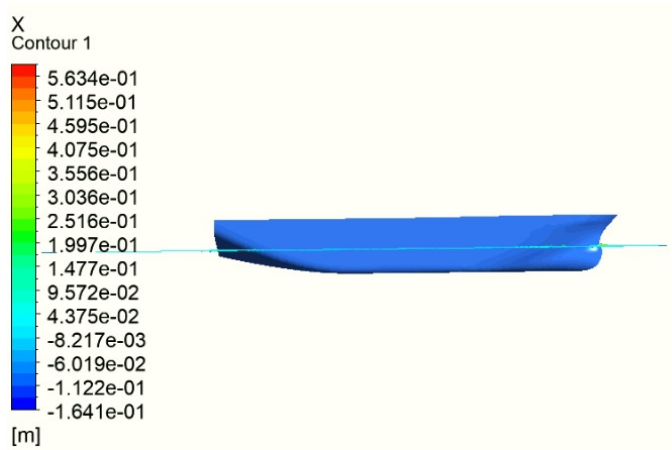
Vista de planta de Casco 2 y perfil de olas a 5 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.28

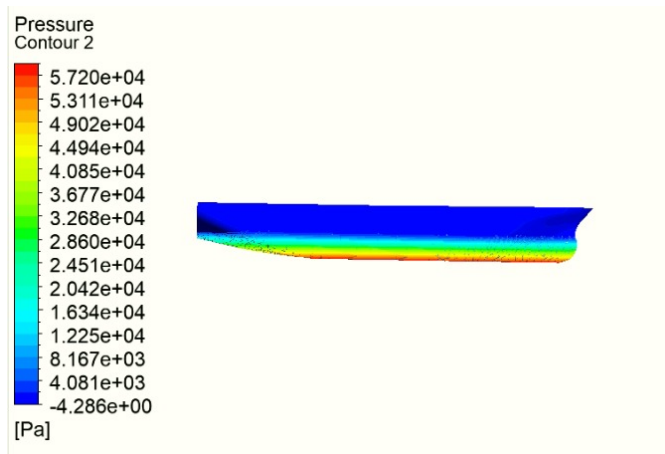
Vista longitudinal de Casco 2 y perfil de olas a 5 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.29

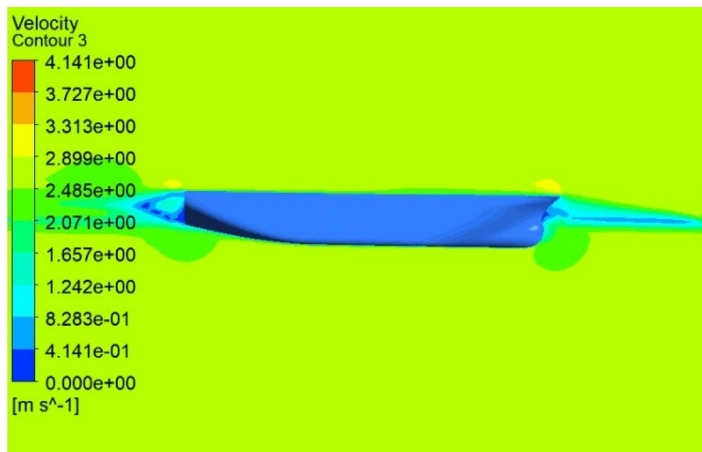
Presión sobre el Casco 2 a 5 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.30

Perfil de velocidad del Casco 2 a 5 nudos.



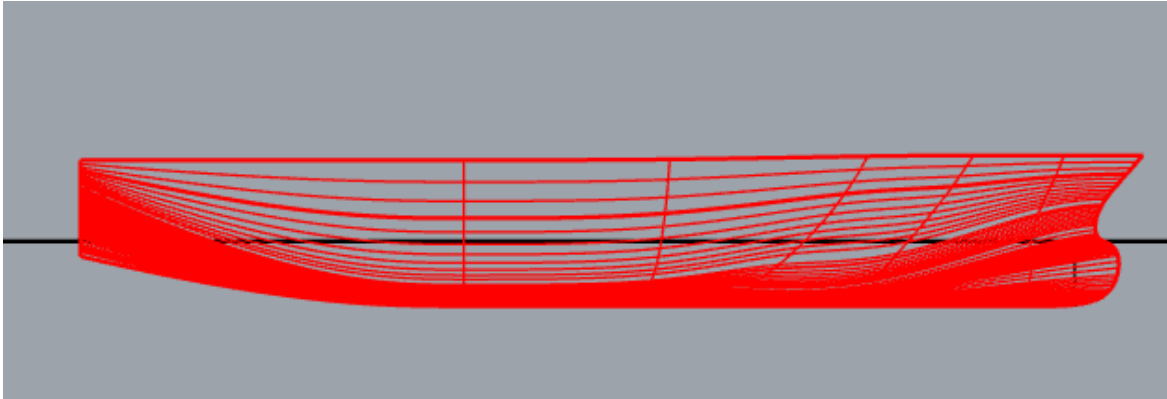
Nota: elaboración propia.

6.1.9 Resistencia al avance de Casco 3 a velocidad de 20 nudos

Se presenta la forma geométrica del Casco 3 con velocidad de navegación del casco de 20 nudos, así también el perfil de olas, presión sobre el casco y perfil de velocidades por la resistencia al avance.

Figura 6.31

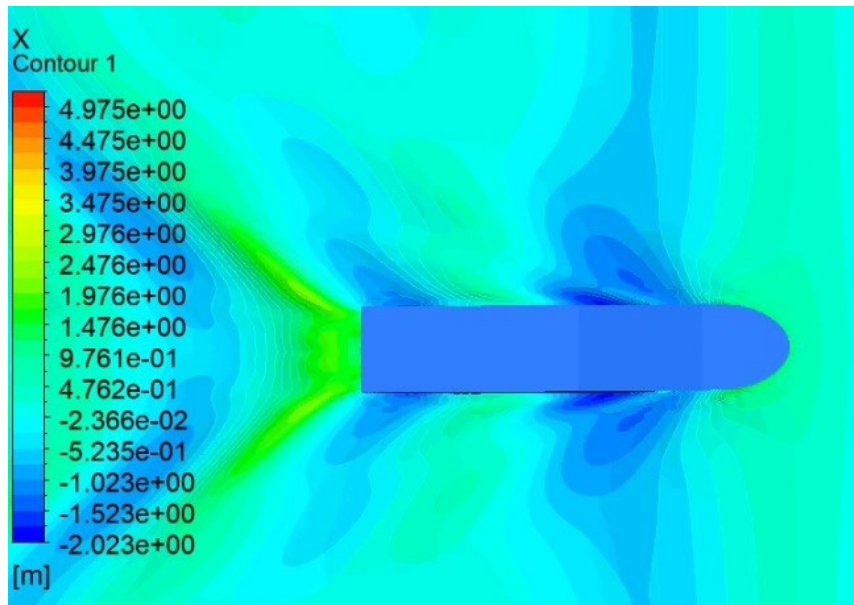
Vista longitudinal del 3D del Casco 3.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.32

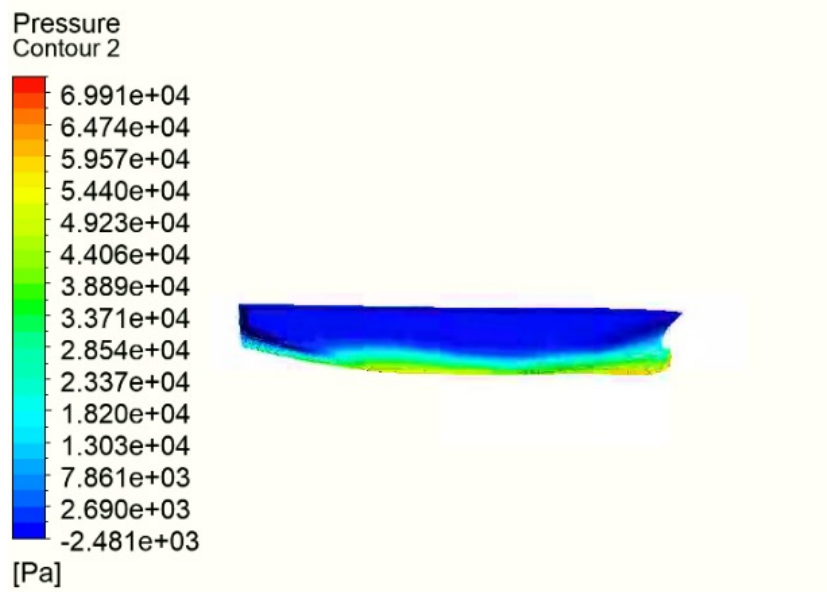
Vista de planta de Casco 3 y perfil de olas a 20 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.33

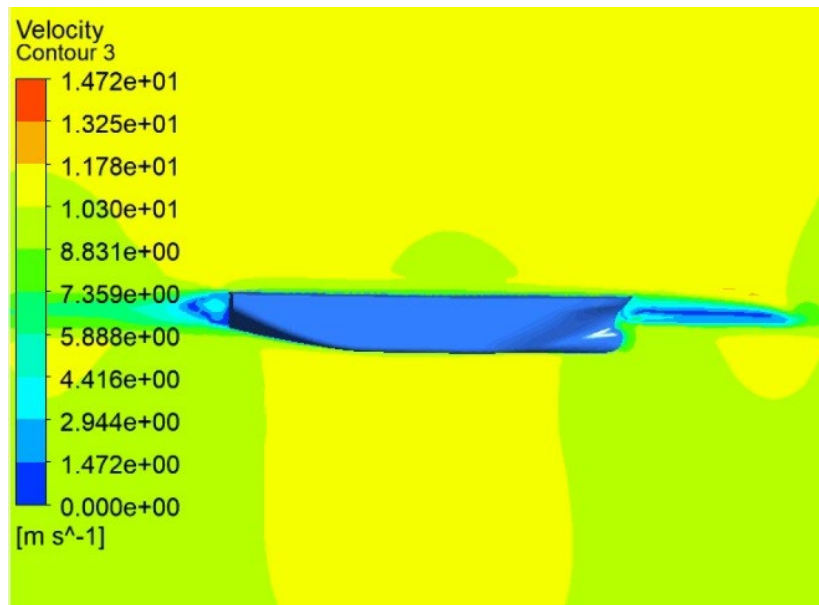
Presión sobre el Casco 3 a 20 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.34

Perfil de velocidad del Casco 3 a 20 nudos.



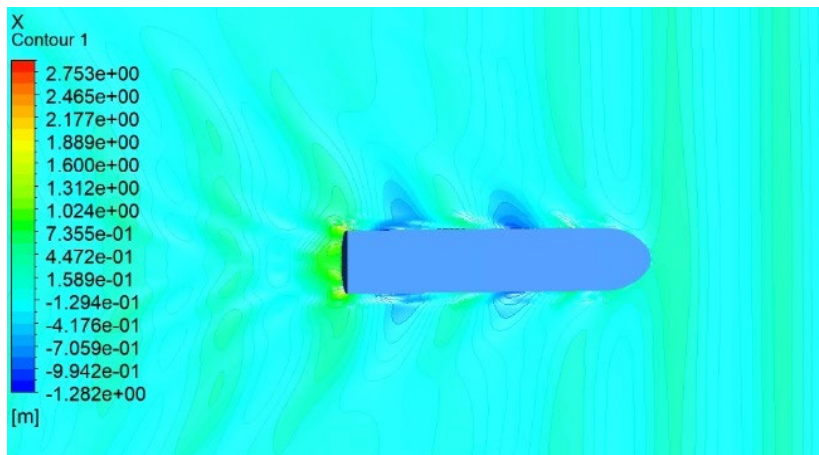
Nota: elaboración propia.

6.1.10 Resistencia al avance de Casco 3 a velocidad de 15 nudos

Se presenta la forma geométrica del Casco 3 con velocidad de navegación del casco de 15 nudos, así también el perfil de olas, presión sobre el casco y perfil de velocidades por la resistencia al avance.

Figura 6.35

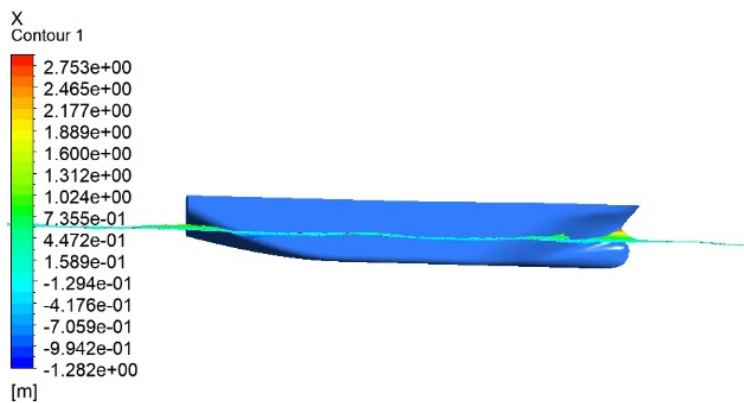
Vista de planta de Casco 3 y perfil de olas a 15 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.36

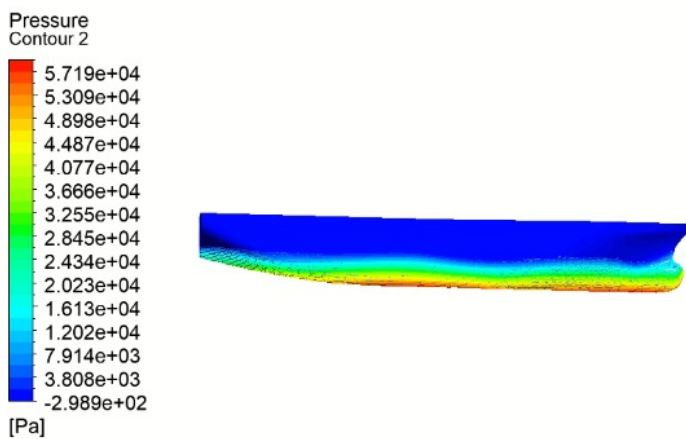
Vista longitudinal de Casco 3 y perfil de olas a 15 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.37

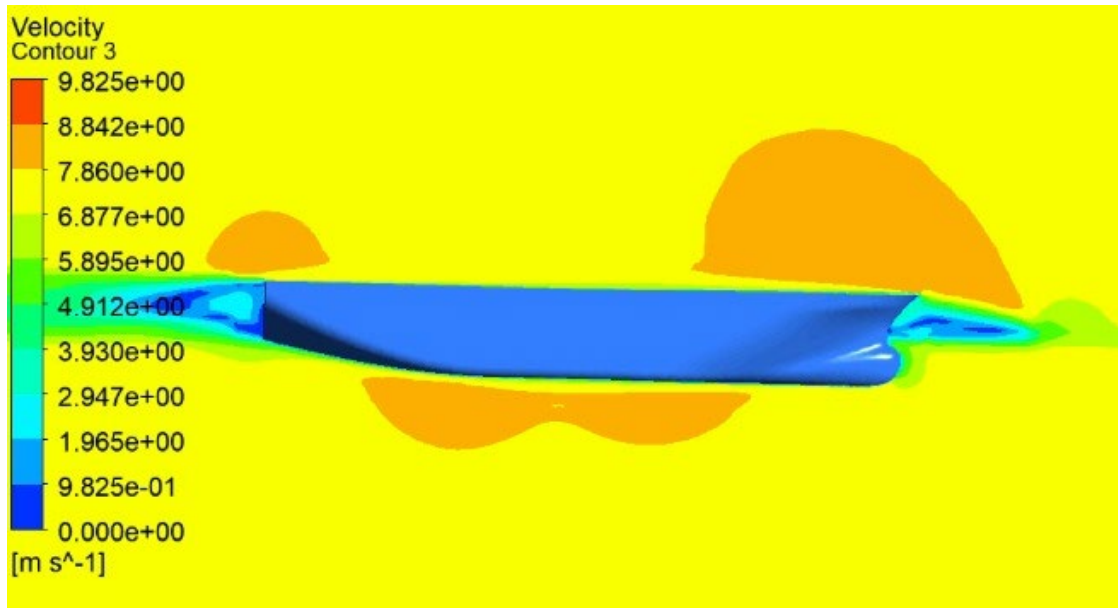
Presión sobre el Casco 3 a 15 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.38

Perfil de velocidad del Casco 3 a 15 nudos.



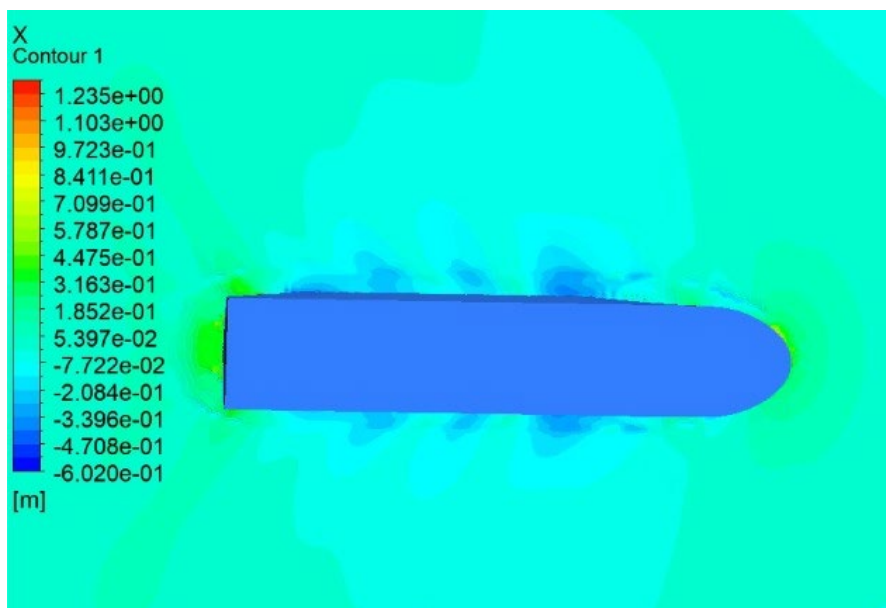
Nota: elaboración propia.

6.1.11 Resistencia al avance de Casco 3 a velocidad de 10 nudos

Se presenta la forma geométrica del Casco 3 con velocidad de navegación del casco de 10 nudos, así también el perfil de olas, presión sobre el casco y perfil de velocidades por la resistencia al avance.

Figura 6.39

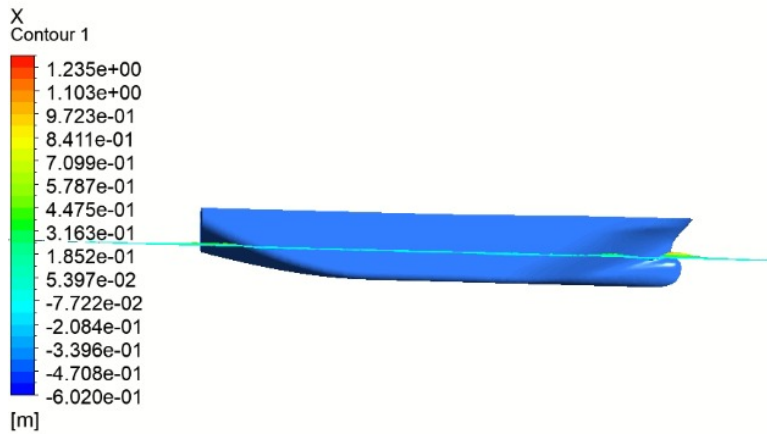
Vista de planta de Casco 3 y perfil de olas a 10 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.40

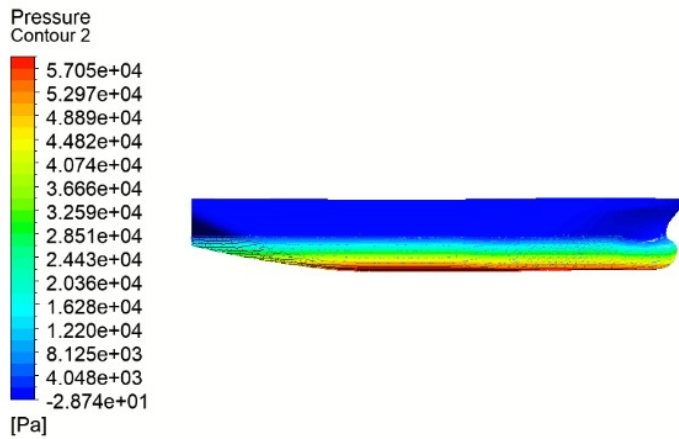
Vista longitudinal de Casco 3 y perfil de olas a 10 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.41

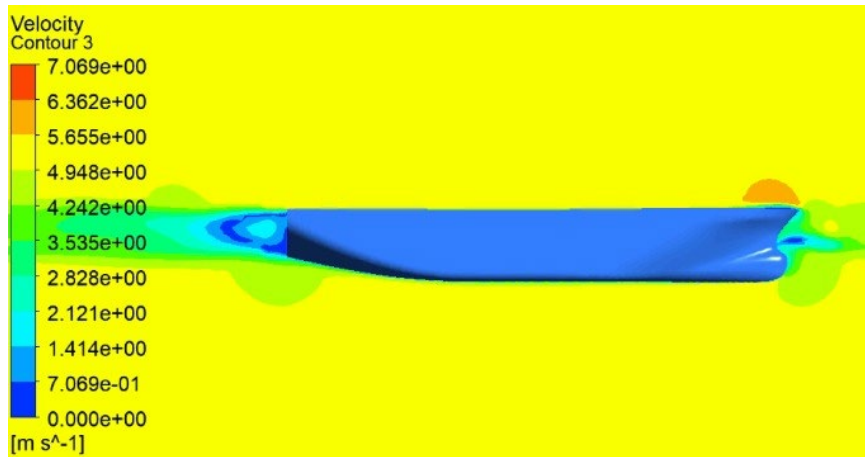
Presión sobre el Casco 3 a 10 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.42

Perfil de velocidad del Casco 3 a 10 nudos.



Nota: elaboración propia.

6.1.12 Resistencia al avance de Casco 3 a velocidad de 5 nudos

Se presenta la forma geométrica del Casco 3 con velocidad de navegación del casco de 5 nudos, así también el perfil de olas, presión sobre el casco y perfil de velocidades por la resistencia al avance.

Figura 6.43

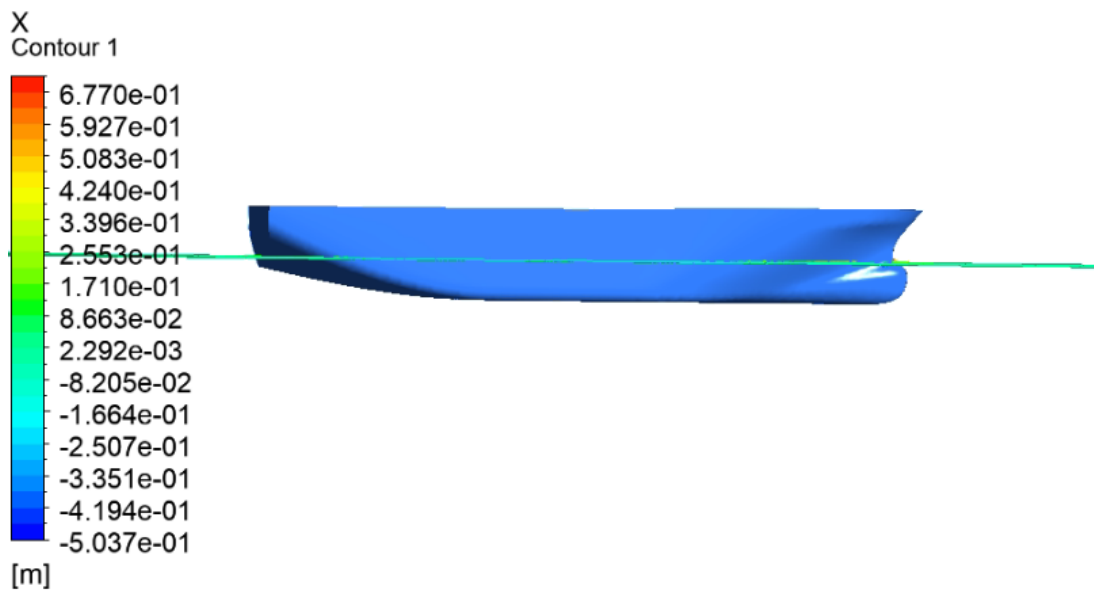
Vista de planta de Casco 3 y perfil de olas a 5 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.44

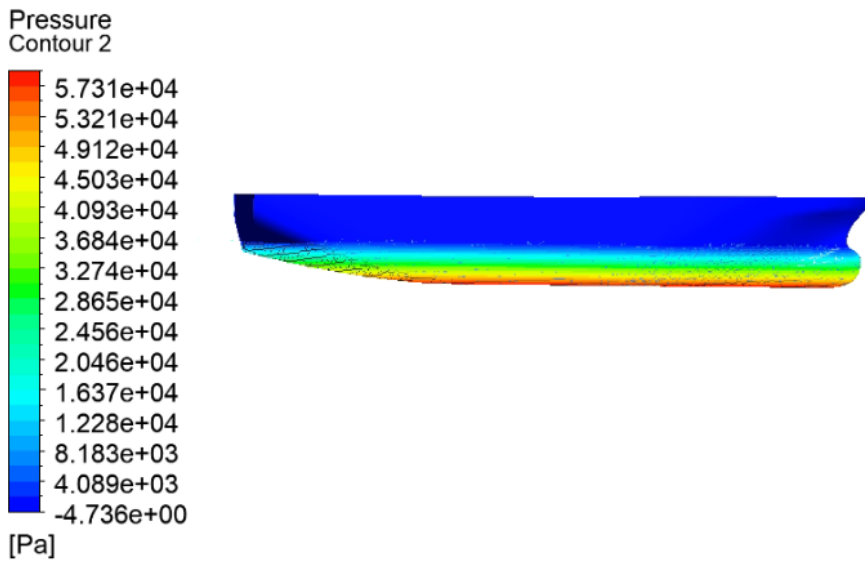
Vista longitudinal de Casco 3 y perfil de olas a 5 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.45

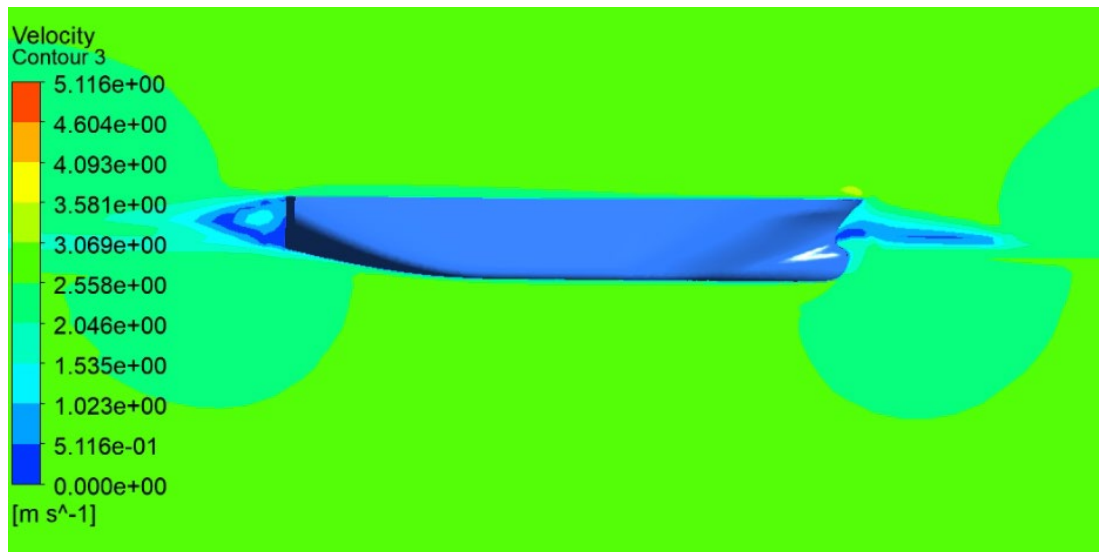
Presión sobre el Casco 3 a 5 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.46

Perfil de velocidad del Casco 3 a 5 nudos.



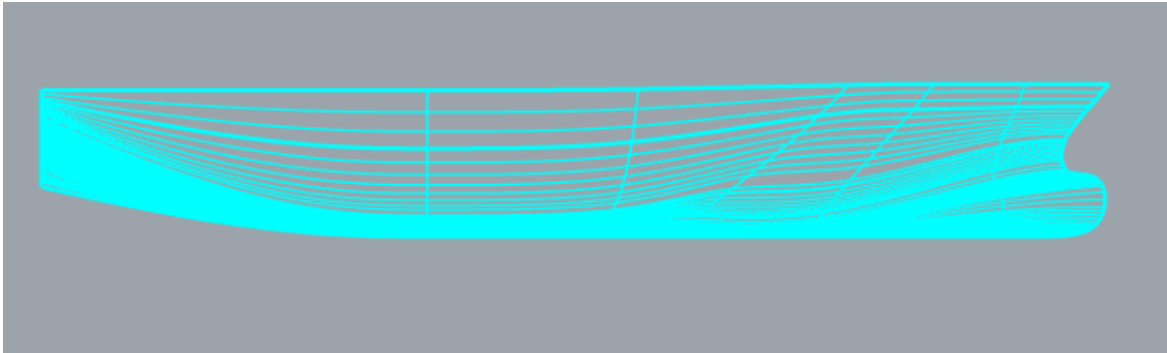
Nota: elaboración propia.

6.1.13 Resistencia al avance de Casco 4 a velocidad de 20 nudos

Se presenta la forma geométrica del Casco 4 con velocidad de navegación del casco de 20 nudos, así también el perfil de olas, presión sobre el casco y perfil de velocidades por la resistencia al avance.

Figura 6.47

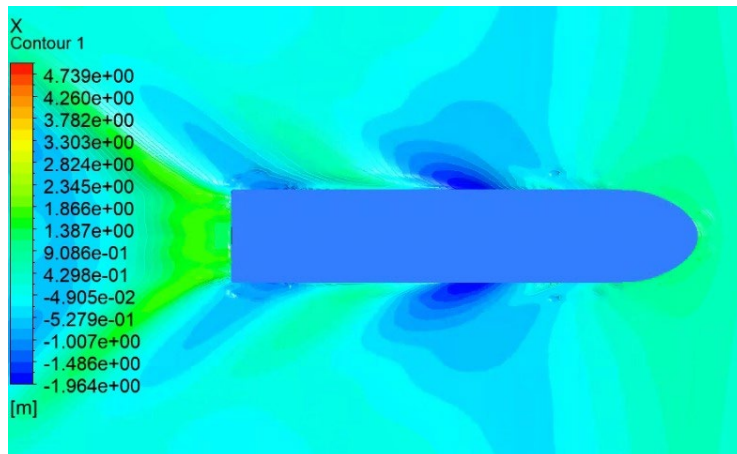
Vista longitudinal del 3D del Casco 4.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.48

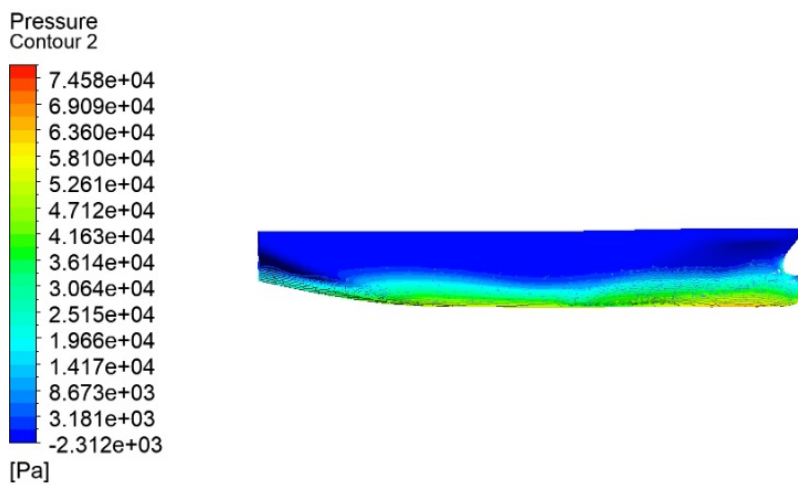
Vista de planta de Casco 4 y perfil de olas a 20 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.49

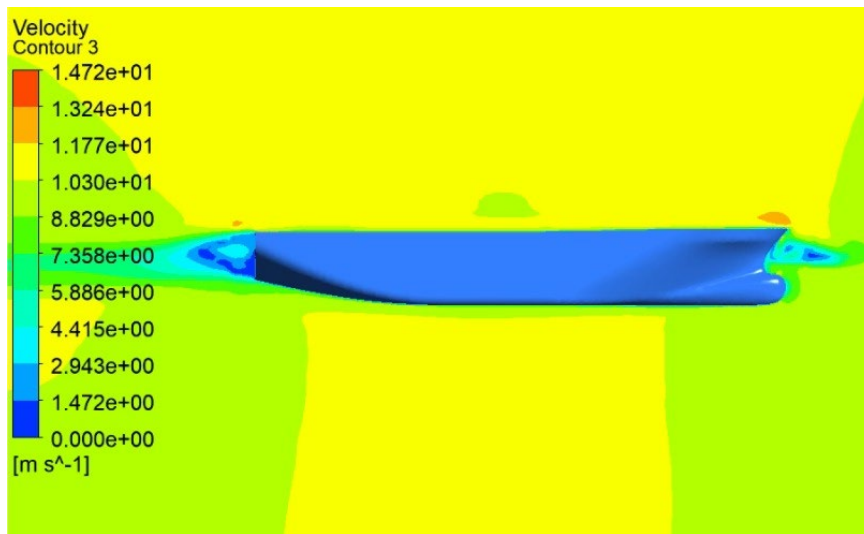
Presión sobre el Casco 4 a 20 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.50

Perfil de velocidad del Casco 4 a 20 nudos.



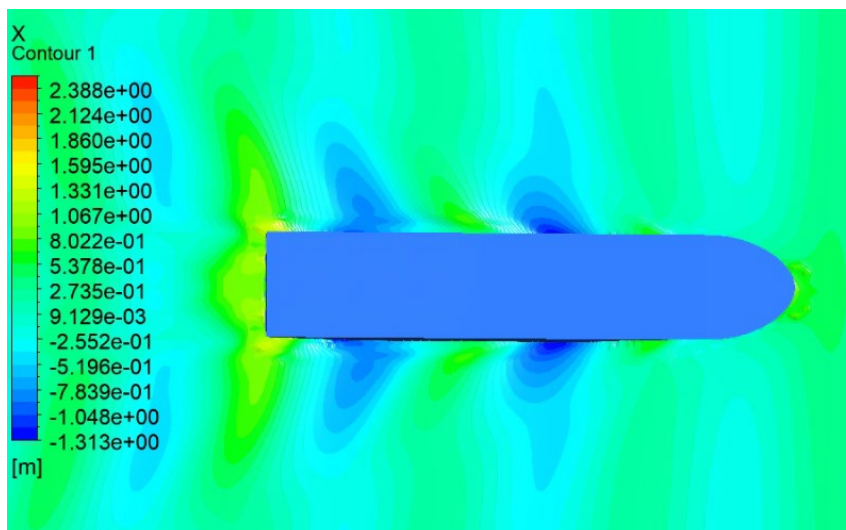
Nota: elaboración propia.

6.1.14 Resistencia al avance de Casco 4 a velocidad de 15 nudos

Se presenta la forma geométrica del Casco 4 con velocidad de navegación del casco de 15 nudos, así también el perfil de olas, presión sobre el casco y perfil de velocidades por la resistencia al avance.

Figura 6.51

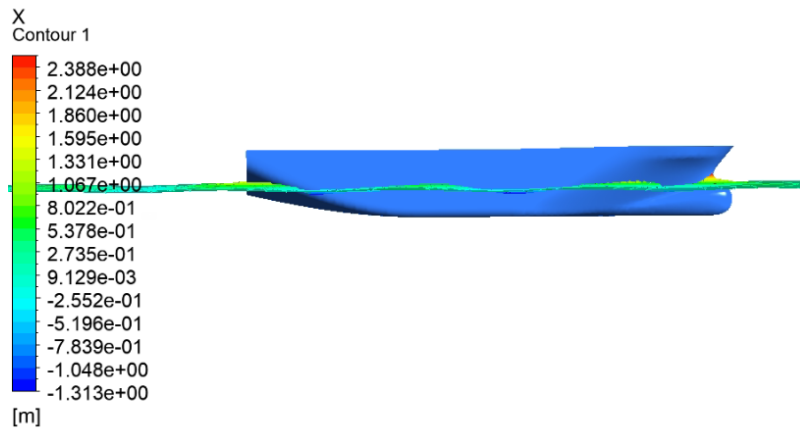
Vista de planta de Casco 4 y perfil de olas a 15 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.52

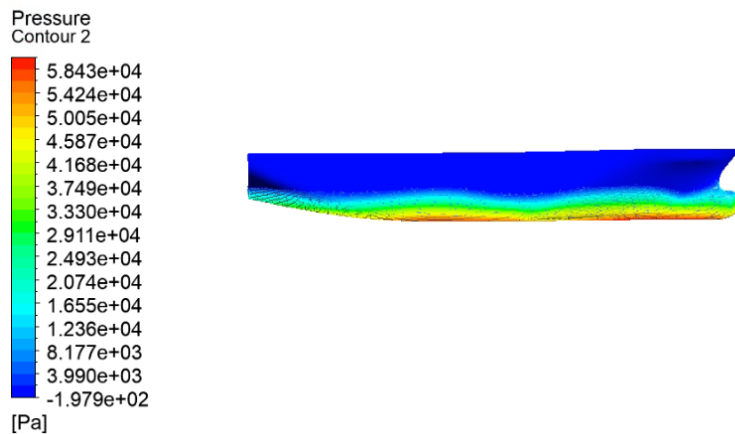
Vista longitudinal de Casco 4 y perfil de olas a 15 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.53

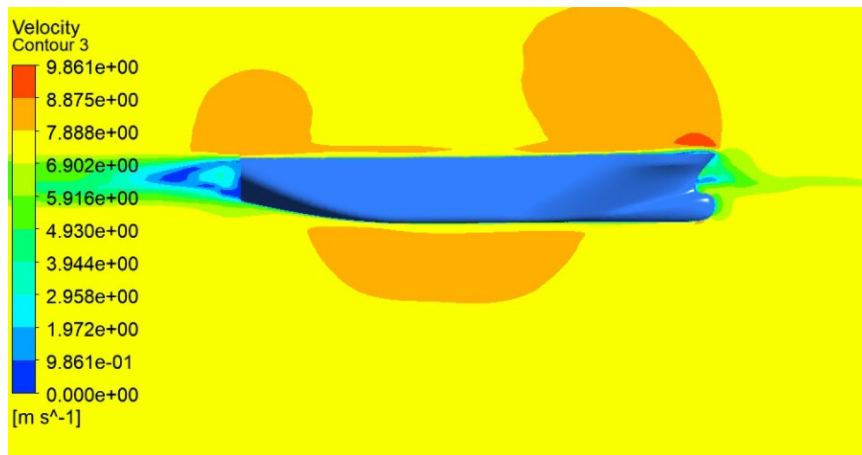
Presión sobre el Casco 4 a 15 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.54

Perfil de velocidad del Casco 4 a 15 nudos.



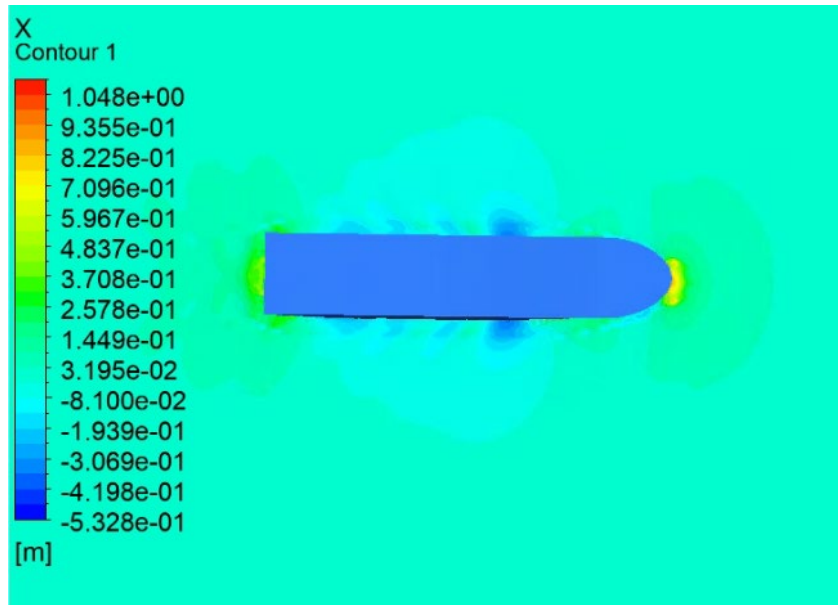
Nota: elaboración propia.

6.1.15 Resistencia al avance de Casco 4 a velocidad de 10 nudos

Se presenta la forma geométrica del Casco 4 con velocidad de navegación del casco de 10 nudos, así también el perfil de olas, presión sobre el casco y perfil de velocidades por la resistencia al avance.

Figura 6.55

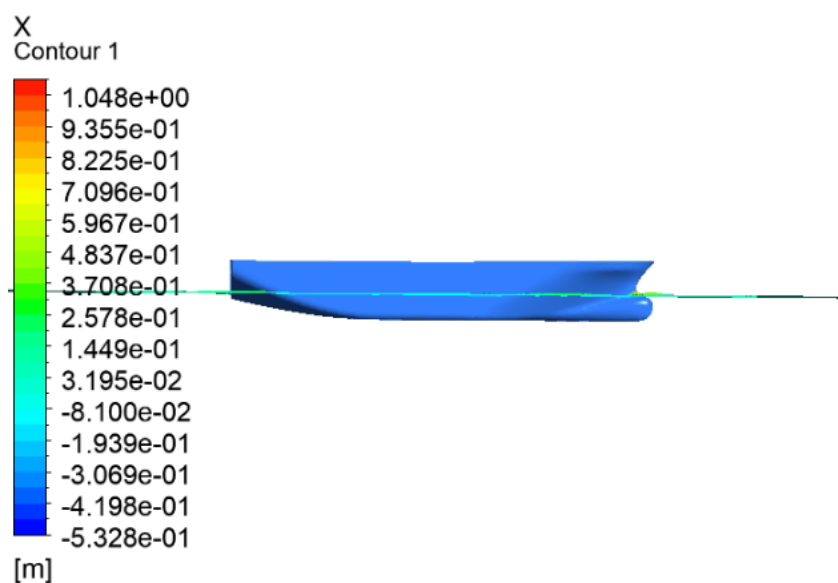
Vista de planta de Casco 4 y perfil de olas a 10 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.56

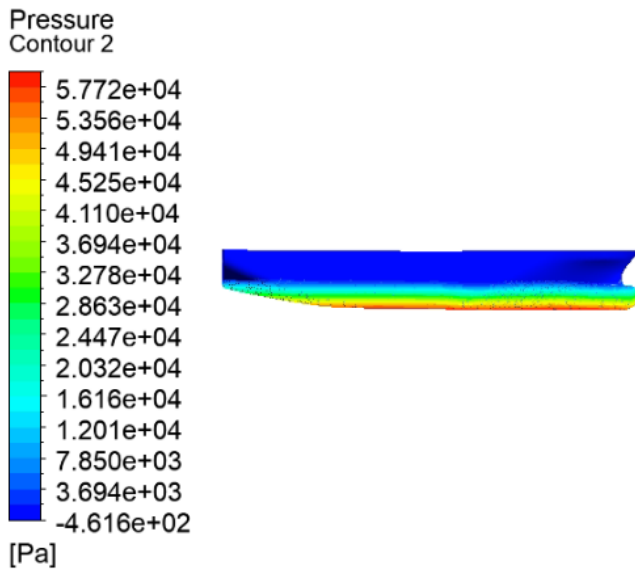
Vista longitudinal de Casco 4 y perfil de olas a 10 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.57

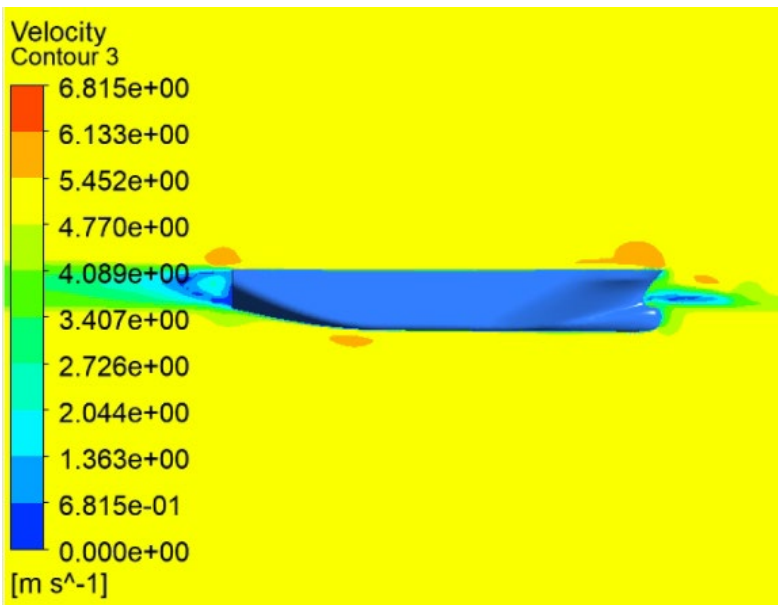
Presión sobre el Casco 4 a 10 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.58

Perfil de velocidad del Casco 4 a 10 nudos.



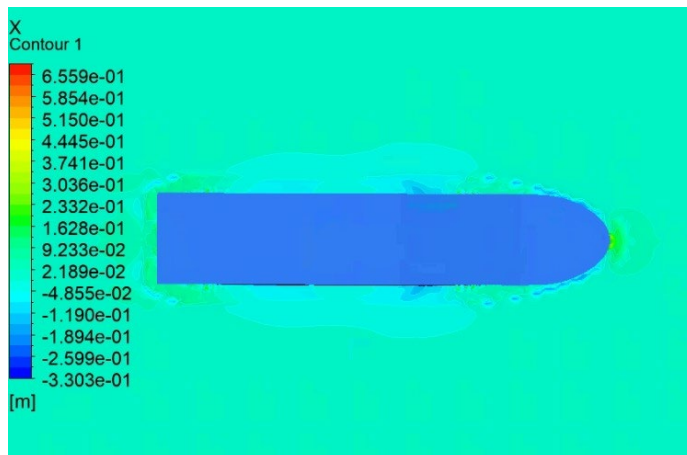
Nota: elaboración propia.

6.1.16 Resistencia al avance de Casco 4 a velocidad de 5 nudos

Se presenta la forma geométrica del Casco 4 con velocidad de navegación del casco de 5 nudos, así también el perfil de olas, presión sobre el casco y perfil de velocidades por la resistencia al avance.

Figura 6.59

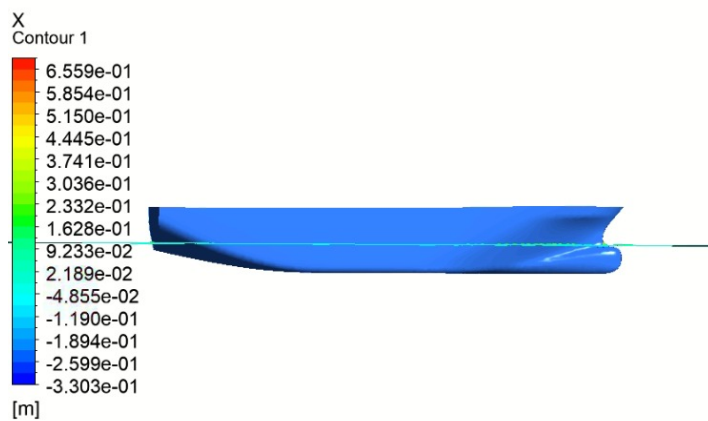
Vista de planta de Casco 4 y perfil de olas a 5 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.60

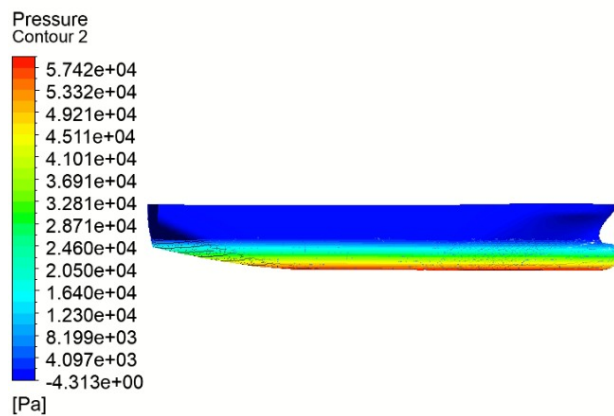
Vista longitudinal de Casco 4 y perfil de olas a 5 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.61

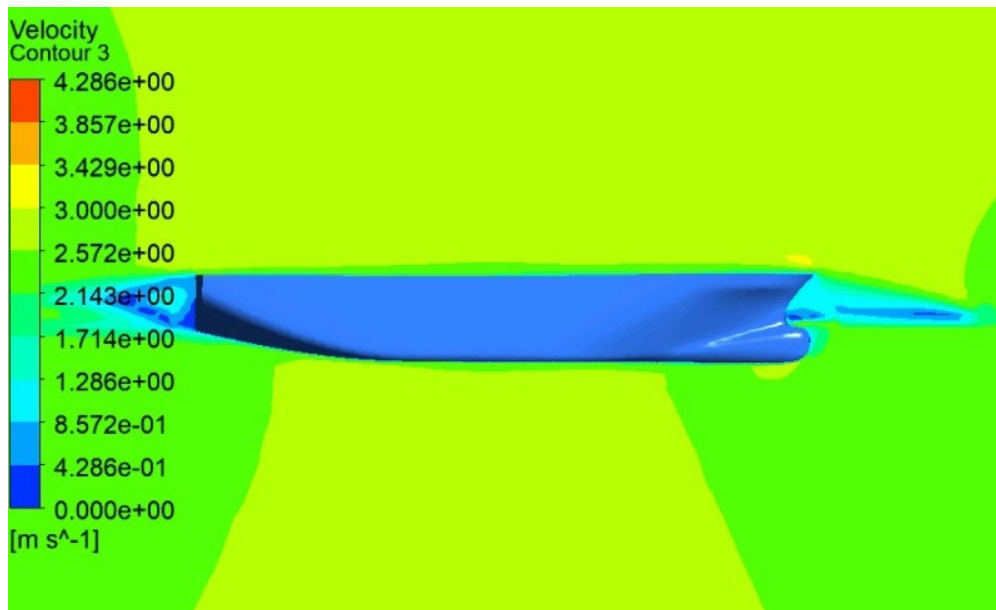
Presión sobre el Casco 4 a 5 nudos.



Nota: elaboración propia.

Figura 6.62

Perfil de velocidad del Casco 4 a 5 nudos.



Nota: elaboración propia.

6.2 RESULTADOS

6.2.1 Resultados de la resistencia al avance

Aquí se presenta una tabla de la resistencia al avance calculada para cada tipo de casco y en las cuatro velocidades de navegación desarrolladas, ver Tabla 6.1. Del mismo, se obtiene una figura con las curvas de resistencia al avance para su comparación, ver Figura 6.63.

Tabla 6.1

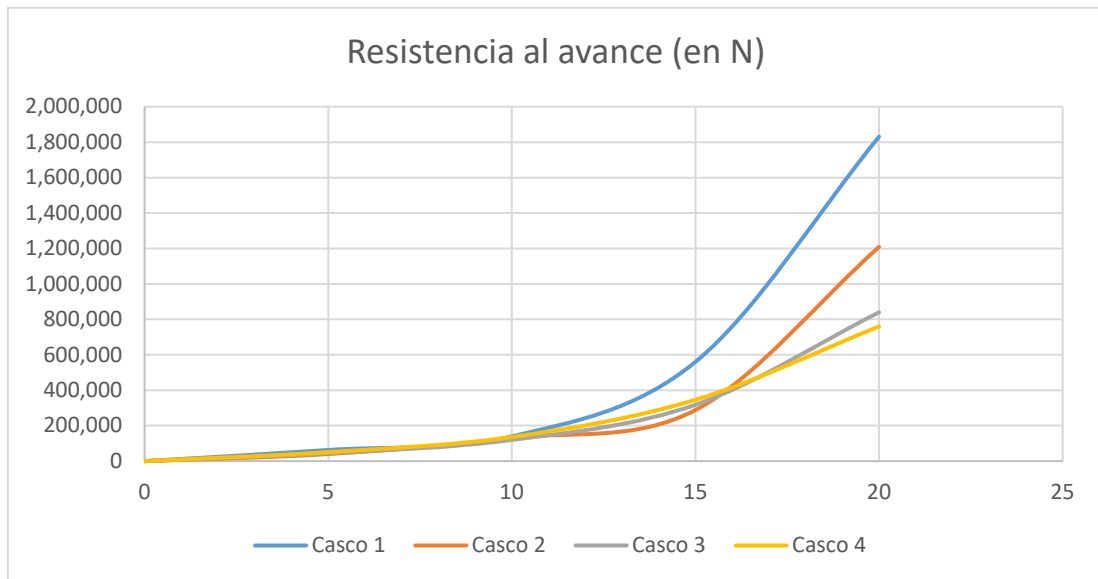
Resumen de la resistencia al avance por casco (en N) a diferentes velocidades.

Vel. (nudos)	Casco 1	Casco 2	Casco 3	Casco 4
0	0	0	0	0
5	62.782	40.020	44.000	50.800
10	139.502	130.240	119.500	136.000
15	560.000	288.312	318.000	346.000
20	1.831.312	1.209.090	840.000	760.000

Nota: elaboración propia

Figura 6.63

Resistencia al avance vs casco y velocidad.



Nota: elaboración propia.

CONCLUSIONES

A partir de las simulaciones numéricas desarrolladas en este trabajo se puede concluir lo siguiente:

Se realizó una alteración del bulbo de proa observándose una disminución de la resistencia cuando la eslora del bulbo del “casco 4” aumenta. Esto repercute en la ecuación paramétrica planteada en la forma de la proa del casco. Además, a medida que aumenta este parámetro de la eslora del bulbo, la velocidad ya no es significativa. Como se puede observar en la curva de la Figura 6.63, el comportamiento se torna creciente a partir de 15,5 m/s.

Otro parámetro del bulbo es el coeficiente de bloque del bulbo variando desde un modelo sin bulbo hasta un modelo con bulbo de proa. El coeficiente de bulbo de proa aumenta considerando un modelo de gota invertida, este parámetro afecta la resistencia al avance y es considerado significativo en las ecuaciones paramétricas utilizadas en este trabajo.

La continuidad del casco y bulbo de proa es considerada de forma tangencial para generar una integridad del casco, esto es, continuidad de la superficie mojada para evaluación de la resistencia al avance. Esta consideración tangencial es otro parámetro significativo para el modelo 3D generado por las ecuaciones paramétricas.

Los cascos fueron elaborados mediante ecuaciones paramétricas solo para la proa del casco mediante de funcionalidad intrínseca de CAESES y, como se puede observar, la continuidad del casco no es afectada, conservándose la forma íntegra entre el casco y el bulbo de proa, generándose en total 4 cascos; por ende, es posible generar una matriz de

estos, sin necesidad de generarlos de forma individual, sino solo realizando la variación de la eslora del bulbo.

En el caso de los parámetros del casco, la eslora, manga y puntal no fueron afectadas porque se observan en las diferentes simulaciones numéricas la continuidad del flujo de presiones en los diferentes casos. Estos parámetros del casco son considerados en la funcionalidad intrínseca de CAESES.

RECOMENDACIONES

Las recomendaciones que se desprenden del trabajo de investigación son:

- Realizar más modelos en los que se modifique el parámetro del bulbo conservando las dimensiones del casco original, es decir, presentar más casos, sin embargo, contar con el gasto computacional y reconocer las limitaciones del procesamiento de datos por un ordenador.
- Modificar un parámetro más del casco. Para comenzar, podría ser una dimensión además del bulbo, entonces, según el número de casos de modificación del bulbo se multiplicaría por el número de casos del parámetro de dimensión escogida, que puede ser la manga o eslora. Se recomienda no modificar el puntal, pero en el caso que se piense en ello, se tiene que realizar un estudio diferenciado.
- Utilizar otra embarcación y contrastar con este estudio en el desarrollo de la resistencia al avance. Se recomienda realizar una fórmula de correlación.

BIBLIOGRAFÍA

- Ang, J. H., Goh, C., Choo, C. T., Juveno, Lee, Z. M., Jirafe, V. P., & Li, Y. (2019). Evolutionary Computation Automated Design of Ship Hull Forms for the Industry 4.0 Era. 2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2019 - Proceedings, 2347–2354. <https://doi.org/10.1109/CEC.2019.8789905>
- Capote, J. A., Alvear, D., Abreu, O. V, Lázaro, M., & Espina, P. (2008). Influencia del modelo de turbulencia y del refinamiento de la discretización espacial en la exactitud de las simulaciones computacionales de incendios. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 24(3), 227–245.
- Choo, C. T., Ang, J. H., Kuik, S., Hui, L. C. M., Li, Y., & Goh, C. (2020). Ship Design with a Morphing Evolutionary Algorithm. 2020 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2020 - Conference Proceedings, 1–8. <https://doi.org/10.1109/CEC48606.2020.9185645>
- Cormen, T., Leiserson, C., Rivest, R. & Stein, (2009). *Introduction to Algorithms* (3rd ed.). MIT Press.
- Feng, B., Hu, C., Liu, Z., Zhan, C., & Chang, H. (2011). Ship resistance performance optimization design based on CAD / CFD. 2011 3rd International Conference on Advanced Computer Control, ICACC 2011, Icacc, 251–255. <https://doi.org/10.1109/ICACC.2011.6016408>
- Harries, S., & Abt, C. (2018). CAESES—The HOLISHIP Platform for Process Integration and Design Optimization. *A Holistic Approach to Ship Design*, 247–293. [doi:10.1007/978-3-030-02810-7_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-02810-7_8)

- Hernández-Sampieri, R., Fernández Collado, C., Baptista Lucio, M., Méndez Valencia, S., & Mendoza Torres, C. P. (2014). Metodología de la investigación. 6ta ed.
- Huenante Ilauca, W. R. (2018). Estudio Experimental De Resistencia Al Avance En Barcas Menores. Universidad Austral de Chile.
- Jeong, S., & Kim, H. (2013). Development of an efficient hull form design exploration framework. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/838354>
- Laín Beatove, S., (2014). La simulación numérica en problemas de ingeniería. *El Hombre y la Máquina*, (44),5-6. ISSN: 0121-0777. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47832683001>
- Marzi, J., & Broglia, R. (2018). Hydrodynamic Tools in Ship Design. A Holistic Approach to Ship Design, 139–207. doi:10.1007/978-3-030-02810-7_6
- Nikolopoulos, L., & Boulougouris, E. (2020). A novel method for the holistic, simulation driven ship design optimization under uncertainty in the big data era. *Ocean Engineering*, 218 (March 2019), 107634. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107634>
- Norton, T. & Sun, D. (2006). Computational fluid dynamics (CFD) – an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.05.004>
- Park, D.-W., & Choi, H.-J. (2013). Hydrodynamic Hull Form Design Using an Optimization Technique. *International Journal of Ocean System Engineering*, 3(1), 1–9. <https://doi.org/10.5574/ijose.2013.3.1.001>
- Park, J. H., Choi, J. E., & Chun, H. H. (2015). Hull-Form optimization of KSUEZMAX to enhance resistance performance. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7(1), 100–114. <https://doi.org/10.1515/ijnaoe-2015-0008>

- Plano-Clark, V., & Ivankova, N. (2016). What is mixed methods research?: considering how mixed methods research is defined. In V. Plano-Clark, & N. Ivankova (Eds.), *Mixed methods research: A guide to the field* (pp. 55-78). Sage.
<https://doi.org/10.4135/9781506335193>
- Serani, A., Fasano, G., Liuzzi, G., Lucidi, S., Iemma, U., Campana, E. F., ... Diez, M. (2016). Ship hydrodynamic optimization by local hybridization of deterministic derivative-free global algorithms. *Applied Ocean Research*, 59, 115–128.
[doi:10.1016/j.apor.2016.04.006](https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.04.006)
- Suzuki, K., Kai, H., & Kashiwabara, S. (2005). Studies on the optimization of stern hull form based on a potential flow solver. *Journal of Marine Science and Technology*, 10(2), 61–69. <https://doi.org/10.1007/s00773-005-0198-x>
- Tahara, Y., Peri, D., Campana, E. F., & Stern, F. (2011). Single-and multiobjective design optimization of a fast multihull ship: Numerical and experimental results. *Journal of Marine Science and Technology*, 16(4), 412–433. <https://doi.org/10.1007/s00773-011-0137-y>
- Tahara, Y., Tohyama, S., & Katsui, T. (2006). CFD-based multi-objective optimization method for ship design. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 52(5), 499–527. <https://doi.org/10.1002/flid.1178>
- Thévenin, D., & Janiga, G. (Eds.). (2008). *Optimization and computational fluid dynamics*. Springer Science & Business Media.
- YANG, C., & HUANG, F. (2016). An overview of simulation-based hydrodynamic design of ship hull forms. *Journal of Hydrodynamics*, 28(6), 947–960.
[https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(16\)60696-0](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(16)60696-0)