



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

**“DISEÑO, OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL DE SALA DE
MAQUINA Y MANIOBRABILIDAD DE UN BUQUE GRANELERO
DE 2500 TPM”**

PROYECTO INTEGRADOR.

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO NAVAL

Presentado por:

ÁNGEL BERNABÉ RUÍZ GONZÁLEZ

CHRISTOPHER RUBÉN VILLALTA MIRANDA

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2016

AGRADECIMIENTO

A Dios por haberme bendecido permitiéndome alcanzar este gran logro en mi vida.

A mis queridos padres Walter Villalta y Melba Miranda, quienes con sus esfuerzos y sacrificios ayudaron a culminar esta primera etapa de mi vida profesional. A mis hermanos, Wendy, Luis, Milady y a mis amigos quienes estuvieron conmigo cuando más los necesite.

A mi director y codirector de proyecto integrador MSC. Johnny Domínguez y PhD. Rubén Paredes, por sus recomendaciones brindadas en el desarrollo de este proyecto. Y a mis profesores por brindarme sus conocimientos a lo largo de esta trayectoria.

Christopher Villalta Miranda

Agradezco a Dios por darme la bendición de poder culminar esta etapa. A mi madre por ser ese pilar en mi vida. Familiares y amigos que estuvieron ahí cuando los necesité. A mis profesores por compartir sus conocimientos, en especial a mi tutor de proyecto, el Ing. Franklin J. Domínguez.

Ángel Ruíz González

DEDICATORIA

A mis amados padres Walter Villalta y Cecilia Miranda a quienes estaré eternamente agradecido por haberme inculcado principios y valores que ayudaron a formarme tanto en lo moral como en lo profesional.

Christopher Villalta Miranda

A la mujer de mi vida, mi madre, sin su sacrificio, enseñanza y esfuerzo, jamás habría logrado este primer triunfo. A mis familiares, los amo.

Ángel Ruíz González

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

Msc. Johnny Domínguez Ruiz

PROFESOR EVALUADOR

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

ÁNGEL RUÍZ G.

CHRISTOPHER
VILLALTA M.

ABREVIATURAS.

DC	Diseño Conceptual
DP	Diseño Preliminar
DD	Diseño Definitivo
L	Eslora
L _{pp}	Eslora entre perpendiculares
L _{wl}	Eslora de flotación
B	Manga
D	Puntal
T	Calado
V	Velocidad de diseño
Δ	Desplazamiento total.
F _n	Coefficiente Froud
C _b	Coefficiente de bloque
GM	Altura metacéntrica
C _m	Coefficiente de sección media
C _p	Coefficiente prismático
C _{wl}	Coefficiente de plano de flotación
F _{vol}	Coefficiente de Froud volumétrico
A _p	Área de plano de Flotación
CP	Factor de carga
KB	Centro de boyantes
B _{mt}	Radio metacéntrico transversal
L _{cb}	Centro longitudinal de flotación
C _t	Coefficiente de transporte
W _{Muerto}	Toneladas de peso muerto
W _{Ligero}	Peso Ligero del Buque
W _{ST}	Peso del acero de la embarcación
W _Q	Peso de la maquinaria.
W _{OA}	Peso del Equipo y Habilitación.
R _{td}	Valoración de la capacidad.
Min	mínimo.
Max	máximo.
Ref.	Refuerzo

Td.	Turno diurno
Tn.	Turno Nocturno
I	Inercia
Comp.	Compartimento
s	espaciamiento entre refuerzos
AR	Área del timón
Rad	Radianes
KG	Centro de gravedad
HH	Hombre hora
GZ	Brazo adrizante
GT	arqueo bruto
WR	Peso en rosca
Rn	Número de Reynolds
S	Área sumergida
A _T	Área transversal sobre la línea de flotación
r	Velocidad de giro del buque
DG	Diámetro de giro del buque
DT	Diámetro táctico del buque
AV	Avance del buque
TR	Transferencia del buque

SIMBOLOGÍA.

m	Metros
Kn	Nudos
KN	Kilo Newtons
N	Newtons
TPM	Toneladas de Peso Muerto
MN	Millas Náuticas
Ton	Toneladas
mm	milímetros
Kg	Kilogramos
m ²	Metros cuadrados
m ³	Metros cúbicos
HP	Horse Power
RPM	Revoluciones por minuto
\$	Dólar

RESUMEN

El diseño de la embarcación está sujeto a los requerimientos básicos exigidos por el armador, tomando como una de las restricciones más influyentes el calado máximo de acceso a los puertos de Guayaquil.

En este párrafo se ha sintetizado lo que se está aportando en el presente informe, en los dos primeros Capítulos Conceptual y Preliminar se ha aplicado la metodología de la espiral de diseño para obtener de manera preliminar las dimensiones, formas, distribución general, estructura y propulsión de la embarcación, ya en el tercer capítulo, se desarrolló la optimización de las formas y estructura de la embarcación de tal manera que se logre obtener las dimensiones, formas, estructura, y potencia de propulsión final de la embarcación.

En el tercer capítulo del proyecto se ha enfatizado el desarrollo de la optimización del compartimento de la sala de máquina aplicando un análisis de elementos finitos con la ayuda del software Ansys 15.0, la geometría del compartimento fue generado en SolidWorks para posteriormente realizar su verificación estructural mediante la aplicación del software de elementos finitos. Por otra parte, se realizó la mejora de las formas definitivas agregando un bulbo de proa y popa, logrando disminuir la resistencia al avance de la embarcación, este análisis se lo realizó utilizando el software OpenFoam y como verificación de estos resultados obtenidos se utilizó el software Maxsurf aplicando el método de Holtrop, logrando obtener una diferencia del 1 a 9% entre estos valores. Obteniendo una resistencia total al avance con apéndices de 121.92 [kN].

Las características de maniobrabilidad han sido evaluadas usando un modelo no lineal basado en la geometría y propiedades de masa del buque. Este modelo matemático presenta un análisis del movimiento de la embarcación con 3 grados de libertad como son avance en X (avance), Y (desplazamiento lateral) y N (giro alrededor el eje z) desde su centro de gravedad. Este modelo utiliza las formulaciones presentadas por [1]. Que han sido implementadas en un código de Matlab y aplicadas a la geometría del buque granelero, el resultado se lo ha comparado con el método lineal y lineal corregido del modelo, teniendo como resultado que el modelo no lineal con pequeños ángulos de giro del timón se aproxima a los resultados obtenidos para el círculo de evolución con el método lineal corregido. Sin embargo, al aumentar el ángulo del timón la diferencia entre estos dos métodos es considerable. Esto es debido a que la velocidad de giro para pequeños ángulos es similar entre el método lineal corregido y el método no lineal, mientras

que para grandes ángulos la velocidad de giro resultante es más elevada para el método no lineal.

Ya en el cuarto capítulo se ha realizado un análisis económico orientado a la recuperación de la inversión inicial generada por construcción y posterior operación del buque, una de las mejores opciones que se idearon para generar ingresos es fletar la embarcación a modo de casco desnudo, es decir, el propietario pondrá las condiciones de pago al fletador

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	II
DEDICATORIA	III
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN.....	IV
DECLARACIÓN EXPRESA.....	V
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VIII
RESUMEN	IX
ÍNDICE GENERAL.....	XI
INDICE DE TABLA	XV
ÍNDICE DE FIGURAS	XX
ÍNDICE DE ANEXOS	XXIV
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1.....	3
1. DISEÑO CONCEPTUAL	3
1.1 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO PRELIMINAR	3
1.1.1. Alcance del Proyecto.....	3
1.1.2. Requerimientos básicos del diseño	4
1.1.3. Restricciones de Diseño.....	4
1.2 DISEÑO CONCEPTUAL	5
1.2.1 ESTIMACIÓN DE DIMENSIONES PRINCIPALES	5
1.2.2 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS HIDROSTÁTICOS.....	5
1.2.3 ESTIMACIÓN DE PESOS Y DESPLAZAMIENTO.....	6
1.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL DISEÑO CONCEPTUAL.....	7
CAPITULO 2.....	8
2. DISEÑO PRELIMINAR.....	8
2.1. GENERACIÓN DE FORMAS.....	8
2.1.1 Justificación del bulbo de proa	8

2.2.	DISTRIBUCIÓN GENERAL	10
2.3.	CÁLCULOS DE ARQUITECTURA NAVAL.....	14
2.4.	RESISTENCIA ESTRUCTURAL	20
2.4.1.	Cálculos	20
2.4.2.	Verificación de Resultados obtenidos con el software Poseidón.	22
2.5.	MANIOBRABILIDAD	23
2.5.1.	Análisis del plano diametral.....	24
2.5.2.	Análisis regresional de maniobrabilidad.	25
2.6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL DISEÑO PRELIMINAR.....	27
CAPITULO 3.....	28	
3. DISEÑO DEFINITIVO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS	28	
3.1.	INTRODUCCIÓN.....	28
3.2.	OPTIMIZACIÓN DE FORMAS PRELIMINARES Y GENERACIÓN DE LA LIBRERÍA DE PROTOTIPOS 29	
3.2.1.	Generación de Formas.....	29
3.2.2.	Desarrollo de la librería de prototipos	30
3.3.	RESTRICCIONES DE ARQUITECTURA, RESISTENCIA Y PROPULSIÓN Y MANIOBRABILIDAD .	31
3.3.1.	Arquitectura Naval.....	31
3.3.2.	Validación de códigos de arquitectura naval.....	35
3.3.3.	Resistencia y propulsión	36
3.3.4.	Validación de código de resistencia y Propulsión.	36
3.3.5.	Maniobrabilidad.....	37
3.3.6.	Validación de códigos de maniobrabilidad.....	38
3.4.	DESARROLLO DEL GRUPO 100: ESTRUCTURA, PESO Y MANO DE OBRA.....	41
3.4.1.	Metodología	41
3.4.2.	Restricciones.....	43
3.4.3.	Método de cálculo de Hombre Hora y factor Gamma	44
3.4.4.	Resultados	46
3.5.	DESARROLLO DE LA OPTIMIZACIÓN DE DIMENSIONES PRINCIPALES.....	48
3.5.1.	Metodología de optimización.....	48
3.5.2.	Generación de la función Objetivo.....	49
3.5.3.	Selección del método de optimización.....	51
3.5.4.	Aplicación del método de optimización y verificación de restricciones.....	52
3.6.	RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN.....	55

3.6.1.	Características principales del diseño definitivo	55
3.6.2.	Formas obtenidas de la optimización	56
3.6.3.	Estructura del diseño definitivo.....	56
3.7.	CÁLCULO DE LA GEOMETRÍA DE UN BULBO PARA EL DISEÑO DEFINITIVO.....	59
3.7.1.	Resultados del diseño del bulbo para el diseño definitivo.....	60
3.8.	CÁLCULO DE RESISTENCIA AL AVANCE DEL DISEÑO DEFINITIVO USANDO EL MÉTODO DE HOLTROP.....	63
3.9.	CÁLCULO DE RESISTENCIA AL AVANCE DEL DISEÑO DEFINITIVO CON Y SIN BULBO APLICANDO CFD.	64
3.9.1.	Modelado y Mallado	64
3.9.2.	Rango de velocidades a analizar.....	66
3.9.3.	Resultados obtenidos para la resistencia al avance por CFD	67
3.9.3.1.	Resistencia al avance sin bulbo	67
3.9.3.2.	Resistencia al avance con bulbo	69
3.9.4.	Análisis de resultados de la simulación con el modelo.	72
3.10.	SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA MANIOBRABILIDAD USANDO UN MODELO NO LINEAL BASADO EN LA GEOMETRÍA Y PROPIEDADES DE MASA DEL BUQUE.....	78
3.10.1.	Objetivo.....	78
3.10.2.	Introducción.....	78
3.10.3.	Embarcación	78
3.10.4.	Modelo Matemático	79
3.10.5.	Validación del modelo	82
3.10.6.	Resultados de evaluar las características de maniobrabilidad.....	86
3.11.	OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL COMPARTIMENTO DE SALA DE MÁQUINA MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS.	88
3.11.1.	Escantillón del compartimento.....	89
3.11.2.	Modelado del Compartimento	93
3.11.3.	Restricciones de deflexión y esfuerzo por la Sociedad de Clasificación.	94
3.11.4.	Aplicación del software de elementos finitos	96
CAPITULO 4	103
4.	ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO.....	103
4.1.	CONSIDERACIONES PARA EL ANÁLISIS	103
4.2.	COSTO DEL PROYECTO	104
4.3.	COSTOS DE OPERACIÓN.....	108

4.4.	INVERSIÓN Y FINANCIAMIENTO	109
4.5.	INGRESOS	110
4.6.	TASA DE DESCUENTO.....	110
4.7.	FLUJO DE CAJA	111
4.8.	PUNTO DE EQUILIBRIO PARA LA DEMANDA.....	114
	BIBLIOGRAFÍA	118
	ANEXOS.....	121

INDICE DE TABLA

Tabla No. 1	Requerimientos de diseño.....	4
Tabla No. 2.	Restricción de calado.....	5
Tabla No. 3.	Dimensiones estimadas – DC.	5
Tabla No. 4.	Parámetros estimados – DC.....	6
Tabla No. 5.	Resumen de pesos – DC	7
Tabla No. 6.	Parámetros para bulbo de proa– DP.....	9
Tabla No. 7.	Abscisa de máxima protuberancia (adimensional) – DP.....	10
Tabla No. 8.	Ubicación de mamparos, siendo positivo hacia proa - DP.	12
Tabla No. 9.	Capacidad de Carga y Lastre al 100% - DP.	13
Tabla No. 10.	Combustible y agua dulce al 100% - DP.	13
Tabla No. 11.	Cálculos hidrostáticos 10% consumibles (a) – DP.....	14
Tabla No. 12.	Cálculos hidrostáticos 10% consumibles (b) – DP.....	15
Tabla No. 13.	Análisis de criterios de estabilidad - DP.	18
Tabla No. 14.	Resultados del criterio meteorológico - DP.....	19
Tabla No. 15.	Comparación - Diseño Preliminar y Conceptual.	20
Tabla No. 16.	Espesores de Planchaje - DP.	21
Tabla No. 17.	Elementos longitudinales secundarios de sección media.....	21
Tabla No. 18.	Validación de escantillón.....	23
Tabla No. 19.	Área min. y máx. permitida del timón para un buque de carga.	24
Tabla No. 20.	Verificación de la geometría del timón-DP.	25
Tabla No. 21.	Comparación de Resultados, círculo de evolución – DP.....	26
Tabla No. 22.	Resultados de los Índices de Maniobrabilidad - DP.	26
Tabla No. 23.	Validación de parámetros de series 60.....	29
Tabla No. 24.	Intervalo para la matriz de los prototipos.....	30

Tabla No. 25. Librería de Prototipos.	31
Tabla No. 26. Condiciones de estabilidad por IMO.....	32
Tabla No. 27. Parámetros para el cálculo de la aceleración de rolido.....	35
Tabla No. 28. Rango de Aplicación de J. Holtrop and Mermen GGJ.....	36
Tabla No. 29. Criterio para evaluar el diámetro táctico.	38
Tabla No. 30. Datos ingresados para evaluar la habilidad de detenerse.....	39
Tabla No. 31. . Calculo de la Distancia de parada.....	40
Tabla No. 32. Resultados regresionales de maniobrabilidad - Matlab.	41
Tabla No. 33. Comparación de Resultados regresionales.	41
Tabla No. 34. Valores de HH/Ton acorde al espesor del panel.....	45
Tabla No. 35. Factor de incremento por complejidad.....	46
Tabla No. 36. Presiones de Diseño por compartimento.	46
Tabla No. 37. Comparación de costado 1, entre valores de Matlab y Poseidón	47
Tabla No. 38. Comparación de costado 2, entre valores de Matlab y Poseidón	48
Tabla No. 39 Costos de producción del Grupo 100 y 200	51
Tabla No. 40. Restricciones de Arquitectura y Maniobrabilidad.	52
Tabla No. 41. Intervalo inicial para el algoritmo genético.	52
Tabla No. 42. Resultados parciales del intervalo inicial.	53
Tabla No. 43. Intervalos A y B para el algoritmo genético.....	53
Tabla No. 44. Resultados para el intervalo B.	54
Tabla No. 45. Intervalo final para el algoritmo genético.....	54
Tabla No. 46. Resultados para el intervalo final.....	54
Tabla No. 47. Principales características del diseño definitivo.	55
Tabla No. 48. Estructura de cubierta del Diseño definitivo.....	56
Tabla No. 49. Estructura de costado del Diseño definitivo (a).	57
Tabla No. 50. Estructura de costado del Diseño definitivo (b).	57

Tabla No. 51. Estructura de fondo del Diseño definitivo	58
Tabla No. 52. Espaciamiento entre refuerzos longitudinales.	58
Tabla No. 53. Parámetros del bulbo de proa para el diseño definitivo.	59
Tabla No. 54. Resistencia Total del buque en función de Sa20 y h.....	60
Tabla No. 55 Dimensiones estimadas para la Geometría del bulbo.	61
Tabla No. 56. Dimensiones finales para la Geometría del bulbo.	62
Tabla No. 57. Principales características del diseño definitivo con bulbo.....	62
Tabla No. 58. Dominio considerado para todas las simulaciones.....	65
Tabla No. 59. Rango de velocidades a analizar.....	66
Tabla No. 60. Comparación de resultados de Resistencia de CFD y Holtrop.....	68
Tabla No. 61 Comparación de resultados de Resistencia de CFD sin bulbo.....	69
Tabla No. 62 Comparación de resultados de Resistencia de CFD con bulbo.	71
Tabla No. 63. Comparación de resultados de Resistencia de CFD.....	75
Tabla No. 64. Calculo del Coeficiente de resistencia residual.	76
Tabla No. 65. Calculo de la Resistencia al avance de la embarcación.	76
Tabla No. 66 Principales características para la prueba de	78
Tabla No. 67 Rango de aplicación de las formulaciones de Lyster.	82
Tabla No. 68 Resultados del círculo de evolución - Lyster.....	83
Tabla No. 69 Características de maniobrabilidad – Resultados Regresionales.	86
Tabla No. 70. Características de maniobrabilidad – Modelo no lineal.....	86
Tabla No. 71. Características de maniobrabilidad – Modelo lineal corregido.....	87
Tabla No. 72. Características de maniobrabilidad – Modelo lineal corregido.....	87
Tabla No. 73. Perfiles de superestructura – POSEIDON.....	90
Tabla No. 74. Dimensión de puntales seleccionados.....	92
Tabla No. 75. Formulación para el cálculo de la base de maquinas.....	92
Tabla No. 76. Resultados de base de maquinas.....	93

Tabla No. 77. Deformación permisible.....	95
Tabla No. 78. Esfuerzo permisible.....	95
Tabla No. 79. Opciones utilizadas en el software Ansys	97
Tabla No. 80. Comparación de deformaciones -1.....	98
Tabla No. 81. Dimensión definitiva de los refuerzos del Casco.....	98
Tabla No. 82. Dimensión definitiva de los refuerzos de Superestructura.....	99
Tabla No. 83. Comparación de deformaciones finales.....	100
Tabla No. 84. Comparación de esfuerzos	100
Tabla No. 85. Modos de Vibración (F. natural V F. aspas).....	102
Tabla No. 86. Distribución de costos.....	103
Tabla No. 87. Plantel laboral.....	104
Tabla No. 88. Costo total de construcción.....	105
Tabla No. 89. Total de activos fijos.....	107
Tabla No. 90. Vida útil.....	108
Tabla No. 91. Costos de operación.	109
Tabla No. 92. Inversión Inicial.	109
Tabla No. 93. Tabla de amortización.	110
Tabla No. 94. Cálculo del VAN.....	112
Tabla No. 95. Parámetros de viabilidad económica.	114
Tabla No. 96. Análisis del punto de equilibrio.....	114
Tabla No. 97. Base de Datos.	122
Tabla No. 98. Cálculo del coeficiente de sección media - DP.....	126
Tabla No. 99. Cálculo del coeficiente del plano de flotación - DP.....	127
Tabla No. 100. Cálculo del coeficiente prismático - DP.	127
Tabla No. 101. Cálculo del centro de boyantes - DP.....	128
Tabla No. 102. Dotación mínima requerida en la embarcación - DP.....	130

Tabla No. 103. Características de la hélice del prototipo.	134
Tabla No. 104. Características del motor del prototipo.	134
Tabla No. 105. Distribución de casetas.	140
Tabla No. 106. Cálculos hidrostáticos Máxima Carga – DP.	142
Tabla No. 107. Análisis de estabilidad Máxima carga - DP.	145
Tabla No. 108. Criterio Meteorológico (Máxima Carga) - DP.	146
Tabla No. 109. Datos de entrada de los prototipos - 1.	147
Tabla No. 110. Datos de entrada de los prototipos - 2.	148
Tabla No. 111. Datos de entrada de los prototipos - 3.	149
Tabla No. 112. Datos de entrada de los prototipos - 4.	150
Tabla No. 113. Valores KN de los prototipos.	151
Tabla No. 114. Espesores mínimos requeridos por la Sociedad de Clasificación.	152
Tabla No. 115. Formulaciones para el cálculo del módulo seccional.	153
Tabla No. 116. Formulaciones para el cálculo del módulo seccional.	154
Tabla No. 117. Formulaciones para el cálculo de la frecuencia natural.	155
Tabla No. 118. Formulaciones para el cálculo de pandeo le refuerzos.	156
Tabla No. 119. Flujo de Caja-(a).....	170
Tabla No. 120. Flujo de Caja-(b).....	171
Tabla No. 121. Flujo de Caja-(c).....	172

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No. 1.1 Espiral básica de diseño	3
Figura No. 2.1 Modelo 3D de la embarcación - DP.....	8
Figura No. 2.2 Dimensiones del bulbo - DP.....	9
Figura No. 2.3 Longitud Inundable – DP.....	11
Figura No. 2.4 Esquema de bodegas en 3D - DP.....	12
Figura No. 2.5 Esquema de tanques de lastre en 3D - DP.	13
Figura No. 2.6 Análisis de dos Esloras – DP.	14
Figura No. 2.7 Curvas Cruzadas 10% consumibles - DP.....	16
Figura No. 2.8 GZ vs θ – 10% consumibles - DP.....	17
Figura No. 2.9 Viento y balance intensos.	19
Figura No. 2.10 Arreglo estructural de la sección maestra – DP.....	22
Figura No. 2.11 Verificación de la cuaderna maestra con Poseidón – DP.	22
Figura No. 2.12 Geometría del Timón – DP.....	24
Figura No. 2.13 Círculo de evolución de la embarcación - Regresional.....	26
Figura No. 3.1 Cambio de formas preliminares a series 60 con $C_b=0.70$	29
Figura No. 3.2 Modelo 3D para encontrar el $K_{g\text{ estructura}}$ en Orca.....	32
Figura No. 3.3 Aceleración de rolido.....	33
Figura No. 3.4 Curva GZ para el Primer modelo - Validación.	35
Figura No. 3.5 Curva de Resistencia Total – Validación.....	37
Figura No. 3.6 Curva de Resistencia Total navegando en reversa.	39
Figura No. 3.7 Flujo para la optimización de estructura.	42
Figura No. 3.8 Metodología de optimización del proyecto.	49
Figura No. 3.9 Modelo 3D obtenido de la optimización.....	56
Figura No. 3.10 Variables consideradas para determinar la geometría del bulbo.	59
Figura No. 3.11 Modelo 3D del diseño definitivo con bulbo de proa y popa.	61

Figura No. 3.12	Resistencia al avance Vs Velocidad y Número de Froud- DD.	63
Figura No. 3.13	Vista de perfil del dominio de la simulación	65
Figura No. 3.14	Esquema de dominio considerado para las simulaciones.	66
Figura No. 3.15	Resistencia del casco desnudo para el modelo sin bulbo (a).	67
Figura No. 3.16	Resistencia del casco desnudo para el modelo sin bulbo (b).	68
Figura No. 3.17	Resistencia del casco desnudo para el modelo con bulbo (a).	70
Figura No. 3.18	Resistencia del casco desnudo para el modelo con bulbo (b).	70
Figura No. 3.19	Comparación de la resistencia al avance para el modelo con bulbo.....	71
Figura No. 3.20	Presión dinámica alrededor del casco.....	72
Figura No. 3.21	Perfil de Ola alrededor del casco.	73
Figura No. 3.22	Patrón de ola– sin bulbo (1.524 m/s).....	73
Figura No. 3.23	Patrón de ola - Modelo con bulbo (1.524 m/s).....	74
Figura No. 3.24	Altura de ola - Modelo con bulbo (1.524 m/s).....	74
Figura No. 3.25	Resistencia al avance para ambos modelos.	75
Figura No. 3.26	Modelado 3D del diseño definitivo.....	77
Figura No. 3.27	Esquema del sistema de referencia del modelo no lineal.	80
Figura No. 3.28	Resultados del círculo de evolución 35 °– Método no lineal.	83
Figura No. 3.29	Resultados de la velocidad de giro 35 °– Método no lineal.....	84
Figura No. 3.30	Resultados del círculo de evolución 15 °– Método no lineal.	85
Figura No. 3.31	Resultados de la velocidad de giro 15 °– Método no lineal.....	85
Figura No. 3.32	Compartimento de análisis estructural – Vista de perfil.	88
Figura No. 3.33	Compartimento de análisis estructural – Vista Transversal.	88
Figura No. 3.34	Escantillón usando el software Poseidón.	89
Figura No. 3.35	Longitud no soportada dada su configuración.	91
Figura No. 3.36	Modelo del compartimento de sala de máquinas realizado en SolidWorks...	94
Figura No. 3.37	Deflexión final del compartimento analizado.	99
Figura No. 3.38	Modos de vibración vs Frecuencia.	101

Figura No. 4.1 Función TIR utilizada desde Excel	113
Figura No. A. 1 TPM/V Vs TPM.....	123
Figura No. A. 2 L Vs TPM	123
Figura No. A. 3 TPM/Lpp Vs TPM	124
Figura No. A. 4 TPM/B Vs TPM.....	124
Figura No. A. 5 TPM/D Vs TPM	125
Figura No. A. 6 TPM/T Vs TPM.....	125
Figura No. D. 1 Curva del motor/hélice- DP.....	134
Figura No. D. 2 Plano de líneas de forma-DP.....	135
Figura No. D. 3 Verificación de ángulo de salida vista de perfil.	136
Figura No. D. 4 Verificación de ángulo de entrada en el plano de flotación.	136
Figura No. D. 5 Verificación de ángulo de salida en la manzana de la helice.	137
Figura No. E. 1 Plano de Rayado Estructural-DP.	138
Figura No. E. 2 Distribución de cubiertas- DP.	139
Figura No. E. 3 Curvas Cruzadas-Máxima Carga - DP.....	143
Figura No. E. 4 GZ vs θ Máxima Carga - DP.....	144
Figura No. K. 1 Líneas de corriente alrededor del casco sin Bulbo.....	159
Figura No. K. 2 Flujo de Corriente para el modelo con bulbo (1.524 m/s).....	159
Figura No. K. 3 Patrón de ola para el modelo con bulbo (1.524 m/s) -Maxsurf	160
Figura No. K. 4 Patrón de ola para el modelo sin bulbo (1.524 m/s) -Maxsurf	160
Figura No. L. 1 Formas finales del buque.....	161
Figura No. L. 2 Distribución General del buque.....	162
Figura No. L. 3 Plano de línea de eje del buque.....	163

Figura No. M. 1 Coeficientes del timón en función del coeficiente bloque.....	166
Figura No. N. 1 Plano estructural de Bulárcama en sala de máquina.....	169

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A – Estimación de dimensiones – DP.	122
ANEXO B – Estimación de parámetros – DP.	126
ANEXO C – Estimación de pesos – DP.	129
ANEXO D – Generación de formas – DP.	134
ANEXO E – Arreglo General – DP.	138
ANEXO F – Arquitectura Naval – DP.	142
ANEXO G – Arquitectura Naval – DD.	147
ANEXO H – Escantillonado – DD.	152
ANEXO I – Formulaciones empleadas para el cálculo del bulbo.	157
ANEXO J – Formulaciones propuestas por ITTC.	158
ANEXO K – Resultados de Resistencia al avance utilizando CFD.	159
ANEXO L – Planos del diseño definitivo	161
ANEXO M – Maniobrabilidad – Diseño definitivo.	164
ANEXO N – Validación estructural	169
ANEXO O – Análisis económico	170

INTRODUCCIÓN

Con el tiempo la economía mundial ha dependido en gran porcentaje de la flota mercante internacional de graneleros y petroleros para el transporte de productos a granel. Realizando el transporte de esta carga de una manera segura, rápida y eficaz. Hoy en día los buques a granel son 43.5% de la flota mundial, este valor es el más alto en comparación con otros tipos de buques, en el 2014 la tasa de crecimiento de este tipo de barco era el más alto con un 4,4%.

En el país existe una gran cantidad de puertos privados cuyo principal producto es la carga a granel, la mayoría de estas empresas se encuentran en la ciudad de Guayaquil, con un acceso de calado máximo de entre 6,5 y 9.75 metros. Este valor es un factor limitante para el ingreso de embarcaciones de mayor calado y por ende eslora. Considerando la importancia de este tipo de buques se ha pensado en el diseño de un buque que cumpla especialmente este tipo de restricciones sin afectar a la cantidad de carga requerida y además contribuir al desarrollo de la industria naval ecuatoriana.

Objetivo general.

Diseñar un Buque Granelero de 2500 TPM y posteriormente realizar su análisis técnico económico.

Objetivos específicos

- Diseño preliminar y final de un buque granelero de 2500 TPM.
- Análisis estructural del compartimento de sala de máquina del buque.
- Analizar el beneficio de agregar un bulbo en proa y popa a las formas finales de la embarcación.
- Analizar la simulación numérica de la maniobrabilidad del buque granelero siguiendo las recomendaciones de maniobrabilidad propuestas por ABS e ITTC.
- Realizar el análisis financiero, de la rentabilidad del proyecto.

Para el diseño de este tipo de embarcación básicamente se seguirá la espiral de diseño que consta del diseño preliminar y el final. Además, se pondrá énfasis en el comportamiento que tendrá el buque bajo la acción del timón, el diseño y análisis de la estructura de sala de máquina, así como también al análisis técnico económico del proyecto.

Beneficio: Tener disponible el diseño de un buque granelero según las necesidades y limitaciones del entorno. Además de facilitar un análisis técnico económico de cuan viable sería la construcción de este tipo de embarcaciones.

CAPITULO 1

1. DISEÑO CONCEPTUAL

1.1 Consideraciones para el diseño preliminar

1.1.1. Alcance del Proyecto

Se espera contribuir en el desarrollo de la industria naval ecuatoriana, ya que el diseño de este tipo de embarcaciones no es común en el entorno local. Para el desarrollo del diseño del buque se ha aplicado la espiral de diseño convencional, como se describe en "Ship Design and Construction", [2].

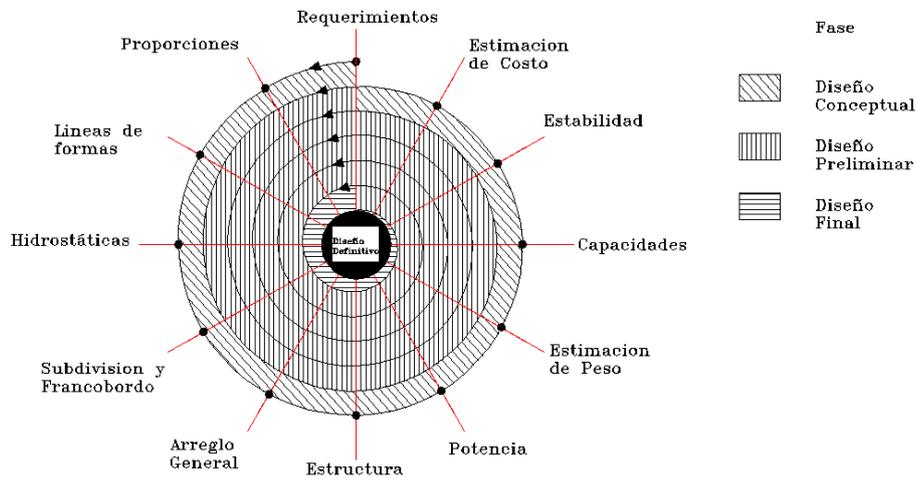


Figura No. 1.1 Espiral básica de diseño

Fuente: [[2]]

Se han seguido todas las etapas del diseño descrita por la espiral, tales como: conceptual (primera fase), preliminar (segunda fase) y fase final.

La primera fase consiste en otorgar a la embarcación mediante estimaciones las dimensiones y características hidrostáticas principales, además de pesos y propulsión.

La segunda fase se involucra en las formas del buque y posterior cálculo de parámetros hidrostáticos, escantillón, propulsión y resistencia al avance. En la última etapa se han optimizado las dimensiones de la embarcación.

1.1.2. Requerimientos básicos del diseño

Dada la restricción de calado en los puertos de Guayaquil se ha requerido diseñar un buque granelero que cumpla el siguiente rol de operación: aumentar el movimiento de carga entre los puertos y a su vez ser capaces de exportar e importar productos a/desde países vecinos.

El estado de mar al que la embarcación será sometida puntúa entre 3 y 4. Para este proyecto se ha considerado alcanzar una velocidad de 12.33 [nudos], y una autonomía de aproximadamente 2654.64 MN, estimando un tiempo de navegación de 10 días. A continuación, se detallan los requerimientos a ser considerados en el proyecto.

		Rango		
		Mínimo	Máximo	
Dimensiones principales	Eslora	70	90	m
	Manga	11	14	m
	Puntal	5	7	m
	Velocidad	11	15	nudos
	Autonomía	1250	2655	MN
	TPM	2500	3000	TPM
Condiciones meteorológicas	Viento	10	60	km/h
	Altura de Ola	1.18	4	m
	Estado de mar	3	4	

Tabla No. 1 Requerimientos de diseño

[Fuente: Elaboración Propia]

1.1.3. Restricciones de Diseño.

La principal restricción es la limitación del calado en los puertos del Ecuador, en la Tabla No. 2 se indica la restricción de calado.

		Rango		
		Mínimo	Máximo	
Calado permitido	Ecuador	6.5	9.75	m

Tabla No. 2. Restricción de calado.

[Fuente: Elaboración Propia]

1.2 Diseño Conceptual

1.2.1 Estimación de dimensiones principales

A partir de regresiones lineales mostradas en el ANEXO A se han determinado las dimensiones principales, velocidad, calado y eslora entre perpendiculares del buque, En las gráficas de regresión presentadas se verifica que el coeficiente de correlación sea mayor a 0,9 ya que esto conlleva a obtener resultados más confiables, en la Tabla No. 3 se muestran algunas de las características obtenidas para la embarcación.

Características del buque granelero	
L(m)	78
Lpp(m)	73.2
B(m)	13.18
D(m)	6.45
T(m)	5.1
V (nudos)	12.33

Tabla No. 3. Dimensiones estimadas – DC.

[Fuente: Elaboración Propia]

1.2.2 Estimación de parámetros hidrostáticos.

Estos parámetros han sido estimados conceptualmente usando las formulaciones presentadas por Ventura, [3], estos resultados permiten tener una primera aproximación de los requerimientos que deberá cumplir las formas de la embarcación en el Capítulo 3.

Las formulaciones y procedimientos para la determinación de cada uno de estos parámetros son mostrados en detalle en el ANEXO B.

Parámetros hidrostáticos.	
Fn	0.23
Cb	0.680
Cm	0.983
Cp	0.692
Cwl	0.785
Fvol	0.515
Ap (m²)	793
CP	3.45
KB	2.74
Bmt	2.78
Lcb	-5.76

Tabla No. 4. Parámetros estimados – DC

[Fuente: Elaboración Propia]

1.2.3 Estimación de pesos y desplazamiento

Los pesos a estimar han sido definidos en varios grupos, siendo algunos de estos, peso de carga, peso de combustible, peso de acero, etc. El peso muerto de 2500 Ton requerido por el armador se lo puede desglosar de la siguiente manera:

$$W_{\text{Muerto}} = W_{\text{combustible}} + W_{\text{aceite}} + W_{\text{agua}} + W_{\text{tripulación}} + W_{\text{viveres}} + W_{\text{carga}} \quad (1.1)$$

Cada una de las variables presentadas en la ecuación anterior se las ha calculado tal como se muestra en el ANEXO C. Finalmente, sd la ecuación anterior se despeja el peso de la carga.

$$W_{\text{carga}} = W_{\text{muerto}} - (W_{\text{combustible}} + W_{\text{aceite}} + W_{\text{agua}} + W_{\text{tripulación}} + W_{\text{viveres}}) \quad (1.2)$$

El peso ligero ha sido estimado utilizando las formulaciones presentadas en el libro de Albariño, [4]. El cálculo de las variables que componen el peso ligero es mostrado en el ANEXO C.

$$W_{\text{Ligero}} = W_{\text{OA}} + W_{\text{ST}} + W_{\text{Q}} \quad (1.3)$$

La Tabla No. 5 muestra un resumen de valores de los pesos calculados.

Peso Muerto (Ton)		Peso Ligero (Ton)	
$W_{\text{combustible}}$	194.27	W_{ST}	549.08
W_{aceite}	7.13	W_{Q}	367.19
W_{agua}	29.5	W_{OA}	311.84
$W_{\text{tripulación}}$	2.25	Σ	1228.11
W_{carga}	2262.72	90% peso útil.	
$W_{\text{víveres}}$	1.1	$(\Sigma) \cdot 0.9$	1105.30
ΣW_{Muerto}	2497.97	ΣW_{Ligero}	1105.30

Tabla No. 5. Resumen de pesos – DC

[Fuente: Elaboración Propia]

El desplazamiento puede ser estimado mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta = \Sigma W_{\text{Muerto}} + \Sigma W_{\text{Ligero}} \quad (1.4)$$

$$\Delta = 2497.97 + 1105.30 = 3605.3 \text{ Ton}$$

1.3 Análisis de Resultados del Diseño Conceptual.

En la Tabla No. 3 y Tabla No. 4 se han presentado las dimensiones estimadas en esta fase conceptual. De ser necesario el peso estimado de la embarcación en el capítulo 2 deberá ser corregido. El análisis de propulsión se lo presenta de manera detallada para las formas finales de la embarcación.

CAPITULO 2

2. DISEÑO PRELIMINAR

2.1. Generación de formas

El Buque prototipo se ha seleccionado de la librería de modelos del Software Maxsurf, en base a los requerimientos establecidos por el armador y a lo estimado en el capítulo anterior. Se realizaron ciertos cálculos mostrados posteriormente para modificar las formas, además de la verificación y corrección de los ángulos de entrada y salida del casco según lo recomendado por Caterpillar, [5].

A continuación, se presenta el modelo seleccionado de esta biblioteca.

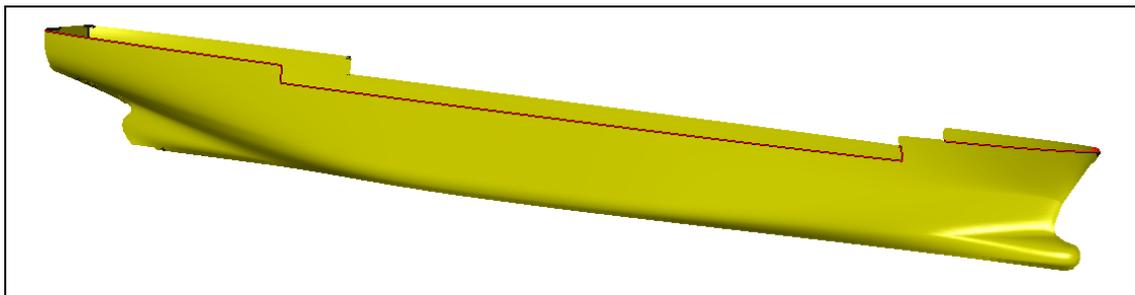


Figura No. 2.1 Modelo 3D de la embarcación - DP.

[Fuente: Geometría obtenida en Maxsurf]

Se analizó el modelo seleccionado con el software PropExpert, para determinar las características del propulsor que permita alcanzar la velocidad propuesta de 12.33 Nudos. El plano de líneas de la embarcación y características del motor y hélice se muestran en el ANEXO D.

2.1.1 Justificación del bulbo de proa

El bulbo de proa es un engrosamiento de la parte baja de la roda que se instala en los buques con el fin de disminuir la resistencia total al avance. Aunque no siempre se consigue este resultado.

La embarcación según lo mostrado en el libro de Albariño, [4], debe cumplir con los parámetros mostrados a continuación para asegurar la existencia del bulbo de proa.

Parámetro	Valor actual	Condición
$C_b \frac{B}{L_{pp}} < 0,135$	$(0.681) \frac{(13.18)}{(73.14)} = 0,123$	Cumple
$5.5 < \frac{L_{pp}}{B} < 7$	$\frac{73.14}{13.18} = 5.55$	Cumple
$0.24 < F_n < 0.65$	$F_n = 0,235$	Cumple

Tabla No. 6. Parámetros para bulbo de proa– DP

[Fuente: Elaboración Propia]

Donde:

El bulbo instalado es diseñado pensando en la condición de lastre. En la Figura No. 2.2 se observan los parámetros dimensionales propios del:

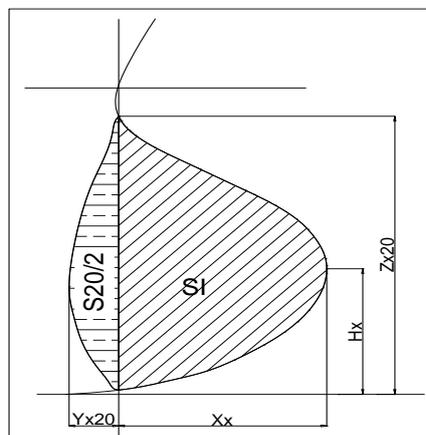


Figura No. 2.2 Dimensiones del bulbo - DP.

[Fuente: [4]]

Donde:

- Altura del punto de máxima protuberancia, $H_x = 1.1$ m
- Abscisa del punto de máxima protuberancia, $X_x = 1.919$ m

- Altura máxima del bulbo, $Z_{x20} = 2.3$ m
- Área lateral del bulbo, $S_l = 8.25$ m²
- Manga del bulbo, $Y_{x20} = 1.059$ m
- Área de transversal, $S_{20/2} = 1.84$ m².

La altura del punto de protuberancia máxima: H_x/T es de 3.66 para un calado de lastre estimado de 3m.

A manera de comprobación de las dimensiones asignadas, Albarino, [4], presenta una formulación para determinar X , este valor deber ser próximo a 0.02624 que es el determinado al evaluar X_x/L_{pp} :

Formulación presentada por Alvariño	$X = \frac{X_x}{L_{pp}} = \frac{0.2642 \cdot C_b \cdot B}{L_{pp}} - 0.0046$ $X = \frac{X_x}{L_{pp}} = \frac{0.2642 \cdot 0.681 \cdot 13.18}{73.14} - 0.0046$ $X = 0.02782 \approx 0.02624 \quad \blacksquare$
-------------------------------------	---

Tabla No. 7. Abscisa de máxima protuberancia (adimensional) – DP

[Fuente: Elaboración Propia]

2.2. Distribución General

Se ha determinado el peso de carga, volumen de lastre, agua, combustible, ubicación de mamparos etc. Los espacios de habitabilidad son los recomendados por ABS, [6] y presentada en ANEXO E.

Según lo señalado por IACS, [7], la embarcación deberá tener al menos los siguientes mamparos:

- Mamparo de pique de popa y colisión. - según la Regulación 11 del convenio Solas Capítulo II-I parte B, [8], establece que estos mamparos deberán estar ubicados a

una distancia desde su respectiva perpendicular no menor al 5% de la L_{pp} , o 10m, en función de la menor distancia, y no mayor al 8% de la L_{pp} .

- Un mamparo delimitando el área de la sala de máquinas a proa de la misma en los buques con la sala de máquinas a popa.
- Mamparos entre bodegas, la ubicación y cantidad de estos mamparos se basarán básicamente en el análisis de la eslora inundable, tal como se muestra más adelante.

La ubicación de los mamparos depende de la separación entre cuadernas, Lloyd's Register, [9], presenta la siguiente ecuación que permite calcular el espaciamiento entre cuadernas.

$$s=470+\frac{L}{0.6} \quad (2.1)$$

L es el 97% de la eslora total.

$$s=0.6 \text{ [m]}$$

En el ANEXO E se muestra plano del rayado estructural de la embarcación generado a partir de la separación calculada. Usando el software Maxsurf se ha realizado el análisis de longitud inundable, con esto se estableció las posiciones y cantidad de mamparos sin dejar de lado lo recomendado por Solas y las Sociedades Clasificadoras.

A continuación, se presenta la gráfica de longitud inundable, siendo positivo hacia proa.

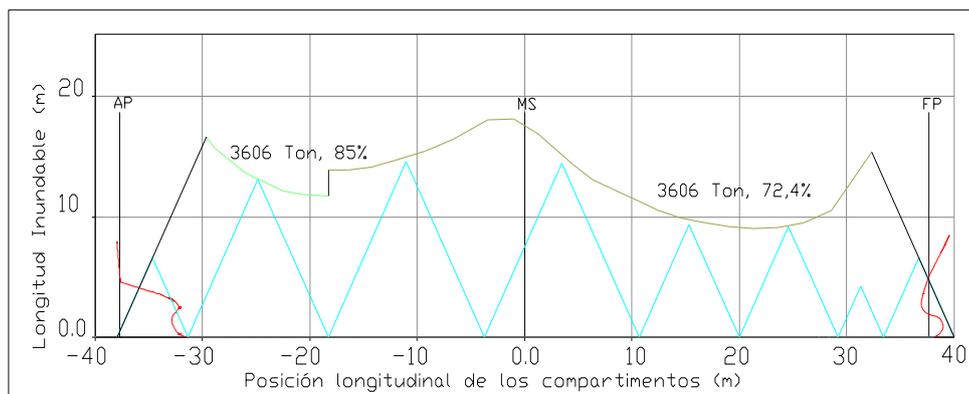


Figura No. 2.3 Longitud Inundable – DP.

[Fuente: Elaboración Propia]

Interpretando la gráfica anterior nos encontramos con 8 compartimentos, en el orden de izquierda a derecha se ubica el lazareto, sala de máquinas, bodega 4, bodega 3, bodega 2, bodega 1, bodega 0 y pique de proa.

Mamparo de pique de popa	-31.38	m
Mamparo de Sala de maquina	-18.304	m
Mamparo transversal 1	-3.715	m
Sección media	---	---
Mamparo transversal 2	10.696	m
Mamparo transversal 3	19.996	m
Mamparo transversal 4	29.176	m
Mamparo de pique de proa	33.420	m

Tabla No. 8. Ubicación de mamparos, siendo positivo hacia proa - DP.

[Fuente: Elaboración Propia]

Se ha modelado los tanques usando el software Rhinoceros, para tener una aproximación más cercana de volúmenes y capacidad de carga. A continuación, se presenta el modelo realizado y en las tablas con los volúmenes de lastre y capacidad de carga por bodega.

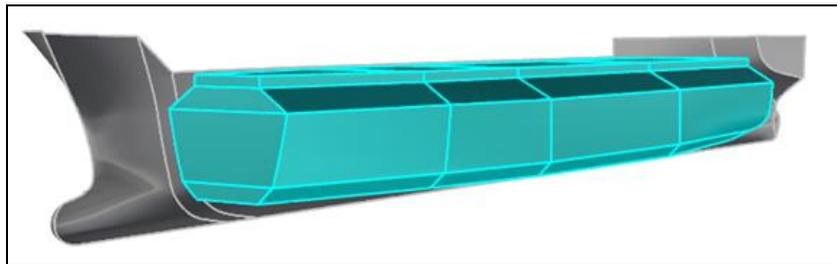


Figura No. 2.4 Esquema de bodegas en 3D - DP.

[Fuente: Elaboración Propia]

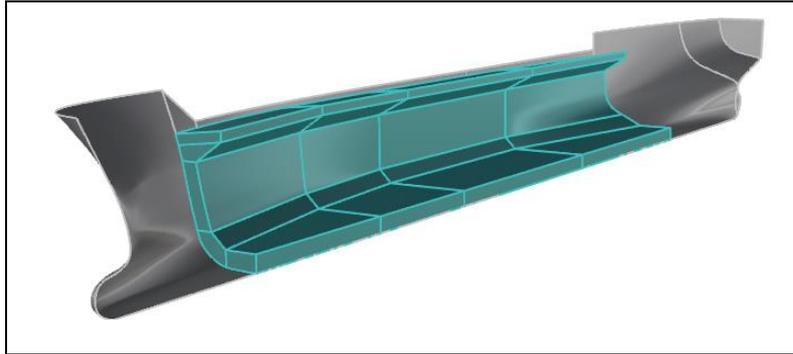


Figura No. 2.5 Esquema de tanques de lastre en 3D - DP.
[Fuente: Elaboración Propia]

Bodega de popa a proa	Carga (ton)	Lastre (m3)
0	100	--
1	330.196	212.7
2	379.42	196.19
3	690	356.192
4	630.04	345.43

Tabla No. 9. Capacidad de Carga y Lastre al 100% - DP.
[Fuente: Elaboración Propia]

El volumen de agua dulce y combustible se detalla en la siguiente tabla.

Tanques de combustible [m ³]	210
Tanques de agua dulce [m ³]	14

Tabla No. 10. Combustible y agua dulce al 100% - DP.
[Fuente: Elaboración Propia]

La visibilidad desde el puente de mando debe ser al menos dos esloras, se muestra en la Figura No. 2.6.

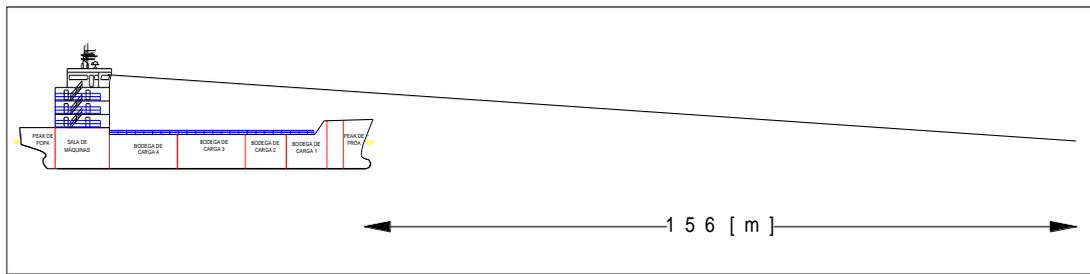


Figura No. 2.6 Análisis de dos Esloras – DP.

[Fuente: Elaboración Propia]

2.3. Cálculos de arquitectura naval

Se analizan dos condiciones de carga, la primera es aquella en la cual la embarcación navega con un 100% de carga y la segunda sin carga y con un 10% de consumibles.

Obtenidas las formas y pesos propios se ha utilizado el software Maxsurf Stability en sus diferentes módulos para realizar los cálculos hidrostáticos y estabilidad a grandes ángulos para las dos condiciones. Con los resultados obtenidos se ha verificado el cumplimiento de los criterios de estabilidad establecidos por la IMO (MSC. 267 (85) _ Criterio General). A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la condición de navegación sin carga y con 10% de consumibles, ésta es considerada como una condición crítica ya que existe efecto de superficie libre.

Calado (m)	0,499	0,993	1,481	1,981	2,475	2,697
Desplazamiento (Ton)	246,8	559,1	895,5	1242	1596	1960
Volumen(m³)	240,8	545,5	873,7	1211,7	1557,1	1912,2
Lwl (m)	71,3	71,7	71,7	70,1	69,2	69,6
Sm (m²)	592,1	695,3	779,1	860,2	938,2	1016,9
Aw (m²)	578,1	646,4	677,1	691,3	708,3	728,7
CP	0,605	0,641	0,664	0,695	0,717	0,726
Cb	0,547	0,59	0,622	0,661	0,689	0,702
Cm	0,904	0,921	0,937	0,952	0,962	0,968
Cwp	0,655	0,694	0,717	0,747	0,776	0,794
LCB +proa (m)	4,334	4,137	3,933	3,671	3,377	3,079
LCF +proa (m)	4,125	3,82	3,342	2,646	2,069	1,487

Tabla No. 11. Cálculos hidrostáticos 10% consumibles (a) – DP

[Fuente: software Hydromax – Versión de prueba]

KB (m)	0,273	0,54	0,803	1,063	1,322	1,582
KG (m)	5,12	5,12	5,12	5,12	5,12	5,12
BMt (m)	22,26	12,8	8,896	6,729	5,434	4,579
BML (m)	571	297,7	199,7	148,1	122,1	107,5
GMt (m)	17,4	8,22	4,579	2,673	1,636	1,041
GML (m)	566,1	293,2	195,4	144,04	118,3	104
KMt (m)	22,52	13,34	9,699	7,793	6,756	6,161
KML (m)	571,3	298,3	200,5	149,16	123,4	109,1
TPc (ton/cm)	5,92	6,626	6,94	7,086	7,26	7,469
MTc (ton.m)	18,52	21,73	23,19	23,72	25,03	27,03

Tabla No. 12. Cálculos hidrostáticos 10% consumibles (b) – DP

[Fuente: software Hydromax – Versión de prueba]

- Curvas Cruzadas.

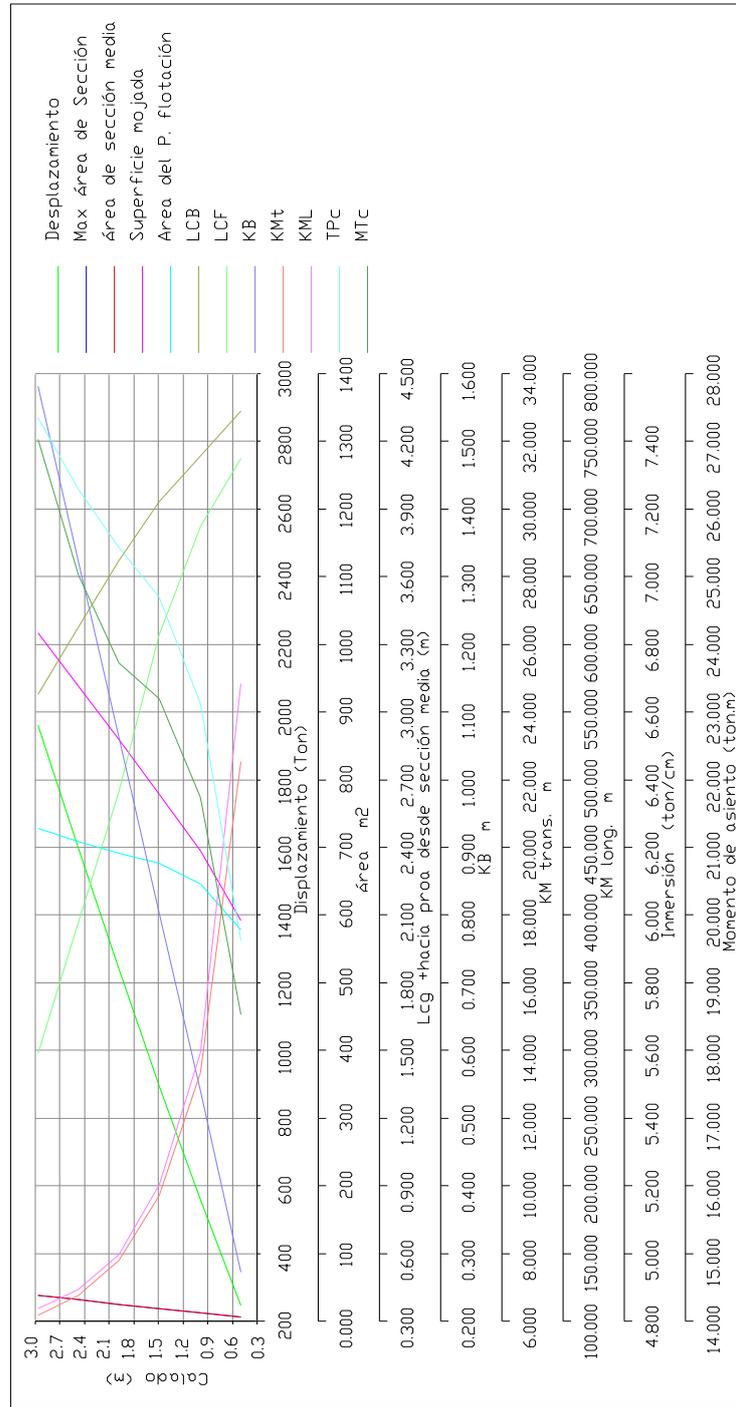


Figura No. 2.7 Curvas Cruzadas 10% consumibles - DP.

[Fuente: software Hydromax – Versión de prueba]

Usando el mismo software se genera la curva de brazo adrizante mostrada a continuación.

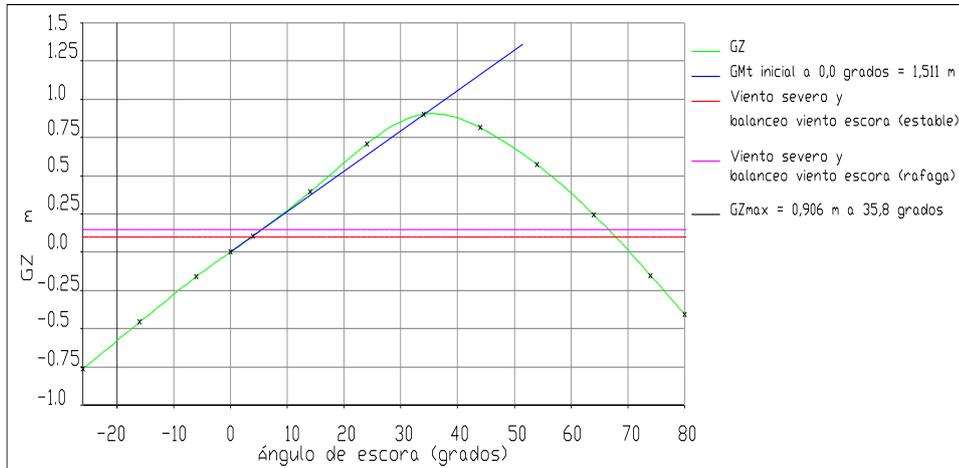


Figura No. 2.8 GZ vs θ – 10% consumibles - DP.

[Fuente: software Hydromax – Versión de prueba]

Según la IMO Resolución MSC. 267(85) textualmente indica que la curva de brazo adrizante debe cumplir las siguientes premisas:

- El área bajo la curva de brazos adrizantes (curva de brazos GZ) no será inferior a 0,07 metro-radián hasta un ángulo de 15° si el brazo adrizante máximo (GZ) se da a un ángulo igual a 15° o de 0,055 metro-radián hasta un ángulo de 30° si el brazo adrizante máximo (GZ) se da a un ángulo igual o superior a 30° . Cuando el brazo adrizante máximo (GZ) se dé a un ángulo comprendido entre 15° y 30° , el área correspondiente bajo la curva de brazos adrizantes será igual a:

$$0,055 + 0,001 (30^\circ - \phi_{\text{Max}}) \text{ metro-radián} \quad (2.2)$$

- El área bajo la curva de brazos adrizantes (curva de brazos GZ) entre los ángulos de escora de 30° y 40° , o entre 30° y ϕ si este ángulo es inferior a 40° , no será inferior a 0,03 metro-radián;
- El brazo adrizante (GZ) será como mínimo de 0,2 m a un ángulo de escora igual o superior a 30° .

- El brazo adrizante máximo (GZ) se dará a un ángulo de escora no inferior a 15°.
- La altura metacéntrica transversal inicial (GMO) no será inferior a 0,15 m.

La Tabla No. 13 muestra el análisis de los criterios exigidos por la IMO.

Código	Criterio	Valor	Unidades	Valor actual	Estado	Margen%
267(85) Ch2 - Criterio General	2.2.1: Área bajo la curva de GZ, de 0 a 30	31.513	m.grados	12,9322	Paso	+134.02
267(85) Ch2 - Criterio General	2.2.1: Área bajo la curva de GZ, de 0 a 40	51.566	m.grados	21,8503	Paso	+112.2
267(85) Ch2 - General Criterio	2.2.1: Área bajo la curva de GZ, de 30 a 40	17.189	m.grados	8,9181	Paso	+107.56
267(85) Ch2 - Criterio General	2.2.2: Máximo GZ a 30 o mayor	0.200	m	0,906	Paso	+83.50
267(85) Ch2 - Criterio General	2.2.3: Angulo de máximo GZ	25.0	grados	35,8	Paso	+12.73
267(85) Ch2 - Criterio General	2.2.4: GMi inicial	0.150	m	1,511	Paso	+612.67
267(85) Ch2 - Criterio General	2.3: Viento severo y balanceo				Paso	
Criterio meteorológico	Ángulo de escora constante no deberá ser superior a (\leq)	16.0	grados	3.7	Paso	+788.45
	Ángulo de escora constante / ángulo de inmersión del borde de cubierta, no deberá ser mayor que (\leq)	80.00	%	12,69	Paso	+80.58
	Area1 / Area2 no deberán ser menor a (\geq)	100.00	%	106,63	Paso	+6.63

Tabla No. 13. Análisis de criterios de estabilidad - DP.

[Fuente: software Hydromax – Versión de Prueba]

El cumplimiento del criterio meteorológico puede observarse en la Tabla No. 16 aplicable a embarcaciones mayores a 24 m de eslora. Según la IMO - Resolución MSC. 267(85), este criterio indica la aptitud del buque para resistir efectos combinados del viento de través y del balanceo respecto a cada condición normal de carga.

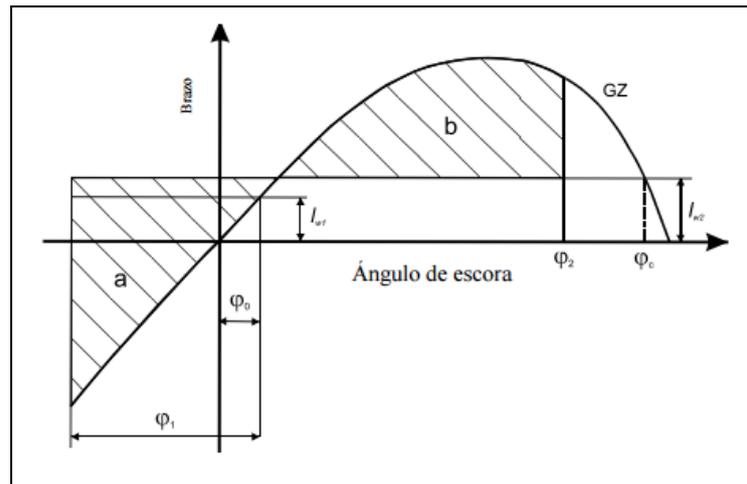


Figura No. 2.9 Viento y balance intensos.

[Fuente: IMO - Resolución MSC. 267(85)]

Ángulo de escora provocado por un viento constante [°]	φ_1	24.4°
Ángulo de escora provocado por un viento escorante [°]	φ_0	3.7°
Ángulo al que se produce la inundación descendente [°]	φ_2	32°
Área 1 (m. grados)	a	10.21
Área 2 (m. grados)	b	9.57
Brazo escorante provocado por el viento [m]	l_{w1}	1.06
Brazo escorante provocado por el viento [m]	l_{w2}	1.59

Tabla No. 14. Resultados del criterio meteorológico - DP.

[Fuente: Elaboración Propia]

En ANEXO F se muestran los resultados y gráficos obtenidos para la segunda condición de carga.

Finalmente, La embarcación cumple con los criterios asegurando la estabilidad transversal. La Tabla No. 15. Muestra una comparación entre los resultados obtenidos en este capítulo y los del diseño conceptual.

	Preliminar	Conceptual
Eslora (m)	78	78
Manga (m)	13.18	13.18
Puntal (m)	6.45	6.45
Calado (m)	5,032	5.1
Desplazamiento (Ton)	3606	3605.3
Volumen(m³)	3518	3517.3
Aw (m²)	827,798	793
CP	0,717	0.692
Cb	0,703	0.68
Cm	0,981	0.983
Cwp	0,833	0.785
KB (m)	2,696	2.74
BMt (m)	2,834	2.78

Tabla No. 15. Comparación - Diseño Preliminar y Conceptual.

[Fuente: Elaboración Propia]

2.4. Resistencia Estructural

Para el dimensionamiento estructural de la embarcación se ha utilizado las formulaciones presentadas por la Sociedad de Clasificación GL [10]. El tipo de arreglo estructural es longitudinal. La embarcación tiene doble fondo, doble costado y tolva superior e inferior, extendiéndose desde el mamparo de sala de máquinas hasta el mamparo de proa.

2.4.1. Cálculos

Se han calculado los espesores de la embarcación, aplicando las formulaciones presentadas por la Sociedad de Clasificación, obteniendo se los siguientes resultados.

Sección	Espesor Calculado [mm]
Fondo 0-30%	13
Doble Fondo 0-30%	11
Fondo 30-100%	9
Doble Fondo 30-100%	9
Costado	9
Mamparo Corrugado Transv.	9
Planchas transversales	7
Cubierta	9
Vagra	8
Varenga	8
Tolva Superior	6
Tolva Inferior	6
Pantoque	10
Plancha de Trancanil	9

Tabla No. 16. Espesores de Planchaje - DP.

[Fuente: Elaboración Propia.]

Los resultados de la cuaderna maestra correspondientes a espesores, refuerzos primarios y secundarios son presentados en la Tabla No. 17.

Sección	SM _{Min} [cm ³]	SM [cm ³]	A [cm ²]	I [cm ⁴]	Elemento
Long. Fondo	117	122	13	1574	L 130*10*75*10
Long. Doble Fondo	76	78	9	803	L 100*9*75*9
Long. De costados	90	93	9	1087	L 120*8*80*8
Long. Tolva superior	20	23	4	166	L 75*5*50*5
Long. Tolva inferior	21	22	4	165	L 75*5*50*5
Long. Cubierta.	50	52	6	479	L 90*7*75*7

Tabla No. 17. Elementos longitudinales secundarios de sección media.

[Fuente: Elaboración Propia]

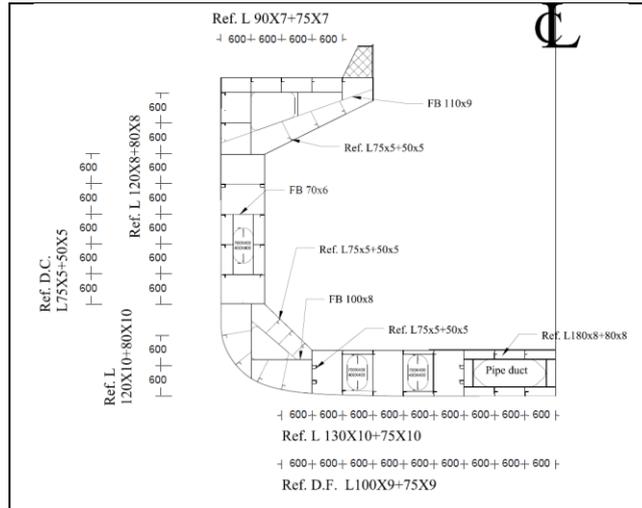


Figura No. 2.10 Arreglo estructural de la sección maestra – DP.

[Fuente: Elaboración Propia]

2.4.2. Verificación de Resultados obtenidos con el software Poseidón.

El escantillón de la cuaderna maestra ha sido validado con software de cálculo estructural POSEIDON - GL, teniendo como resultado lo mostrado en la Tabla No. 18. La Figura No. 2.11 muestra la manera en que el software acepta lo calculado, siendo de color azul y verde cuando se cumple lo requerido por la Sociedad Clasificadora y rojo si falla.

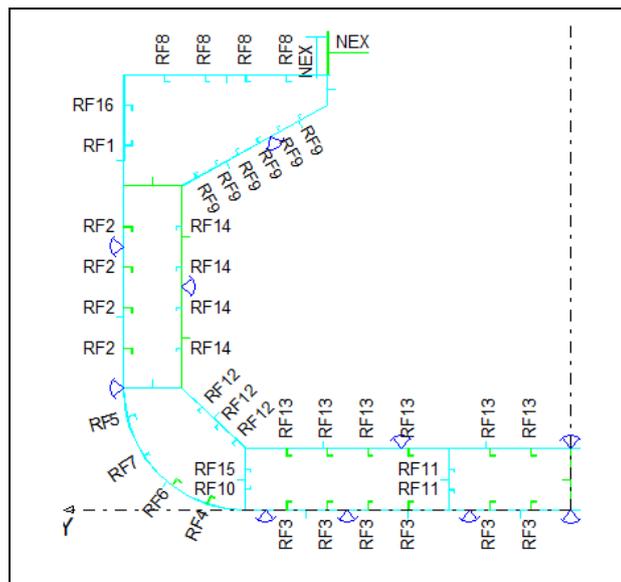


Figura No. 2.11 Verificación de la cuaderna maestra con Poseidón – DP.

[Fuente: Resultados de Software Poseidón.]

Sección	Espesor Calculado [mm]	Espesor verificado con software Poseidón, [11], [mm].
Fondo 0-30%	13	13
Doble Fondo 0-30%	11	12
Fondo 30-100%	9	10
Doble Fondo 30-100%	9	10
Costado	9	10
Mamparo Corrugado Transv.	9	10
Planchas transversales	7	7
Cubierta	9	10
Vagra	8	8
Varenga	8	7
Tolva Superior	6	6
Tolva Inferior	6	6
Pantoque	10	10
Plancha de Trancanil	9	9

Tabla No. 18. Validación de escantillón.

[Fuente: Elaboración Propia]

2.5. Maniobrabilidad

Para el cálculo del área del timón se ha utilizado la siguiente formulación presentada en Alvaríño [4].

$$AR = 0.01 \times LPP \times T \left[1 + 50CB^2 \left(\frac{B}{LPP} \right)^2 \right] \quad (2.3)$$

$$AR = 0.01 \times 73.2 \times 4.86 \left[1 + 50(0.672)^2 \left(\frac{13.18}{73.2} \right)^2 \right] = 6.47 \text{ m}^2$$

Para embarcaciones de carga el área proyectada de la pala varía entre el 1.5% y 2% del producto $Lpp \cdot T$ (Área de deriva), donde T es el calado de diseño. Observándose en la siguiente tabla el cumplimiento de esta restricción.

$$AR_{min} = 1.5\% Lpp \cdot T = 1.5\%(73.2 \times 4.86) \text{ [m}^2\text{]}$$

$$AR_{max} = 2\% Lpp \cdot T = 2.0\%(73.2 \times 4.86) \text{ [m}^2\text{]}$$

Área Projectada [m^2]
5.6 < 6.47 < 7.5

Tabla No. 19. Área min. y máx. permitida del timón para un buque de carga.
[Fuente: Elaboración Propia.]

A continuación, se muestra la geometría del timón generada a partir de los resultados obtenidos.

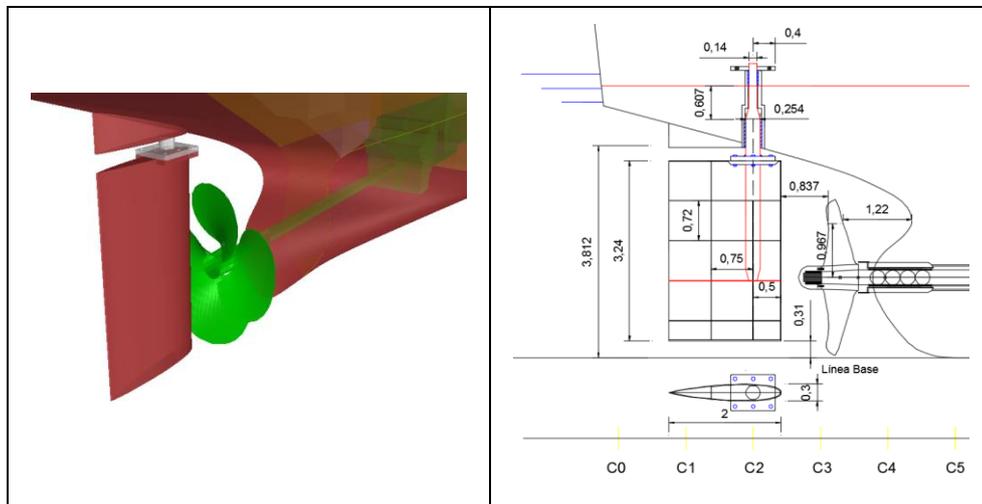


Figura No. 2.12 Geometría del Timón – DP
[Fuente: Elaboración Propia.]

2.5.1. Análisis del plano diametral.

En condición avante del buque es importante conocer la ubicación del centro de presión de la fuerza que actúa en el timón. Para el cálculo de ésta posición se usaron las formulaciones presentadas en Lloyd's [12].

$$X_{PF} = 0.33 eX_B - X_L ; \quad e_h = 2 * \left(C_b + 10 \frac{B_{WL}}{L_R} - 2 \right) \frac{V}{L_R} \quad (2.4)$$

$$e_h = 2 * \left(0.672 + 10 \frac{13.18}{73.05} - 2 \right) \frac{12.2}{73.05} = 1.36$$

$$X_{PF} = 0.33 (1.36)(2) - 0.45 = \mathbf{0.45 [m]}$$

Obtenido el centro de presión del timón se ha realizado el análisis del plano diametral LCG (PD), que consiste en verificar que el LCG (PD) de la embarcación este entre el LCF y el LCB, esta condición es necesaria para a lograr una buena estabilidad de ruta. En Tabla No. 20, se puede apreciar el análisis de la geometría del timón.

Descripción	LCG desde sección media. [m]	Área [m ²]	Momento de Inercia [m ³]
Carena	1.29	347.22	447.91
Timón	-35.54	6.46	-229.8
Orsa	-36.17	0.273	-9.87
SUMATORIA		353.96	208.24
LCG (PD) [m]	0.59	Centro Longitudinal del Conjunto.	
LCF [m]	-1.51	ACEPTADO	
LCB [m]	1.29		
(+): Hacia proa desde sección media y (-): hacia popa de sección media.			

Tabla No. 20. Verificación de la geometría del timón-DP.

[Fuente: Elaboración Propia.]

2.5.2. Análisis regresional de maniobrabilidad.

Aceptada la geometría del timón se verifica el cumplimiento de regulaciones presentadas por IMO y los requerimientos exigidos por ABS [13]. Para esto ha estimado el círculo de evolución de la embarcación usando sus dimensiones principales y las formulaciones presentadas por Lyster and Knight [14]. A continuación, se presentan los resultados obtenidos y lo calculado con Software MPP de Michigan.

Descripción	Predicción	Mpp	% error
Diámetro de giro	254.06	249.82	1.70
Diámetro Táctico	292.94	299.73	2.26
Avance	249.01	250.63	0.65
Transferencia	140.85	144.32	2.40

Tabla No. 21. Comparación de Resultados, círculo de evolución – DP.

[Fuente: Elaboración Propia.]

Ya que el resultado entre lo calculado y lo obtenido por el software es similar, se realiza un esquema del círculo de evolución.

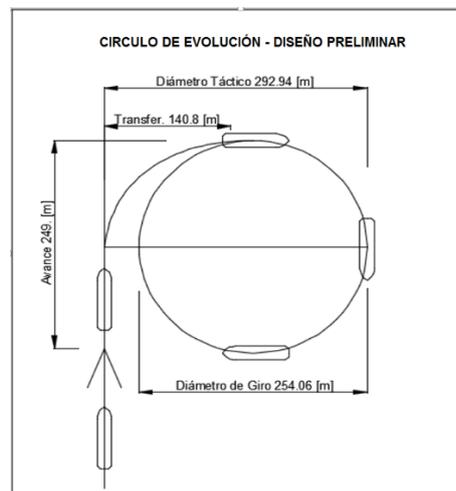


Figura No. 2.13 Círculo de evolución de la embarcación - Regresional

[Fuente: Elaboración Propia.]

Finalmente se evalúa que se cumplan los índices de maniobrabilidad dados por la IMO y ABS, obteniéndose los siguientes resultados.

ÍNDICES DE EVALUACIÓN DE MANIOBRABILIDAD.	Rating	IMO	ABS
Capacidad de giro del buque con evaluación de IMO y ABS	2	Ok	Ok
Capacidad de rumbo inicial de IMO y ABS zigzag a 10 y 20°	3	Ok	Ok
Facilidad de parada.	4	Ok	Ok
Habilidad de giro.	-	-	-
RESULTADO	$0.25 * \sum(\text{Rating}) > 2.5$	2.25	OK

Tabla No. 22. Resultados de los Índices de Maniobrabilidad - DP.

[Fuente: Elaboración Propia.]

2.6. Análisis de Resultados del Diseño Preliminar

En esta etapa se analizaron dos condiciones de carga, consideradas las más relevantes, verificando en cada una de ellas que se cumplan los criterios de estabilidad exigidos por la IMO.

Con los índices de maniobrabilidad presentados en la Tabla No. 22 se ha verificado que en esta etapa preliminar la embarcación tiene un buen comportamiento en el mar, aunque no se haya realizado la predicción de la habilidad de giro. Este análisis se lo realiza en el capítulo siguiente en la fase final del diseño.

CAPITULO 3

3. DISEÑO DEFINITIVO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Introducción

Se ha generado una función objetivo costos a partir de los grupos tecnológicos (100 y 200) haciendo que dependa únicamente de las dimensiones principales de la embarcación. A esta se le ha aplicado un método de optimización que permita el bosquejo de las dimensiones que mejor se adapten a lo requerido en el proyecto.

Para lograr lo mencionado anteriormente se ha tenido que ejecutar de los siguientes puntos:

- Cambiar las formas obtenidas en el diseño preliminar, por las de las series 60.
- Desarrollar una librería con 26 prototipos para el análisis de optimización, las dimensiones principales de cada prototipo fueron obtenidas a partir de las regresiones estadísticas presentadas en la fase preliminar.
- Se desarrolla códigos en Matlab para optimizar las áreas de estructura, resistencia y propulsión, arquitectura naval y maniobrabilidad del buque.
- Se Genera una función objetivo costos que esté en función de la eslora, manga y puntal. El costo generado a partir de esta función involucra los grupos tecnológicos 100 y 200.
- Seleccionar un método de optimización a partir de la función objetivo obtenido anteriormente.
- Compilar este método de optimización y analizar que las dimensiones obtenidas cumplan las restricciones establecidas con los códigos de Matlab.
- Definir las formas obtenidas de la embarcación y analizar la mejora de adicionar un bulbo en proa y popa con CFD.

- Se simula la maniobrabilidad del buque numéricamente para determinar si es aceptable para la Sociedad Clasificadora.
- Validación estructural del compartimento de sala de maquina mediante la aplicación de elementos finitos.

3.2. Optimización de Formas preliminares y Generación de la librería de Prototipos

3.2.1. Generación de Formas

Para mejorar las formas obtenidas en el diseño preliminar, se han seleccionado las series sistemáticas que mejor se adapten a las características de la embarcación, estas fueron las series 60 [15], que tienen un rango de aplicación que se presenta en la Tabla No. 23 se ha verificado que las características de la embarcación estén dentro de este rango.

Descripción	FN	Cb	Cp	L/B	B/T	(Xb/L)%	L/DISV ^(1/3)
SERIE 60	0.16	0.8	0.805	5.5	3.5	-2.48	7.5
	0.29	0.6	0.614	8.5	2.5	3.51	4.55
Buque-Preliminar	0.23	0.68	0.716	5.92	2.73	0.0159	5.19
Estado	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP

Tabla No. 23. Validación de parámetros de series 60.

[Fuente: Elaboración Propia.]

Para obtener las formas típicas de las series 60 se ha realizado un bosquejo de estas, pero para un coeficiente bloque $C_b = 0.70$, como se ve en la Figura No. 3.1.

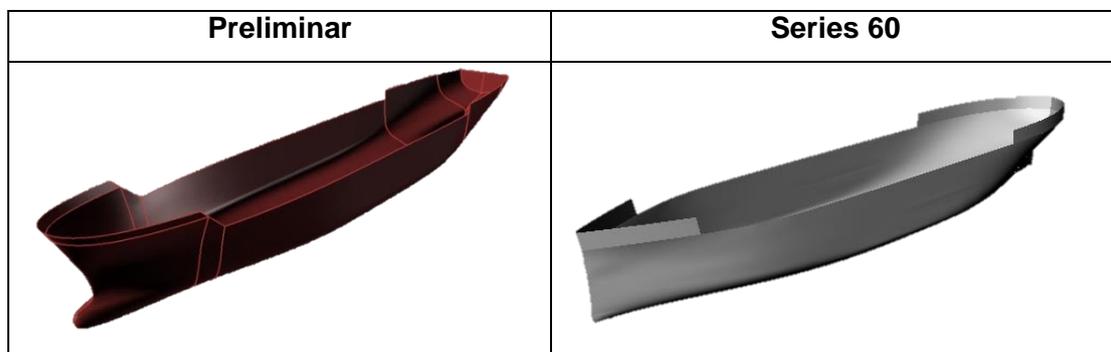


Figura No. 3.1 Cambio de formas preliminares a series 60 con $C_b=0.70$

[Fuente: Elaboración Propia.]

3.2.2. Desarrollo de la librería de prototipos

Para el desarrollo de la librería de prototipos y los valores KN de cada uno de ellos, se ha utilizado las regresiones lineales obtenidas en el diseño conceptual y además los límites establecidos en la Tabla No. 23 permitiendo establecer un intervalo de dimensiones principales que permita el desarrollo de la librería de prototipos, véase Tabla No. 24.

	L [m]	B [m]	D [m]	T [m]	L/B	B/T
Intervalo	84.91	15.78	7.22	5.74	5.38	2.75
	73.39	11.7	5.67	4.80	6.27	2.5

Tabla No. 24. Intervalo para la matriz de los prototipos.

[Fuente: Elaboración Propia.]

Para la generación de los valores KN de cada uno de estos prototipos, se generó una librería en función de estos intervalos como se ve en la Tabla No. 25.

En el ANEXO G se encuentra la librería de prototipos con todos los datos necesarios de cada uno de ellos para ser evaluada en cada área mencionada anteriormente, con la cual se podrá iniciar la búsqueda de las dimensiones optimas que generan el menor costo de producción.

Prototipo	Eslora (L)	Manga (B)	Puntal (D)
1	78	13.2	6.8
2	84.91	15.78	7.22
3	73.39	15.78	7.22
4	79.15	15.78	7.22
5	84.91	12	7.22
6	73.39	12	7.22
7	79.15	12	7.22
8	84.91	13.89	7.22
9	73.39	13.89	7.22

10	79.15	13.89	7.22
11	84.91	15.78	5.67
12	73.39	15.78	5.67
13	79.15	15.78	5.67
14	84.91	12	5.67
15	73.39	12	5.67
16	79.15	12	5.67
17	84.91	13.89	5.67
18	73.39	13.89	5.67
19	79.15	13.89	5.67
20	84.91	15.78	6.445
21	73.39	15.78	6.445
22	79.15	15.78	6.445
23	84.91	12	6.445
24	73.39	12	6.445
25	79.15	12	6.445
26	84.91	13.89	6.445
27	73.39	13.89	6.445
28	79.15	13.89	6.445

Tabla No. 25. Librería de Prototipos.

[Fuente: Elaboración Propia]

3.3. Restricciones de Arquitectura, Resistencia y Propulsión y Maniobrabilidad

Para el desarrollo de esta sección se han establecido restricciones para cada área de estudio como se ve a continuación:

3.3.1. Arquitectura Naval

Para las restricciones de arquitectura naval tenemos las siguientes:

- Estabilidad de la embarcación.
- Confort.

➤ **Estabilidad de la embarcación**

Para las restricciones de estabilidad de la embarcación se ha evaluado el cumplimiento de las condiciones de estabilidad propuestas por IMO [16] para buques que transportan granos, el cual tiene que ser confortable y seguro según lo adoptado por la resolución MSC.23 (59). Estas condiciones se las detallará a continuación en la Tabla No. 26.

Ítem	Restricciones		
1	Área (m-rad)- hasta 30 Grados	>	0.055
2	Área (m-rad)- hasta 40 Grados	>	0.055
3	Área (m-rad)- entre 30- 40 Grados	>	0.03
4	GZ (m) mayor o igual al ángulo de 30°	>	0.2
5	GM (m) inicial considerando superficie libre	>	0.15

Tabla No. 26. Condiciones de estabilidad por IMO

[Fuente: [16]]

Para evaluar el ítem 4 de la tabla anterior se ha utilizado la siguiente expresión que calcula el GZ a partir de los valores KN de cada prototipo mostrado en ANEXO G.

$$GZ = KN - KG \sin \theta \quad (3.1)$$

El KG de cada prototipo se lo ha variado paramétricamente con el cambio de puntal para cada uno con respecto al KG del buque, este último se lo ha determinado con las formas obtenidas en la Figura No. 3.1 adicionándole a esta la estructura obtenida en el diseño preliminar como se puede observar en la Figura No. 3.2.

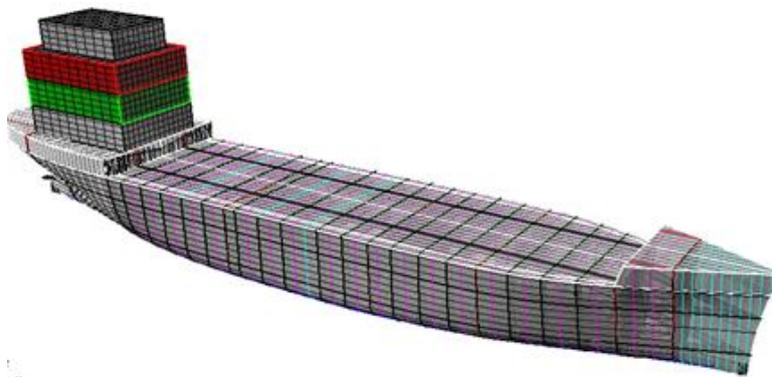


Figura No. 3.2 Modelo 3D para encontrar el $Kg_{\text{estructura}}$ en Orca.

[Fuente: Elaboración Propia.]

El KG Estructura obtenido para esta embarcación es 4.168 m considerando este valor para la variación paramétrica del centro de gravedad de los demás prototipos. Véase en ANEXO G cada uno de estos.

➤ **Confort.**

En esta sección se ha estimado la aceleración de rolido a la que está sometida esta embarcación. Esta no debe exceder un valor de 2 [m/seg²] para embarcaciones de carga. Esta aceleración se calcula basándose en el ángulo del rolido θ_1 , el período de balance T_b y la altura h entre el centro de gravedad de la embarcación y su última cubierta. Como se puede ver en la Figura No. 3.3:

$$a_b = \frac{4 * \pi^2}{T_b^2} * h * \theta_1 \quad (3.2)$$

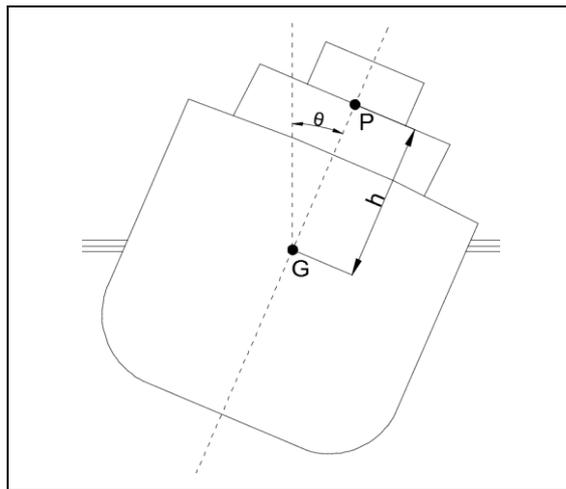


Figura No. 3.3 Aceleración de rolido.

[Fuente: [17]]

➤ **Cálculo del ángulo de Rolido θ_1**

La formulación que se ha utilizado para evaluar este Angulo es propuesta por IMO [18].

$$\theta_1 = 109 * k * X1 * X2 * (\tau * s)^{0.5} \text{ [Grados];} \quad (3.3)$$

Donde:

X1 y X2 = Factores como se muestra en la Tabla No. 27

k = Factor como sigue:

k = 1.0 respecto de un buque de pantoque redondo que no tenga quillas de balance ni quilla de barra.

k = 0.7 respecto de un buque de pantoque quebrado

k = el valor que se indica en la Tabla No. 27 respecto de un buque con quillas de balance, quilla de barra o ambas.

Siendo:

$$\tau = 0.73 \mp 0.6 * \frac{OG}{d} \quad (3.4)$$

Donde:

OG = Distancia entre el centro de gravedad y el calado medio de trazado del buque (m) (+Si el centro de gravedad está arriba del calado medio, - si este está abajo).

d = Calado medio de trazado del buque (m).

S = factor indicado en la Tabla No. 17 donde T es el periodo natural de balance del buque. Si no se dispone de información suficiente, puede utilizarse la siguiente aproximación:

$$T = \frac{2 * C * B}{\sqrt{Gm}} \text{ [Segundos];} \quad (3.5)$$

Donde:

$$C = 0.373 + 0.023 * \left(\frac{B}{d}\right) - 0.043 * \left(\frac{L}{100}\right);$$

L = Eslora del buque en la línea de agua (m).

B = Manga Moldeada del buque (m).

C_b = coeficiente bloque.

A_k = área total de las quillas de balance o área de la proyección lateral de la quilla de barra, o suma de estas áreas (m²).

G_m = altura metacéntrica corregida por el efecto de superficie libre (m).

T	s
≤ 6	0.100
7	0.098
8	0.093
12	0.065
14	0.053
16	0.044
18	0.038
≥ 20	0.035

B/d	X_1
≤ 2.4	1.0
2.5	0.98
2.6	0.96
2.7	0.95
2.8	0.93
2.9	0.91
3.0	0.90
3.1	0.88
3.2	0.86
3.3	0.84
3.4	0.82
≥ 3.5	0.80

C_B	X_2
≤ 0.45	0.75
0.50	0.82
0.55	0.89
0.60	0.95
0.65	0.97
≥ 0.70	1.0

$\frac{A_k}{L^2}$	k
0	1.0
1.0	0.98
1.5	0.95
2.0	0.88
2.5	0.79
3.0	0.74
3.5	0.72
≥ 4.0	0.70

Tabla No. 27. Parámetros para el cálculo de la aceleración de rolo.

[Fuente: [18]]

3.3.2. Validación de códigos de arquitectura naval.

Todas las restricciones mostradas en esta sección han sido programadas en Matlab, de tal manera que se pueda evaluar rápidamente a cada uno de los prototipos según sea el caso. Para ello se ha realizado una previa ejecución con los datos del Modelo 1 véase en ANEXO G , y se ha obtenido el siguiente resultado.

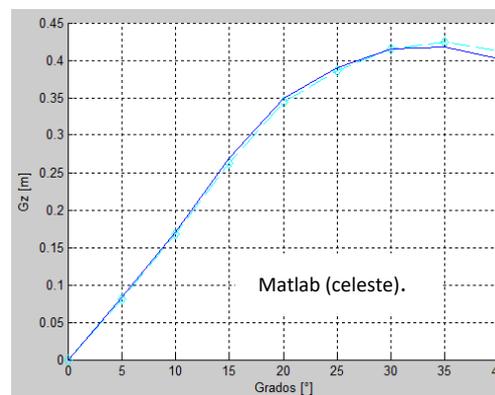


Figura No. 3.4 Curva GZ para el Primer modelo - Validación.

[Fuente: Software Matlab]

3.3.3. Resistencia y propulsión

Para el cálculo de la resistencia al avance de los prototipos que hayan sido evaluados con los criterios de estabilidad establecidos anteriormente, se ha utilizado el método presentado por J. Holtrop and Mermen GGJ [19]. Este presenta la siguiente formulación para el cálculo de la Resistencia total al avance del buque.

$$R_T = R_V + R_{AP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A + R_{wind} \quad (3.6)$$

El cual para hacer uso de estas formulaciones se deberá cumplir el rango de aplicación presentada en la siguiente tabla.

Tipo de Embarcación	Max Fn	Cp	L/B	B/T
Granelero	0.24	0.73 - 0.85	5.1 – 7.1	2.4 – 3.2

Tabla No. 28. Rango de Aplicación de J. Holtrop and Mermen GGJ.

[Fuente: [19]]

3.3.4. Validación de código de resistencia y Propulsión.

Para validar la programación implementada en Matlab de estas formulaciones se usó del software Navcad el cual usa estas formulaciones para el cálculo de la resistencia total. Al evaluar las dimensiones principales de la embarcación preliminar con las formas optimizadas se pudo verificar (Modelo 1 ver ANEXO G), se obtuvo que las curvas de Resistencia total eran similares. Véase la Figura No. 3.5.

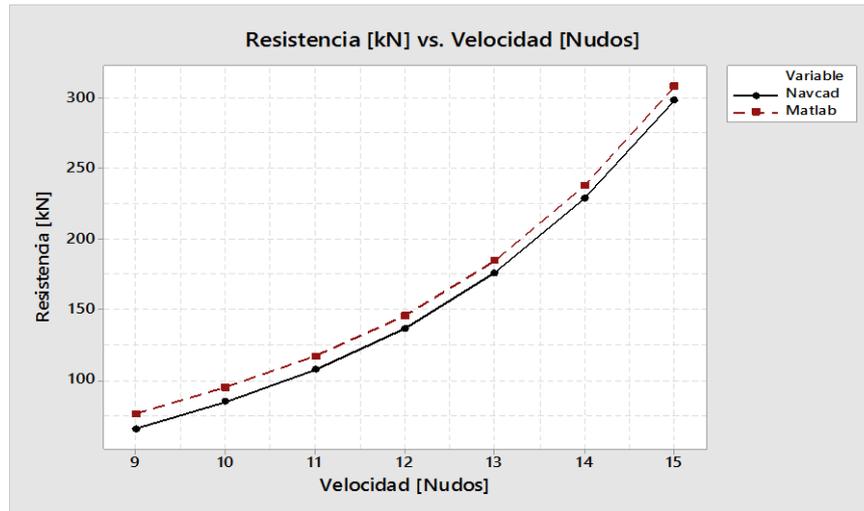


Figura No. 3.5 Curva de Resistencia Total – Validación.

[Fuente: Software Minitab 17.]

3.3.5. Maniobrabilidad

En esta sección, se ha calculado y verificado que el timón cumpla con los requerimientos mínimos establecidos por IMO y ABS tal como se mencionó en el diseño preliminar, para ello se usará las formulaciones presentadas por Lyster, C.A. and Knights [14] y ABS.

Diámetro de giro

$$DG = LPP * \left[4.19 - 203 \frac{Cb}{DEL R} + 47.4 \frac{TRI}{LPP} - 13 \frac{B}{LPP} + \frac{194}{DEL R} - 35.8 \frac{AR}{LPP * T} + 7.79 \frac{AB}{LPP * T} \right] \quad (3.7)$$

Diámetro táctico

$$DT = LPP * \left(\frac{0.91 DG}{LPP} + \frac{0.234 V}{\sqrt{LPP}} + 0.675 \right) \quad (3.8)$$

Obtener la calificación para la habilidad de giro siguiendo se ha utilizado la metodología presentada por ABS cuyo criterio de evaluación se lo presenta a continuación:

Criterios	
$(4.26 - 1.62 \cdot 10^{-6} \Delta) \cdot L < TD \leq 5 \cdot L$	Rtd = 1
$(3.63 - 1.62 \cdot 10^{-6} \Delta) \cdot L < TD \leq (4.26 - 1.62 \cdot 10^{-6} \Delta) \cdot L$	Rtd = 2
$(2.79 - 1.62 \cdot 10^{-6} \Delta) \cdot L < TD \leq (3.63 - 1.62 \cdot 10^{-6} \Delta) \cdot L$	Rtd = 3
$(2.16 - 1.62 \cdot 10^{-6} \Delta) \cdot L < TD \leq (2.79 - 1.62 \cdot 10^{-6} \Delta) \cdot L$	Rtd = 4
$(2.16 - 1.62 \cdot 10^{-6} \Delta) \cdot L > TD$	Rtd = 5

Tabla No. 29. Criterio para evaluar el diámetro táctico.

[Fuente: [13]]

Avance.

Formula presentada para embarcaciones de una hélice:

$$DVC = LPP \left(0.519 \frac{DT}{LPP} + 1.33 \right) \quad (3.9)$$

IMO y ABS, requiere que el avance no exceda 4.5 veces Lpp.

$$ADVC < 4.5 LPP \quad (3.10)$$

Transferencia.

Formula presentada para embarcaciones de una hélice:

$$TRANS = LPP \left(\frac{0.497 \times DT}{LPP} - 0.065 \right) \quad (3.11)$$

3.3.6. Validación de códigos de maniobrabilidad.

Resultados de habilidad de detenerse.

Para evaluar la capacidad para detener la embarcación se siguió la metodología propuesta por Julio Artemio [20] y la cual requiere de la información presentada en la siguiente tabla para su desarrollo, así como el cálculo de la resistencia total con método

de Holtrop, teniendo en cuenta que el barco se mueve en la dirección opuesta, es decir, navegando en reversa.

Lpp [m]	74.35	Masa [Kg seg²/ m]	387359.84
T [m]	5.27	M add [Kg seg² / m]	11620.80
2T/L	0.14	K1	0.03
Δ [ton]	3800	Masa [Kg seg²/ m]	387359.84

Tabla No. 30. Datos ingresados para evaluar la habilidad de detenerse.

[Fuente: Elaboración propia]

La siguiente figura muestra la resistencia total de la embarcación a cualquier velocidad navegando en reversa. Es aconsejable tener los datos de resistencia a baja velocidad para poder tener un mejor enfoque y evitar el proceso de evaluación de resultados sin sentido.

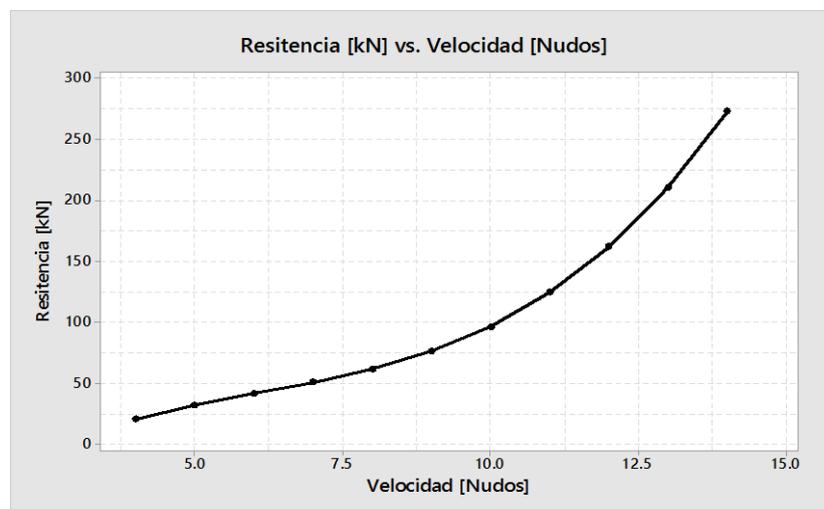


Figura No. 3.6 Curva de Resistencia Total navegando en reversa.

[Fuente: Software Minitab 17.]

Vi	Rt	ÿ	δV	Vi-1	S	T	Vf
(nudos)	(kN)	(m/seg ²)	(m/seg)	(m/seg)	(m)	(seg)	(nudos)
12.3	176.5	0.045	0.00	6.3	0.0	0.0	12.3
12.3	176.5	0.045	0.45	5.9	58.9	10.0	11.5
11.5	140.1	0.036	0.36	5.5	114.2	20.0	10.8
3.8	17.9	0.005	0.05	1.9	1056.6	320.0	3.7
3.7	16.6	0.004	0.04	1.9	1075.1	330.0	3.6
3.6	15.4	0.004	0.04	1.8	1093.3	340.0	3.5
3.5	14.3	0.004	0.04	1.8	1111.1	350.0	3.5

Tabla No. 31. . Cálculo de la Distancia de parada.

[Fuente: Elaboración propia]

La tabla muestra el cálculo de la distancia de parada (S) para el Modelo 1 ANEXO G desarrollada tal y cual muestra la referencia [20].

Con los resultados de esta tabla se puede ver que la distancia S requerida para detener el buque es aproximadamente de 1111.1 m. equivalente a:

$$\frac{S}{L_{pp}} = \frac{1111.1}{74.35} = 14.94 \text{ [lengths]} < 15$$

Resultados regresionales de maniobrabilidad (Matlab).

Se ha realizado un código para evaluar los prototipos. Los resultados del círculo de evolución y habilidad de parada para la embarcación (Modelo 1 ver ANEXO G) se los ha validado con el software Mpp de Michigan y con la metodología de Julio Artemio [20] respectivamente. En la Tabla No. 32 se observan en los resultados obtenidos.

Descripción		Requerimiento	Estado
Diámetro de Giro [m]	206.01		
Diámetro Táctico [m]	265.52 Rtd=3	< 5*Lpp; IMO Rtd>1; ABS	AP AP
Avance [m]	235.11	< 4.5*Lpp; IMO y ABS	AP
Transferencia [m]	125.64		
Prueba de zig-zag 10/10	Rtd=3	IMO y ABS	AP
Prueba de zig-zag 20/20	Rtd=3	IMO y ABS	AP
Habilidad de detenerse	14.94 Lpp Rtd=2	< 15 Lpp; IMO	AP

Tabla No. 32. Resultados regresionales de maniobrabilidad - Matlab.

[Fuente: Elaboración propia]

Resultados del círculo de evolución usando el software Mpp de Michigan.

Para verificar que los resultados obtenidos con el código implementado en Matlab para esta área sea confiable, se presenta una comparación entre los resultados de software MPP de Michigan y Matlab. Observándose a continuación que el máximo error entre ellas es del 4%.

Descripción	Matlab	MPP	% error
Diámetro de giro	206.01	198.06	4.01
Diámetro táctico	262.52	254.07	3.33
Avance	235.11	228.8	2.75
Transferencia	125.64	121.54	3.37

Tabla No. 33. Comparación de Resultados regresionales.

[Fuente: Elaboración propia]

3.4. Desarrollo del Grupo 100: Estructura, peso y mano de obra

3.4.1. Metodología

Para el desarrollo de esta sección se ha implementado un código en Matlab que calcule el escantillón de la embarcación por cada compartimento para las nuevas formas

obtenidas, para ello se han utilizado las formulaciones presentadas por la Sociedad Clasificadora [10]. Para validar estos resultados se ha hecho uso del software Poseidón.

Para determinar el peso estructural se ha utilizado el software Rhinoceros, para ello se ingresa las dimensiones de los perfiles y espesores de planchaje obtenidos del diseño preliminar y así determinar un factor Gamma que sirva para aproximar de mejor manera el peso estructural de cada modelo de la librería de Prototipos. Este cálculo se desarrolla en detalle más adelante.

El grupo tecnológico 100 y 200 ha sido calculado a partir de la estimación del costo del Hombre Hora de cada embarcación, que como ya se mencionó contribuyen a la generación de la Función Objetivo. A continuación, se presenta a modo de algoritmo lo detallado anteriormente.

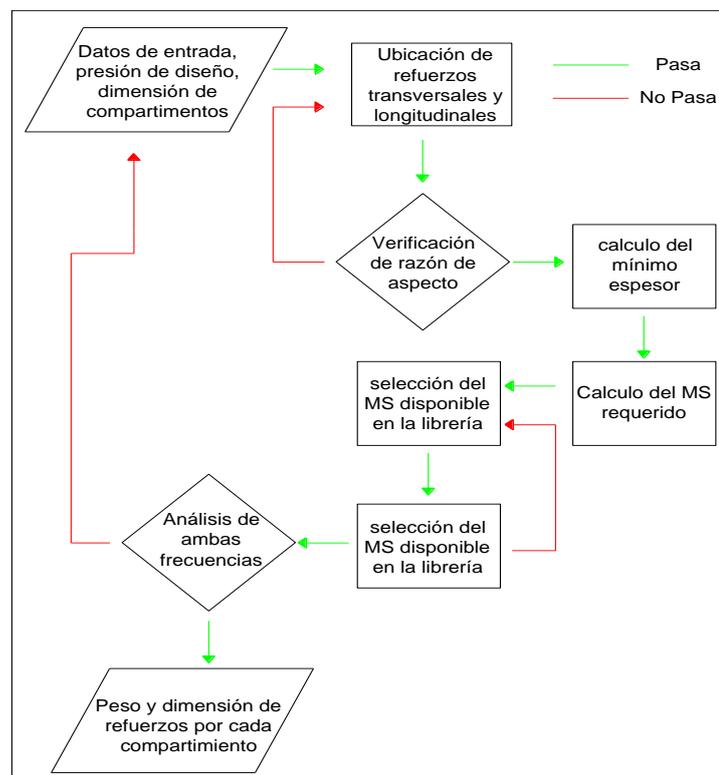


Figura No. 3.7 Flujo para la optimización de estructura.

[Fuente: Elaboración Propia.]

3.4.2. Restricciones

Para el cálculo estructural se han considerado formulaciones presentadas en la Sociedad de Clasificación GL [21] la cual establece restricciones y formulaciones que se ha tomado en cuenta.

- **Variables de Diseño**

Estas variables de diseño han sido determinadas a partir de la aplicación de las formulaciones de cada restricción dependiendo del área del buque. Estas variables se listan a continuación:

- ✓ Separación entre refuerzos longitudinales de Cubierta
- ✓ Separación entre refuerzos transversales de Cubierta
- ✓ Separación entre refuerzos longitudinales de Fondo
- ✓ Separación entre refuerzos transversales de Fondo
- ✓ Separación entre refuerzos longitudinales de Costado
- ✓ Espesor de paneles

- **Variables Pre-asignadas**

Estas variables se han considerado fijas para el cálculo, por lo tanto para el código implementado en Matlab estas no cambian.

- ✓ Espaciamiento entre mamparos
- ✓ Dimensión de compartimentos
- ✓ Separación entre longitudinales primarios de cubierta
- ✓ Separación entre palmejares
- ✓ Separación entre varengas
- ✓ Separación entre bulárcamas
- ✓ Separación entre soportes de sala de maquinas

- **Separación de refuerzos**

GL [10] establece una formulación cuyo resultado es el máximo para la separación entre refuerzos, además se debe tener cuenta que la misma regla menciona que este espaciamiento no deber ser menor a 300 mm.

- **Presión de diseño, Espesor de paneles y modulo seccional de refuerzos**

Para calcular cada uno de los parámetros mencionados y establecer un valor mínimo requerido se han utilizado las formulaciones presentadas por la Sociedad Clasificadora, [10].

- **Pandeo**

Para seleccionar la dimensión de los refuerzos requeridos según lo calculado con las formulaciones de las Sociedades Clasificadoras, se ha tenido en cuenta que estos no tengan problema de pandeo, para ello se ha utilizado lo establecido por RINA, [22]. Esta última indica las relaciones que deben existir entre el alma y ala de los refuerzos.

- **Frecuencia**

La frecuencia de paneles y refuerzos para embarcaciones de una sola hélice, se han determinado utilizando las formulaciones de GL [10] y los límites permitidos por la misma regla.

En ANEXO H se presentan las formulaciones utilizadas en cada uno de los puntos mencionados anteriormente.

3.4.3. Método de cálculo de Hombre Hora y factor Gamma

- **Gamma Factor**

El peso de las embarcaciones que pertenecen a la librería de prototipo ha sido calculado a partir de este factor adimensional. Este factor se multiplica por el peso de cada modelo de la matriz, la siguiente formulación permite calcular este parámetro (γ).

$$\gamma = \frac{W_{\text{modelo en rhino}}}{W_{\text{Programación}}} \quad (3.12)$$

Donde:

$W_{\text{modelo en rhino}}$: Peso obtenido en Rhinoceros, considerando los refuerzos obtenidos en la programación (en la Figura No. 3.2 se mostró el modelo en Rhino 3D con su respectivo rayado estructural).

$W_{\text{Programación}}$: Peso obtenido por medio del código implementado en Matlab que hayan aprobado las restricciones de estructura.

- **Calculo de Hombre Hora**

El Hombre Hora de construcción se lo ha calculado para obtener el costo de construcción cada embarcación usando la información presentada por el manual Guide Repair Estimates, [23]. A continuación, se presenta los principales datos que se han utilizado de la guía.

Panel (mm)	Reparación	Construcción
	HH/ton	HH/ton
6	250	212.5
8	245	208.25
10	240	204
12,5	230	195.5
16	220	187
18	210	178.5
20	200	170

Tabla No. 34. Valores de HH/Ton acorde al espesor del panel.

[Fuente: [23]]

Corrección por ubicación - externa	Factor de incremento
refuerzo vertical lateral por encima de 2 metros de altura y que requieren la puesta en escena para el acceso	1.1
Fondo del casco, zonas accesibles (es decir, no hay retiros de bloques de quilla)	1.12
Plancha de quilla	1.4
Placa garboard	1.25
Quilla de pantoque	1.25
Placa de cubierta	1.15
Corrección por ubicación - Interna	Factor de incremento
Mamparos	1.2
Longitudinal/transversal sobre áreas de DD	1.25
Longitudinal/transversal bajo áreas de DD	1.35

Tabla No. 35. Factor de incremento por complejidad.

[Fuente: [23]]

3.4.4. Resultados

En este apartado se presenta un resumen los resultados obtenidos luego de la aplicación de cada una de las formulaciones correspondientes a las restricciones.

- **Presiones por compartimento**

En la Tabla No. 36 se muestran las presiones determinadas según el compartimento.

Descripción	Popa	Sección Media	Proa	
	Comp. 1	Comp. 2 a 5	Comp. 6	Comp. 7
Presión en el fondo $\left[\frac{KN}{m^2}\right]$	83.355	69.028	78.02	95.46
Presión Bajo línea de agua $\left[\frac{KN}{m^2}\right]$	79.07	61.16	70.28	99.07
Presión Sobre línea de agua $\left[\frac{KN}{m^2}\right]$	60.84	34.53	47.9	90.21
Presión en cubierta $\left[\frac{KN}{m^2}\right]$	25.93	23.58	24.88	26.5
Presión en doble fondo $\left[\frac{KN}{m^2}\right]$		64.45	55.8	

Tabla No. 36. Presiones de Diseño por compartimento.

[Fuente: Elaboración Propia]

- **Separación de refuerzos y razones de aspecto por compartimento**

A continuación, se muestran los resultados que corresponden a la separación de refuerzos y las razones de aspecto por compartimento en el costado.

Espaciamiento entre refuerzos 0,5 m

Para el compartimento 1 tenemos una relación de aspecto de 2,13:1

Para el compartimento 2 tenemos una relación de aspecto de 2,4:1

Para el compartimento 3 tenemos una relación de aspecto de 1,85:1

- **Validación de resultados**

Para validar que el código implementado en Matlab sea confiable al momento compilarlo, se ha realizado una comparación entre el software Poseidón y Matlab.

A continuación, se presenta en resumen una comparación del escantillón en el costado:

		Refuerzo Longitudinal [mm]		Bulárcamas [mm]	
		Matlab	Poseidón	Matlab	Poseidón
Compartimento	1	L 105*9*80*9	L105*11,0*70*11	L345*10,5*120*16	L350*14*120*16
	2	L100*11,0*70*11,0	L105*11,0*70*11,0	L325*10,5*120*14,0	L350*14*120*16
	3	L 105*9*80*9	L 110*9*80*9	PL 8	PL 10
	4				
	5				
	6				
	7	L 100*11,0*60*11	L115*10,0*80*10	L380*10,5*120*18	L400*11*120*18

Tabla No. 37. Comparación de costado 1, entre valores de Matlab y Poseidón

[Fuente: Elaboración Propia]

		Refuerzo Transversal [mm]		Vigas Longitudinales [mm]	
		Matlab	Poseidón	Matlab	Poseidón
Compartimento	1	L255*9*90*13	L250*11*90*11	L500*11.5*115*30	L455*11.6*125*25.0
	2	L255*9*90*13	L255*9*90*13	L455*11.6*125*25	L 455*11.6*125*25.
	3	-----	-----	PL 10	PL 8
	4				
	5				
	6				
	7	L255*10,0*90*14	L225*12*100*14	L350*11.5*115*18	L370*12*115*18

Tabla No. 38. Comparación de costado 2, entre valores de Matlab y Poseidón

[Fuente: Elaboración Propia]

- **Valor de peso y factor Gamma**

Se ha determinado el peso de la embarcación y el factor gamma, obteniéndose los siguientes valores:

$$W_{\text{modelo en Rhino}}: 671.03 \text{ (Ton)} \text{ y } W_{\text{Programación}}: 501.65 \text{ (Ton)}$$

$$\gamma = 1.34$$

3.5. Desarrollo de la optimización de dimensiones principales

Para el desarrollo de la optimización se han utilizado los resultados obtenidos en la sección 3.4 de escantillón y peso estructural. Por lo tanto, se tiene como principal objetivo encontrar las dimensiones principales de la embarcación que minimicen el costo de construcción de la misma, verificando que estas cumplan las restricciones establecidas en la sección 3.3.

3.5.1. Metodología de optimización

A continuación, se presenta la metodología general de optimización que se ha aplicada.

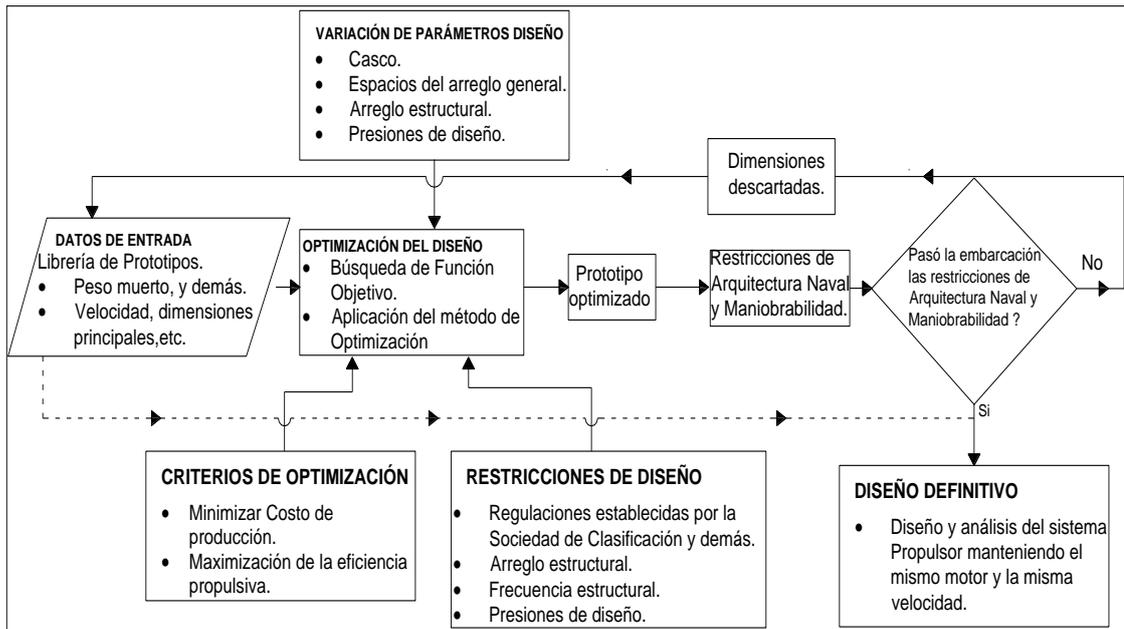


Figura No. 3.8 Metodología de optimización del proyecto.

[Fuente: Elaboración propia.]

La Figura No. 3.8 muestra de manera general lo que se ha venido desarrollando en este capítulo, cabe mencionar que el proyecto se lo ha realizado de esta manera por decisión de los autores del presente proyecto integrador.

Para el prototipo que haya cumplido con estos criterios y restricciones se procede a diseñar y analizar el sistema propulsor manteniendo el mismo motor y velocidad de diseño obtenido en el diseño preliminar. Para el prototipo que no cumpla se lo descartará de la librería de prototipos siguiendo en búsqueda de otro prototipo con la función objetivo.

3.5.2. Generación de la función Objetivo

La siguiente función objetivo ha sido obtenida mediante el método de regresión polinomial multivariable a partir de los costos obtenidos en la Tabla No. 39. La metodología aplicada para determinar estos precios es explicada en detalle en el capítulo de Análisis del Proyecto.

A seguir se presenta la ecuación objetivo con las variables principales de cada prototipo como son L, B y D.

$F.O.(L,B,D)$

$$= a_1 - a_2D \pm a_3B + a_4BD - a_5L + a_6LD + a_7LB + a_8L^2 + a_9B^2 + a_{10}D^2[\$]. \quad (3.13)$$

Donde:

a1: 12995279.7252 a6: 7620.96750262
a2: 1025839.14514 a7: 2470.7316618
a3: 353518.278893 a8: 154.322643793
a4: 6122.03207811 a9: 6697.48634773
a5: 90066.7777376 a10: 39463.7272966

Prototipo	L	B	D	Costo estimado \$	Costo interpolado \$	Error
1	78	13.2	6.8	5,296,782.81	5,394,135.41	1.84
2	84.91	15.78	7.22	5,899,680.88	5,880,177.10	0.33
3	73.39	15.78	7.22	5,568,923.75	5,553,308.30	0.28
4	79.15	15.78	7.22	5,716,447.25	5,711,622.65	0.08
5	84.91	12	7.22	5,500,130.88	5,553,098.28	0.96
6	73.39	12	7.22	5,399,884.92	5,333,818.97	1.22
7	79.15	12	7.22	5,468,228.46	5,438,338.57	0.55
8	84.91	13.89	7.22	5,684,838.88	5,692,713.60	0.14
9	73.39	13.89	7.22	5,375,455.01	5,419,639.55	0.82
10	79.15	13.89	7.22	5,552,693.79	5,551,056.52	0.03
11	84.91	15.78	5.67	5,467,380.07	5,529,024.11	1.13
12	73.39	15.78	5.67	5,345,754.50	5,338,235.31	0.14
13	79.15	15.78	5.67	5,439,336.27	5,428,509.65	0.20
14	79.15	12	5.67	5,134,560.67	5,191,094.56	1.10
15	84.91	13.89	5.67	5,390,953.89	5,359,495.10	0.58
16	73.39	13.89	5.67	5,254,728.52	5,222,501.04	0.61
17	79.15	13.89	5.67	5,309,940.41	5,285,878.02	0.45
18	84.91	15.78	6.445	5,718,223.18	5,680,897.71	0.65
19	73.39	15.78	6.445	5,392,898.91	5,422,068.90	0.54
20	79.15	15.78	6.445	5,530,279.18	5,546,363.25	0.29
21	84.91	12	6.445	5,432,778.41	5,371,753.38	1.12

22	73.39	12	6.445	5,168,381.14	5,220,514.07	1.01
23	79.15	12	6.445	5,319,925.45	5,291,013.67	0.54
24	84.91	13.89	6.445	5,467,796.47	5,502,401.45	0.63
25	73.39	13.89	6.445	5,313,085.43	5,297,367.39	0.30
26	79.15	13.89	6.445	5,460,701.79	5,394,764.37	1.21

Tabla No. 39 Costos de producción del Grupo 100 y 200

[Fuente: Elaboración propia]

3.5.3. Selección del método de optimización

Para la selección del método de optimización se ha utilizado un método basado en el algoritmo genético. Éste necesita límites en cada una de sus variables, el método permite encontrar las variables que generen el menor costo.

Se ha realizado un análisis de las restricciones de Arquitectura Naval a cada uno de los prototipos, Como se muestra en la Tabla No. 40, los que cumplan serán usados para generar los límites de las variables al momento de aplicar el algoritmo genético.

Prototipo	L	B	D	Aceleración de Rolido	Estabilidad
1	78	13.2	6.8	SI	SI
2	84.91	15.78	7.22	SI	SI
3	73.39	15.78	7.22	SI	SI
4	79.15	15.78	7.22	SI	SI
5	84.91	12	7.22	NO	NO
6	73.39	12	7.22	NO	NO
7	79.15	12	7.22	NO	NO
8	84.91	13.89	7.22	SI	SI
9	73.39	13.89	7.22	SI	SI
10	79.15	13.89	7.22	SI	SI
11	84.91	15.78	5.67	SI	SI
12	73.39	15.78	5.67	SI	SI
13	79.15	15.78	5.67	SI	SI
14	79.15	12	5.67	NO	NO
15	84.91	13.89	5.67	SI	SI
16	73.39	13.89	5.67	SI	SI

17	79.15	13.89	5.67	SI	SI
18	84.91	15.78	6.445	SI	SI
19	73.39	15.78	6.445	SI	SI
20	79.15	15.78	6.445	SI	SI
21	84.91	12	6.445	SI	NO
22	73.39	12	6.445	NO	NO
23	79.15	12	6.445	NO	SI
24	84.91	13.89	6.445	SI	SI
25	73.39	13.89	6.445	SI	SI
26	79.15	13.89	6.445	SI	SI

Tabla No. 40. Restricciones de Arquitectura y Maniobrabilidad.

[Fuente: Elaboración propia]

Se puede observar que la estabilidad de algunos prototipos se ve afectada cuando la manga es igual a 12 m, descartando los prototipos que tengan esta manga. Fijando el primer intervalo de trabajo como se ve en la Tabla No. 41.

.	L [m]	B [m]	D [m]
Min	73.39	13.2	5.67
Max	84.91	15.78	7.22

Tabla No. 41. Intervalo inicial para el algoritmo genético.

[Fuente: Elaboración propia.]

3.5.4. Aplicación del método de optimización y verificación de restricciones

A partir del intervalo obtenido en la Tabla No. 41 se ha inicializado el método de algoritmo genético. Obteniendo como resultado parcial las siguientes dimensiones. Véase Tabla No. 42.

L [m]	B [m]	D [m]	Costo [\$]	
73.39	13.20	5.67	4'853,744.10	
Descripción			Resultado en Matlab	Estado
Área bajo la curva GZ hasta 30° en m*rad tiene que ser > 0.055			0.075	AP
Área bajo la curva GZ hasta 40° en m*rad tiene que ser > 0.055			0.092	AP
Área bajo la curva GZ entre 30° y 40° en m*rad tiene que ser > 0.03			0.016	RP
Aceleración de Rolido.				AP

Tabla No. 42. Resultados parciales del intervalo inicial.

[Fuente: Elaboración propia.]

Al haber evaluado estas dimensiones con las restricciones de arquitectura naval se obtuvo que el área bajo la curva Gz entre 30 y 40° es menor que la mínima requerida. Por lo que se ha procedido a cambiar la manga y el puntal con el fin de saber cuál de los intervalos generados a continuación da el menor costo, siendo este el intervalo B como se ve la Tabla No. 43.

	Intervalo A			Intervalo B		
	L [m]	B [m]	D [m]	L [m]	B [m]	D [m]
Min	73.39	13.89	5.67	73.39	13.20	6.445
Max	84.91	15.78	7.22	84.91	15.78	7.22
Dimensiones Optimizadas	<u>73.39</u>	<u>13.89</u>	<u>5.67</u>	<u>73.39</u>	<u>13.20</u>	<u>6.445</u>
Costo [\$]	<u>5'157,091</u>			<u>5'133,797</u>		

Tabla No. 43. Intervalos A y B para el algoritmo genético.

[Fuente: Elaboración propia]

Al haber evaluado el rango obtenido en el intervalo B se obtuvo que estas no cumplían con el mínimo francobordo requerido para estas dimensiones como se ve en la Tabla No. 44.

Descripción	Resultado en Matlab	Estado
Área bajo la curva GZ hasta 30° en m*rad tiene que ser > 0.055	0.1122	AP
Área bajo la curva GZ hasta 40° en m*rad tiene que ser > 0.055	0.1539	AP
Área bajo la curva GZ entre 30° y 40° en m*rad tiene que ser > 0.03	0.0417	AP
Aceleración de Rolido.		AP
Mínimo Francobordo requerido 1.05 [m]	0.9	RP

Tabla No. 44. Resultados para el intervalo B.

[Fuente: Elaboración propia]

Finalmente, se ha establecido el intervalo final como se ve a continuación en la Tabla No. 45 y en la Tabla No. 46.

Descripción	Intervalo C		
	L [m]	B [m]	D [m]
Min	73.39	13.20	6.70
Max	84.91	15.78	7.22
Dimensiones	<u>73.39</u>	<u>13.20</u>	<u>6.70</u>
Costo [\$]	<u>5'239,846</u>		

Tabla No. 45. Intervalo final para el algoritmo genético.

[Fuente: Elaboración propia]

Descripción	Resultado en Matlab	Estado
Área bajo la curva GZ hasta 30° en m*rad tiene que ser > 0.055	0.1091	AP
Área bajo la curva GZ hasta 40° en m*rad tiene que ser > 0.055	0.1528	AP
Área bajo la curva GZ entre 30° y 40° en m*rad tiene que ser > 0.03	0.0438	AP
Aceleración de Rolido.		AP
Mínimo Francobordo requerido 1.107 [m]	1.135	AP
Maniobrabilidad.		AP

Tabla No. 46. Resultados para el intervalo final.

[Fuente: Elaboración propia]

3.6. Resultados de la optimización

3.6.1. Características principales del diseño definitivo

A continuación, se presenta las características principales del diseño definitivo obtenidas a partir del modelo 3D de la embarcación y de la optimización realizada anteriormente, véase Tabla No. 47.

Descripción	valor	Unidades
Desplazamiento Δ	3800	[ton]
Volumen	3707.18	[m ³]
Tm	5.64	[m]
Lwl	72.79	[m]
Lpp	70.14	[m]
Bwl	13.19	[m]
Superficie Mojada	1369.50	[m ²]
Máxima Área Seccional	73.27	[m ²]
Área del Plano de agua	765.16	[m ²]
Coficiente Prismático	0.695	
Coficiente bloque	0.684	
Coficiente de Max. Área seccional	0.984	
Coficiente del plano de agua	0.796	
LCB (+proa)	1.155	[m]
LCF (+proa)	-0.903	[m]
KB	2.996	[m]
KG	4.34	[m]
V	12.33	[nudos]
N motor	900	[RPM]
R reducción	4.041	
Potencia	3390	[HP]
Z	4.00	
L	73.82	[m]
B	13.2	[m]
D	6.7	[m]

Tabla No. 47. Principales características del diseño definitivo.

[Fuente: Elaboración propia]

3.6.2. Formas obtenidas de la optimización

A continuación, se presenta el Modelado 3D realizado en Rhinoceros.

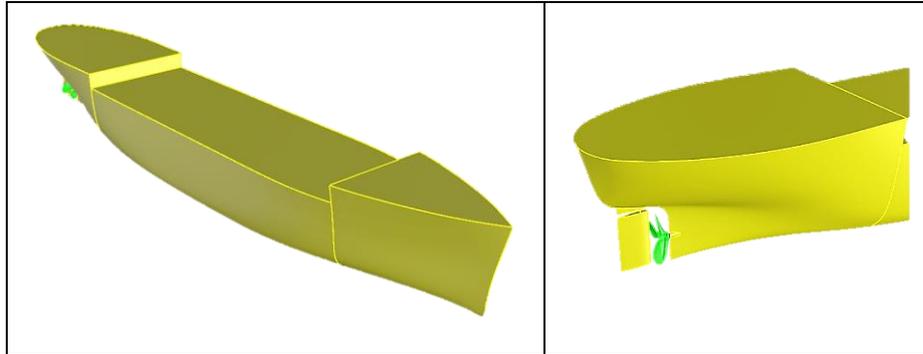


Figura No. 3.9 Modelo 3D obtenido de la optimización.

[Fuente: Elaboración propia]

3.6.3. Estructura del diseño definitivo

Como resultado de la estructura obtenida con Matlab por cada compartimento del diseño definitivo, se obtuvo las siguientes dimensiones de refuerzos primarios y secundarios tanto para la cubierta, costado y fondo. Véase a continuación:

- **Escantillón estructural de cubierta**

		RLS	RLP	RTP	RTS	PL
Compartimento	1	125*8*60*8	350*22*190*22	550*32*240*32	250*16*130*18	7
	2	100*8*60*8	270*22*190*22	550*32*240*32	250*16*130*18	7
	3	95*8*50*8	135*14*90*14	455*18*120*25	---	9
	4	85*8*55*8	135*14*90*14	430*18*120*25	---	9
	5	90*8*55*8	135*14*90*14	450*18*120*25	---	9
	6	75*9*50*9	135*14*90*14	350*18*120*18	---	9
	7	--	125*8*60*8	245*18*90*16	155*12*75*12	7
	8	--	55*5*40*5	225*14*95*14	125*8*60*8	7

Tabla No. 48. Estructura de cubierta del Diseño definitivo.

[Fuente: Elaboración propia]

- **Escantillón estructural de Costado.**

A continuación, se presenta la estructura del costado, las cuales se muestran por separado en la Tabla No. 49 y Tabla No. 50.

		RLS	RLP	RTP	RTS
Compartimento	1	130*75*8	470*11.5*120*28	625*40*280*45	350*24*200*24
	2	130*75*8	900*30*230*30	625*40*280*45	350*24*200*24
	3	130*60*8	10	10	
	4	130*70*8	10	10	
	5	130*65*8	10	10	
	6	100*75*9	10	10	
	7	130*60	350*10.5*115*16	355*10.5*125*16	230*11*90*15

Tabla No. 49. Estructura de costado del Diseño definitivo (a).

[Fuente: Elaboración propia]

		RLDC	PLDC	PL
Compartimento	1			10
	2			10
	3	130*60*8	10	10
	4	130*70*8	10	10
	5	130*65*8	10	10
	6	100*75*9	10	10
	7			10

Tabla No. 50. Estructura de costado del Diseño definitivo (b).

[Fuente: Elaboración propia]

- **Escantillón estructural de Fondo.**

La estructura de fondo se presenta a continuación por cada compartimento como se ve en la Tabla No. 51.

		RLS	RLP	RTP	RLDF	PLDF	PL
Compartimento	1	125*78*8		14			10
	2	125*80*10		14	95*75*9		10
	3	120*85*10	8	10	95*75*9	9	10
	4	120*85*10	8	10	95*75*9	9	10
	5	120*85*10	8	10	95*75*9	9	10
	6	105*65*11	8	10	95*75*9	9	10
	7	225*10*85*14		10			10

Tabla No. 51. Estructura de fondo del Diseño definitivo

[Fuente: Elaboración propia]

Donde:

RLS: Refuerzo longitudinal secundario.

RLP: Refuerzo longitudinal primario.

RTP: Refuerzo transversal primario.

RTS: Refuerzo transversal secundario.

RLDC: Refuerzo longitudinal de doble casco

PLDC: Panel de doble Casco

RLDF: Refuerzo longitudinal de doble fondo

PLDF: Panel de doble Fondo

PL: Panel según la sección

Todo esto como resultado de un espacio entre refuerzos secundarios longitudinales de:

	s (mm)
Fondo	500
Costado	500
Cubierta	550

Tabla No. 52. Espaciamiento entre refuerzos longitudinales.

[Fuente: Elaboración propia]

3.7. Cálculo de la geometría de un bulbo para el diseño definitivo

Para las formas obtenidas en la sección 3.6.2, se ha realizado el dimensionamiento de las principales características del bulbo, siempre y cuando la embarcación cumpla con los parámetros recomendados por [4].

La evaluación de estos parámetros se presenta a continuación y se observa que se cumple con todos. Véase Tabla No. 53.

Parámetros	Verificación	Estado
$0.65 < C_b < 0.815$	$C_b = 0.684$	Cumple
$5.5 < L/B < 7.0$	$73.82/13.2 = 5.59$	Cumple
$C_b \cdot B/L \leq 0.135$	$0.1223 \leq 0.135$	Cumple

Tabla No. 53. Parámetros del bulbo de proa para el diseño definitivo.

[Fuente: Elaboración propia]

La simbología seguida en este proceso es como se ve en la siguiente figura.

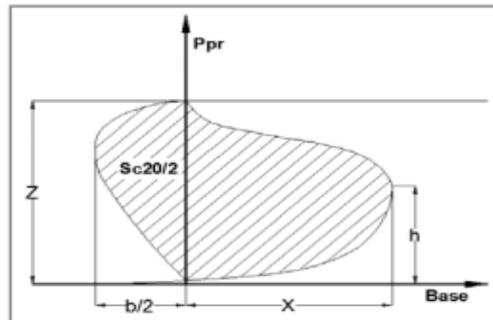


Figura No. 3.10 Variables consideradas para determinar la geometría del bulbo.

[Fuente: [24].]

Para calcular la geometría del bulbo se ha elaborado un código en Matlab que calcule y chequee que esta geometría genere la menor resistencia al avance. En ANEXO J se detalla las formulaciones que se han utilizado en el desarrollo de esta sección como también las recomendaciones para este tipo de embarcación.

Este código al ejecutarlo empieza estimando el coeficiente transversal del bulbo S_a20 desde un valor de 0.09 hasta 0.12, para cada uno de estos valores se ingresa un vector de valores de h entre 0.35 y 0.55 veces el calado de sección media (Tsm) tal y como se ve en la Tabla No. 54. Este programa guarda estos vectores de S_a20 y h para posteriormente calcular las dimensiones del bulbo que se han generado en cada iteración y con lo tanto calcular la resistencia al avance de estas usando las formulaciones presentadas por Holtrop.

3.7.1. Resultados del diseño del bulbo para el diseño definitivo

Como se puede observar en la Tabla No. 54 se ha generado la mínima resistencia total al avance dando un valor de (171.78 kN), este valor se ha logrado alcanzar cuando la embarcación tiene un bulbo con una altura de máxima protuberancia h de 2.37 [m] y un coeficiente de área transversal del bulbo S_a20 de 0.12. En la siguiente tabla se presenta el rango desde 0.1 a 0.12 generado para S_a20 .

R [kN]	Coeficiente Sa20						
	h [m]	0.095	0.1	0.105	0.11	0.115	0.12
	1.69	173.82	173.53	173.25	172.98	172.72	172.47
	1.77	173.73	173.43	173.15	172.88	172.62	172.36
	1.86	173.63	173.33	173.05	172.78	172.51	172.26
	1.94	173.53	173.23	172.95	172.67	172.41	172.15
	2.03	173.43	173.13	172.84	172.57	172.30	172.05
	2.11	173.32	173.02	172.74	172.46	172.20	171.95
	2.20	173.22	172.92	172.64	172.36	172.11	171.86
	2.28	173.12	172.82	172.54	172.28	172.03	171.80
	2.37	173.03	172.74	172.47	172.22	171.99	171.78
	2.45	172.96	172.69	172.44	172.21	172.01	171.83
	2.54	172.93	172.68	172.46	172.27	172.12	171.99
	2.62	172.97	172.76	172.60	172.47	172.37	172.32
	2.70	173.12	172.99	172.89	172.85	172.85	172.90
	2.79	173.46	173.42	173.43	173.50	173.63	173.81
	2.87	174.05	174.14	174.30	174.52	174.80	175.15
	2.96	175.01	175.27	175.60	176.00	176.48	177.03
	3.04	176.41	176.87	177.41	178.03	178.73	179.51
	3.13	178.34	179.03	179.81	180.67	181.61	182.64
	3.21	180.82	181.76	182.78	183.90	185.10	186.39
	3.30	183.81	184.99	186.27	187.64	189.10	190.65
	3.38	187.16	188.59	190.11	191.73	193.43	195.22

Tabla No. 54. Resistencia Total del buque en función de S_a20 y h .

[Fuente: Elaboración propia]

En la siguiente tabla se muestra lo estimado para la geometría del bulbo.

Sc20 [m²]	8.80
X [m]	2.04
B [m]	2.11
h [m]	2.37
%Tf	42

Tabla No. 55 Dimensiones estimadas para la Geometría del bulbo.

[Fuente: Elaboración propia]

Se ha procedido a Modelar el bulbo de proa utilizando el software Rhinoceros, y se ha tratado de obtener las dimensiones obtenidas en la Tabla No. 55. Como se puede observar en la Figura No. 3.11, se ha optado por cambiar las formas de popa y proa presentadas en el diseño definitivo adicionando un bulbo que ayude a mejorar el comportamiento de la hélice en popa y minimizar la resistencia al avance del buque. Obteniendo la siguiente geometría.

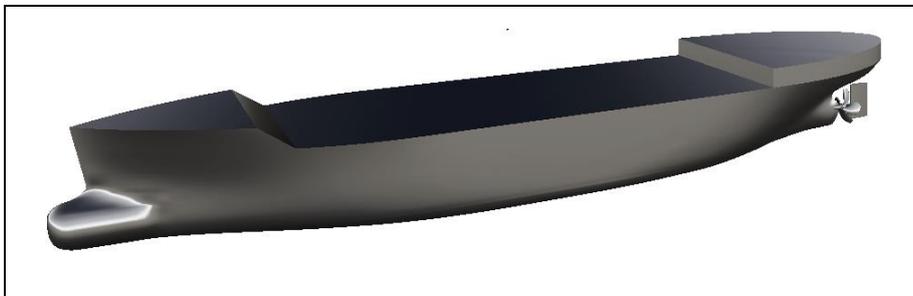


Figura No. 3.11 Modelo 3D del diseño definitivo con bulbo de proa y popa.

[Fuente: Elaboración propia.]

Las dimensiones finales del bulbo se presentan en la Tabla No. 56

Sc20 [m²]	8.20
X [m]	2.06
b [m]	3.10
h [m]	2.35
%Tf	41

Tabla No. 56. Dimensiones finales para la Geometría del bulbo.

[Fuente: Elaboración propia]

Para estas nuevas formas, a continuación, se presentan sus principales características.

Desplazamiento [ton] Δ	3800	Cp	0.702
Volumen [m³]	3707.43	Cb	0.691
Tm [m]	5.58	Cwp	0.798
Lwl [m]	72.81	Cm	0.984
Lpp [m]	71.01	LCB (+proa) [m]	0.426
Bwl [m]	13.19	LCF (+proa) [m]	-2.044
Área Mojada [m²]	1399.28	L [m]	73.823
Máxima sección de área [m²]	72.49	B [m]	13.2
Área del plano de agua [m²]	767.33	D [m]	6.7

Tabla No. 57. Principales características del diseño definitivo con bulbo.

[Fuente: Elaboración propia]

3.8. Cálculo de resistencia al avance del diseño definitivo usando el Método de Holtrop

En esta sección se ha analizado el beneficio que genera la presencia del bulbo en proa con la geometría obtenida en la sección 3.7, para ello nuevamente se hizo uso del software Maxsurf, permitiendo manipular la resistencia al avance para diferentes velocidades utilizando así mismo las formulaciones presentadas en el método de Holtrop. Las cuales están entre 4 y 16 nudos.

Con los resultados obtenidos de resistencia al avance del diseño definitivo se presentan en la Figura No. 3.12, se puede observar que la adición de un bulbo disminuye la resistencia al avance cuando se navega a velocidades mayores a 11 nudos, siendo este el caso del proyecto. Ya que la velocidad de diseño de esta embarcación es de 12.33 nudos.

Cabe mencionar que es recomendable adicionar bulbo a una embarcación cuando el número de Froud es mayor a 0.25, Por lo tanto, para las características de la embarcación este número de Froud tiene un valor de 0.237.

Para la velocidad de diseño, la resistencia total sin bulbo sería de 109.35 kN y con bulbo sería de 101.49 kN, Esta caída de resistencia representa un 7.18% de 109.35 kN.

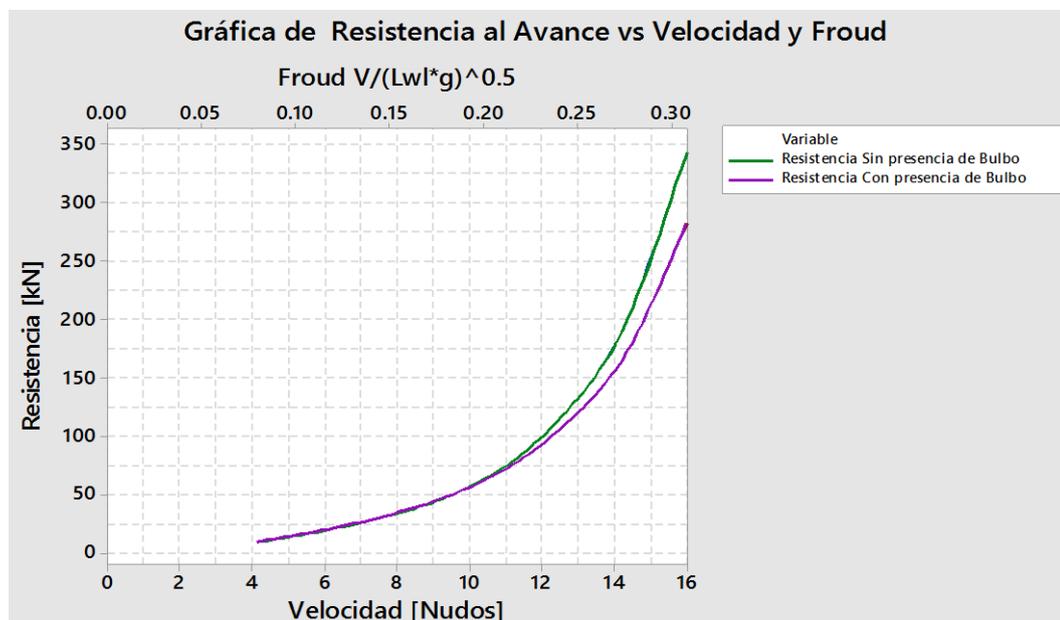


Figura No. 3.12 Resistencia al avance Vs Velocidad y Número de Froud- DD.

[Fuente: Software Minitab 17.]

3.9. Cálculo de resistencia al avance del diseño definitivo con y sin bulbo aplicando CFD.

Para determinar el beneficio que representa la adición de un bulbo a esta embarcación se ha realizado la estimación de la resistencia al avance del casco desnudo, sin considerar apéndices. Por lo tanto se ha utilizado como herramienta de predicción el software OpenFoam.

Para la turbulencia del sistema se ha utilizado el modelo de turbulencia SST (Menter) $k-\omega$ por tener mayor exactitud en los resultados que se obtienen al aplicar este método. Y para la simulación se ha utilizado el solucionador InterFoam ya que se considerará que el buque permanecerá estático desde su centro de gravedad mientras que el fluido está en movimiento. Este solucionador de InterFoam resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS) utilizando el método de volúmenes finitos, y captura la superficie libre usando el método de volumen de fluido (VOF) para resolver las interfaces entre aire y el agua.

Todos los resultados de la simulación presentados en este trabajo fueron creados usando OpenFoam versión 3.0.1. Modificaciones en el solucionador de InterFoam han sido necesarias para permitir realizar las simulaciones para el desarrollo del proyecto.

3.9.1. Modelado y Mallado

Para la generación de la resistencia al avance del casco desnudo, se utilizó modelos de 4.5 m de eslora. El dominio (blockMeshDict) se presenta en la Tabla No. 58. Las formas de los cascos analizados se presentan en la Figura No. 3.9 y en la Figura No. 3.11. Estas formas corresponden a series 60. Las formas fueron modeladas en Rhinoceros, exportadas en formato STL, tipo de archivo ASCII para luego ser importadas por OpenFoam.

Descripción	Modelo Lm = 4.5 [m]	
	Desde el CG a Proa (x)	2.5 Lm
Desde el CG a Popa (-x)	4.5 Lm	20.25
Desde el CG a cada costado (+-y)	3 Lm	13.50
Desde la quilla al fondo	3 Lm	13.50
Desde la cubierta a la parte superior	1.5 Lm	6.75

Tabla No. 58. Dominio considerado para todas las simulaciones.

[Fuente: Elaboración propia]

Para el análisis de la interferencia de agua y aire, ITTC recomienda introducir en el dominio una separación por arriba y abajo de la línea de agua, para este dominio se ha escogido una separación de 0.2 veces la eslora del modelo (Lm). Para que los resultados obtenidos en la interfaz agua-aire tengan una mejor exactitud, se ha adicionado otra separación de aproximadamente 0.015 veces la eslora del modelo, estas separaciones se pueden apreciar en la Figura No. 3.13.

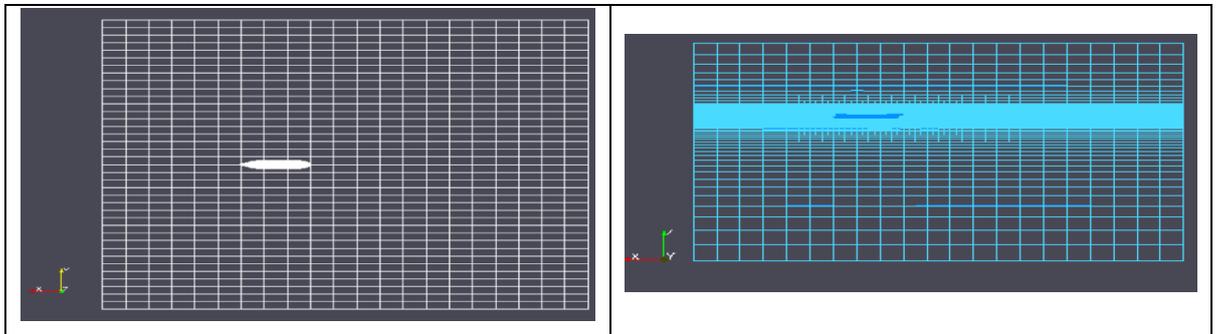


Figura No. 3.13 Vista de perfil del dominio de la simulación

[Fuente: Elaboración propia.]

A seguir se presenta un esquema general del dominio que se ha utilizado.

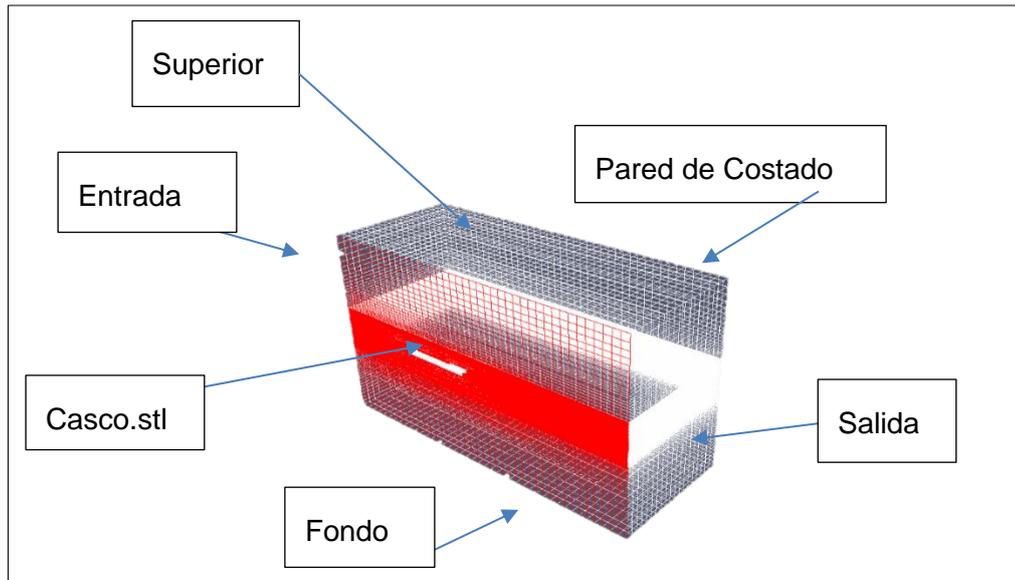


Figura No. 3.14 Esquema de dominio considerado para las simulaciones.

[Fuente: Software OpenFoam]

3.9.2. Rango de velocidades a analizar.

Para los modelos analizados se ha usado como factor de escala $\frac{L_{real}}{L_{modelo}}$ igual a 16.4. La estimación de las velocidades del modelo ha sido realizada de acuerdo a la siguiente fórmula.

$$V_{modelo} = V_{Buque} * \left(\frac{L_{real}}{L_{modelo}} \right)^{-0.5} \quad (3.14)$$

V_{Buque} [nudos]	V_{Buque} [m/s]	V_{Modelo} [m/s]
8	4.115	1.016
9	4.630	1.143
10	5.144	1.270
11	5.658	1.397
12	6.173	1.524
13	6.687	1.651
14	7.202	1.778

Tabla No. 59. Rango de velocidades a analizar.

[Fuente: Elaboración propia]

3.9.3. Resultados obtenidos para la resistencia al avance por CFD

Debido a la simetría del modelo el cálculo de la resistencia al avance ha sido realizado para la mitad del modelo en cada velocidad.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la resistencia al avance del diseño definitivo sin bulbo y con bulbo.

3.9.3.1. Resistencia al avance sin bulbo

A continuación, se presentan los resultados que se han obtenido para el modelo sin bulbo. Véase Figura No. 3.15 y Figura No. 3.16.

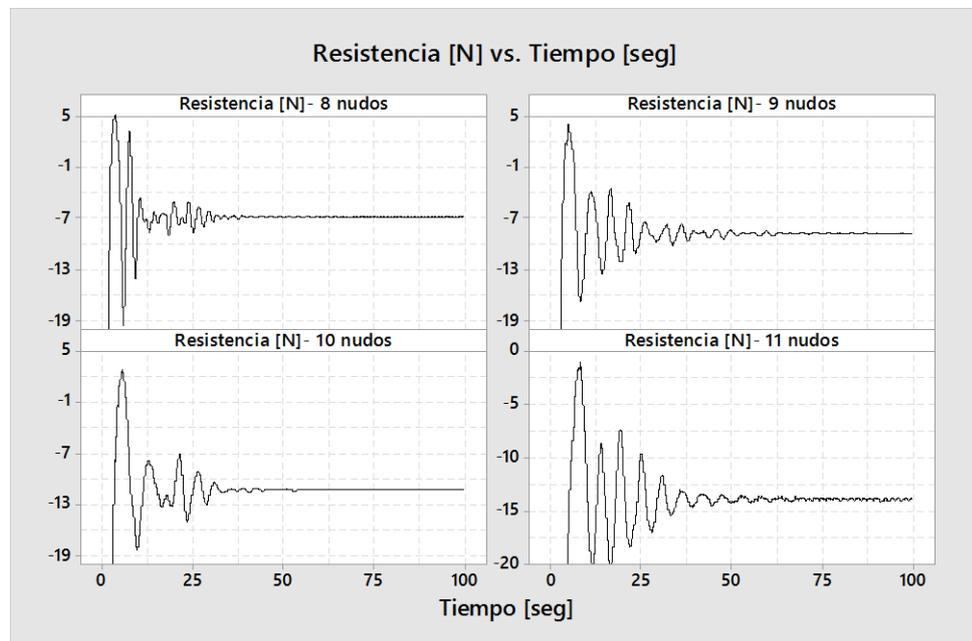


Figura No. 3.15 Resistencia del casco desnudo para el modelo sin bulbo (a).

[Fuente: Software Minitab 17.]

Para la velocidad de 8 nudos (1.016 m/s para el modelo) como se ve en la Figura No. 3.15 , se observa que la convergencia se da a partir de 50 [seg]. La resistencia al avance del casco desnudo para la mitad del modelo es de 6.8819 N, Por tanto, la resistencia total del modelo para la velocidad de 1.016 m/s. será de:

13.763 N.

Este y los demás resultados de resistencia al avance sin bulbo han sido comparados con el método de estimación de resistencia de Holtrop. Observando que el mayor porcentaje de error obtenido con CFD y el método de Holtrop son del 2%, como se ve a continuación:

Método	Resistencia [N]
CFD	13.763
Holtrop	14.050
Error	2%

Tabla No. 60. Comparación de resultados de Resistencia de CFD y Holtrop.

[Fuente: Elaboración propia]

Por lo tanto se ha considerado válido el entorno de trabajo ingresado en OpenFoam para el modelo de 4.5 m sin bulbo.

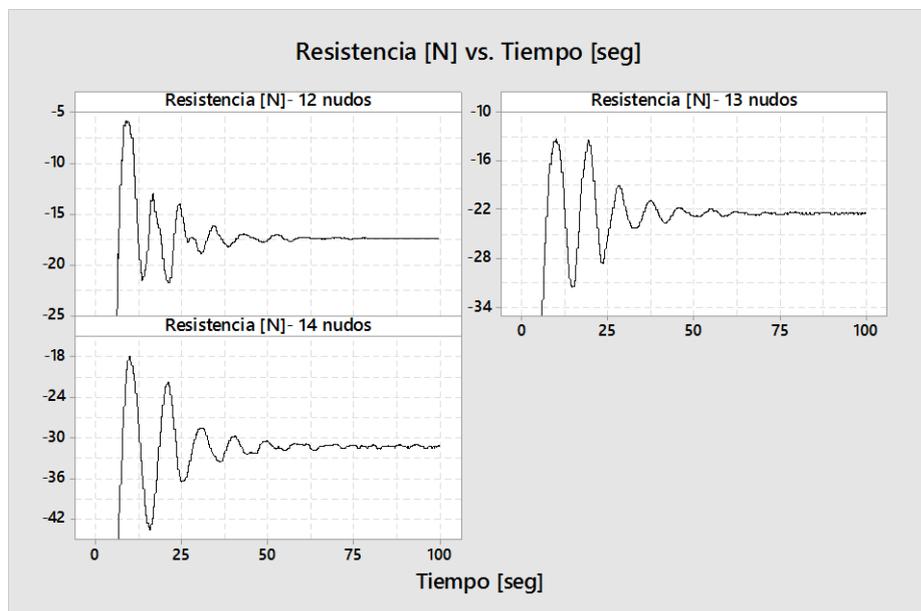


Figura No. 3.16 Resistencia del casco desnudo para el modelo sin bulbo (b).

[Fuente: Software Minitab 17.]

En la Tabla No. 61 se muestra la Resistencia al avance que se ha obtenido para cada una de estas velocidades.

Velocidad [m/s]	Resistencia de la mitad del casco [N]	Resistencia Total [N]
1.016	6.882	13.764
1.143	8.784	17.568
1.270	11.283	22.567
1.397	13.914	27.828
1.524	17.435	34.870
1.651	22.487	44.975
1.778	31.287	62.575

Tabla No. 61 Comparación de resultados de Resistencia de CFD sin bulbo.

[Fuente: Elaboración propia]

3.9.3.2. Resistencia al avance con bulbo

A continuación, se presentan los resultados que se han obtenido para el modelo con bulbo. Véase Figura No. 3.17 y Figura No. 3.18.

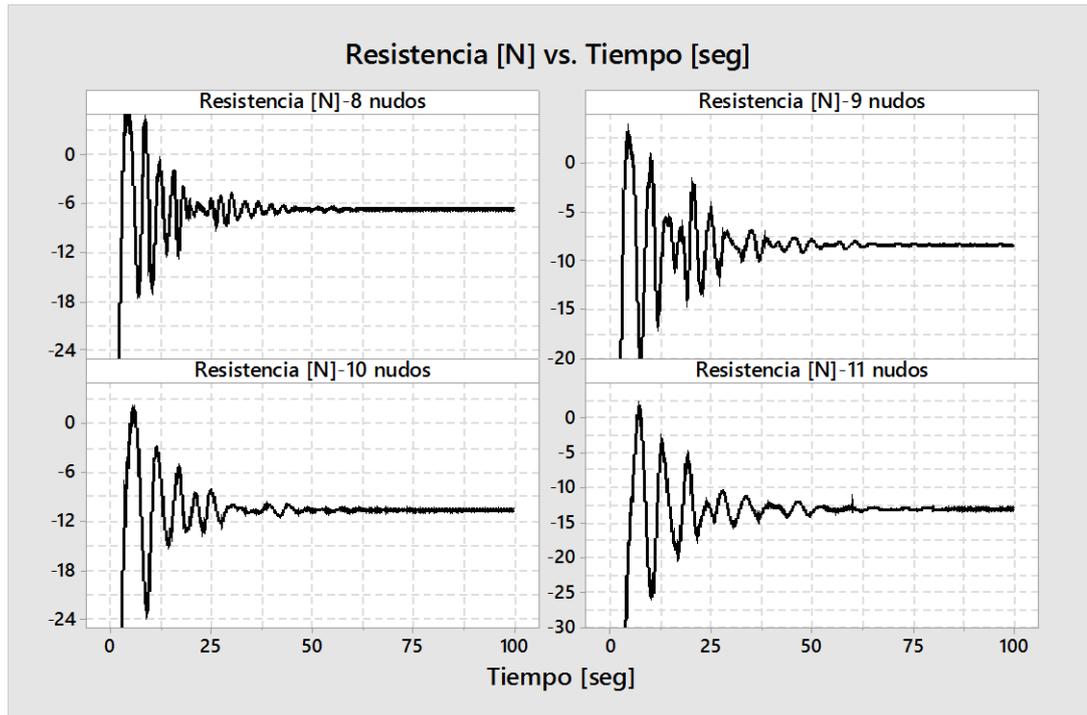


Figura No. 3.17 Resistencia del casco desnudo para el modelo con bulbo (a).

[Fuente: Software Minitab 17.]

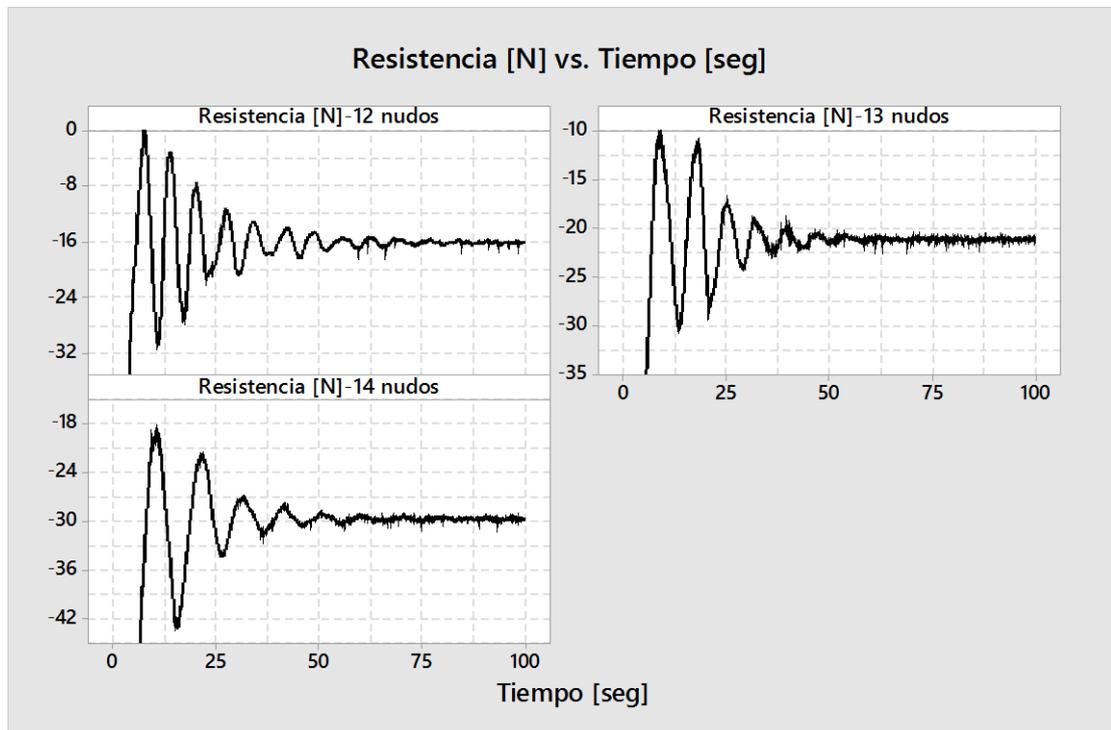


Figura No. 3.18 Resistencia del casco desnudo para el modelo con bulbo (b).

[Fuente: Software Minitab 17.]

En la Tabla No. 62 se muestra la Resistencia al avance que se ha obtenido para cada una de estas velocidades.

Velocidad [m/s]	Resistencia de la mitad del casco [N]	Resistencia Total [N]
1.016	6.663	13.327
1.143	8.381	16.764
1.270	10.591	21.182
1.397	13.055	26.110
1.524	16.132	32.264
1.651	21.191	42.382
1.778	29.693	59.386

Tabla No. 62 Comparación de resultados de Resistencia de CFD con bulbo.

[Fuente: Elaboración propia]

Como se puede observar la diferencia de los valores obtenidos entre el software Maxsurf y OpenFOAM son del 1.7 y 9.7%, dándose la mayor diferencia cuando la magnitud de la velocidad es de 1.778 m/s.

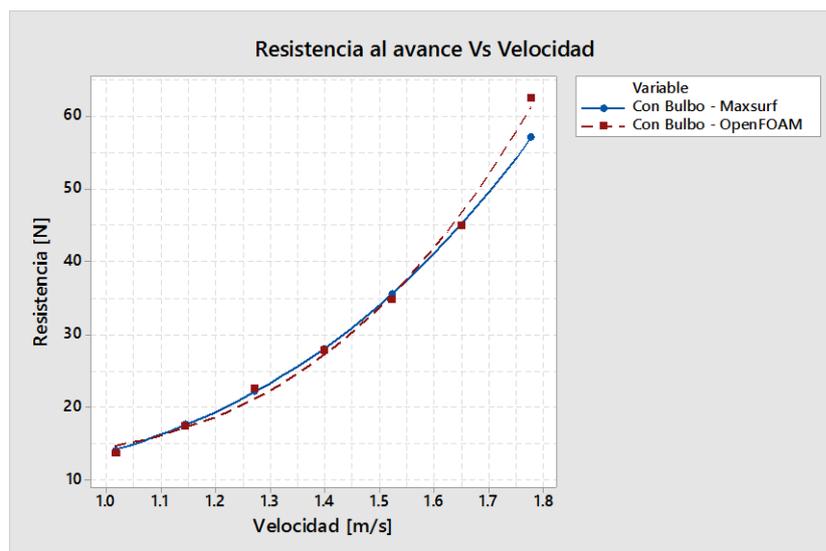


Figura No. 3.19 Comparación de la resistencia al avance para el modelo con bulbo

[Fuente: Software Minitab 17.]

3.9.4. Análisis de resultados de la simulación con el modelo.

En la presente sección se presenta los resultados obtenidos para la presión, altura de ola y el perfil de ola en el casco de ambos modelos.

Presión_rgh.

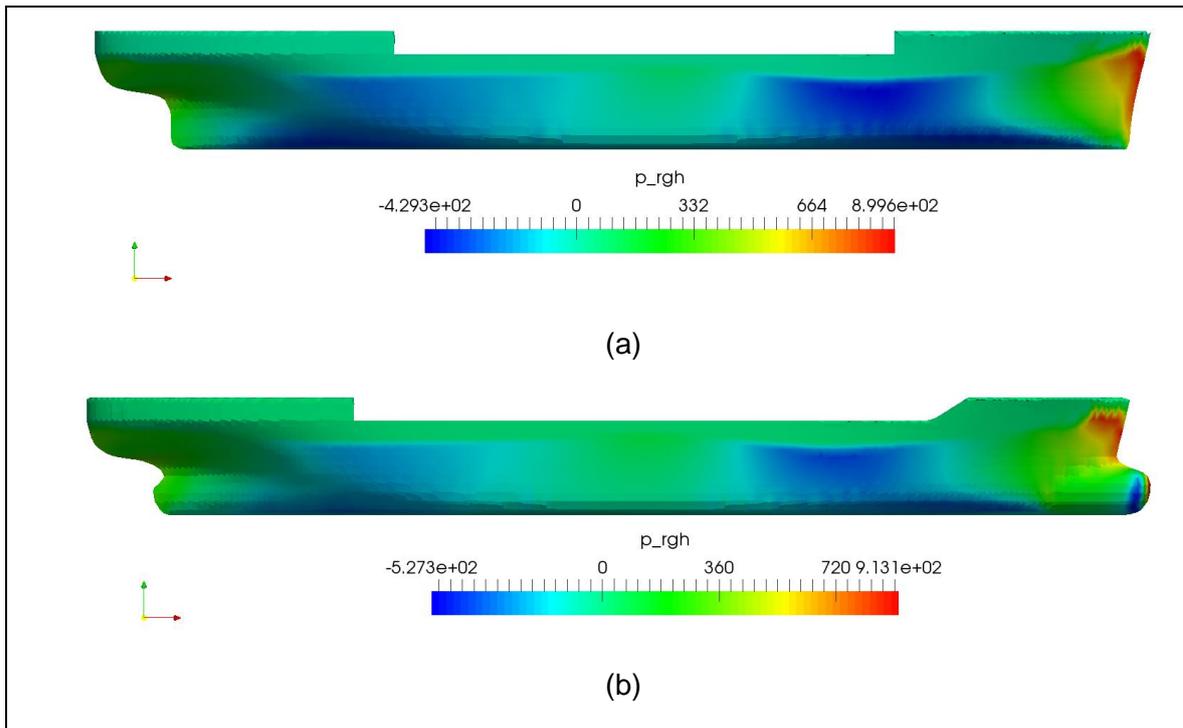


Figura No. 3.20 Presión dinámica alrededor del casco.

[Fuente: Elaboración propia.]

En la Figura No. 3.20, se aprecian los valores máximos y mínimos que se han obtenido para la presión dinámica en OpenFoam. Por lo tanto, se puede observar que para el modelo con bulbo se ha logrado disminuir la presencia de esta presión en el casco. Llevando la máxima presencia de presión dinámica en la máxima protuberancia del bulbo como se ve en la Figura No. 3.20 (b).

Perfil y patrón de Ola

Para poder apreciar el perfil de Ola que se ha generado a lo largo del casco para los dos modelos a continuación se presenta la siguiente figura.

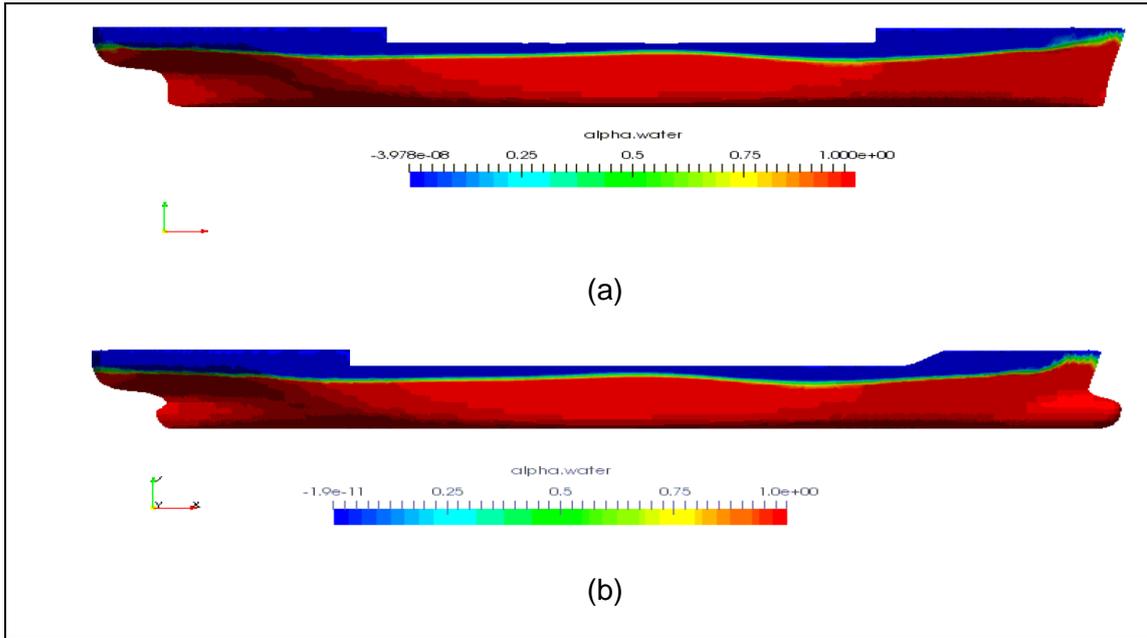


Figura No. 3.21 Perfil de Ola alrededor del casco.

[Fuente: Software OpenFoam.]

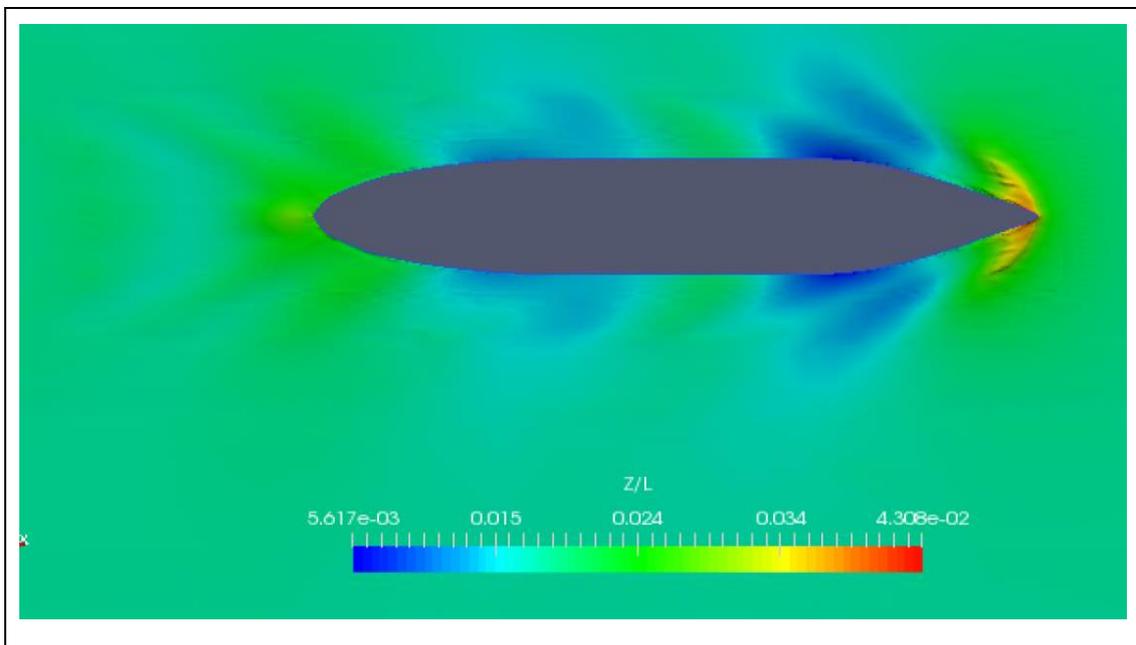


Figura No. 3.22 Patrón de ola– sin bulbo (1.524 m/s).

[Fuente: Software OpenFoam.]

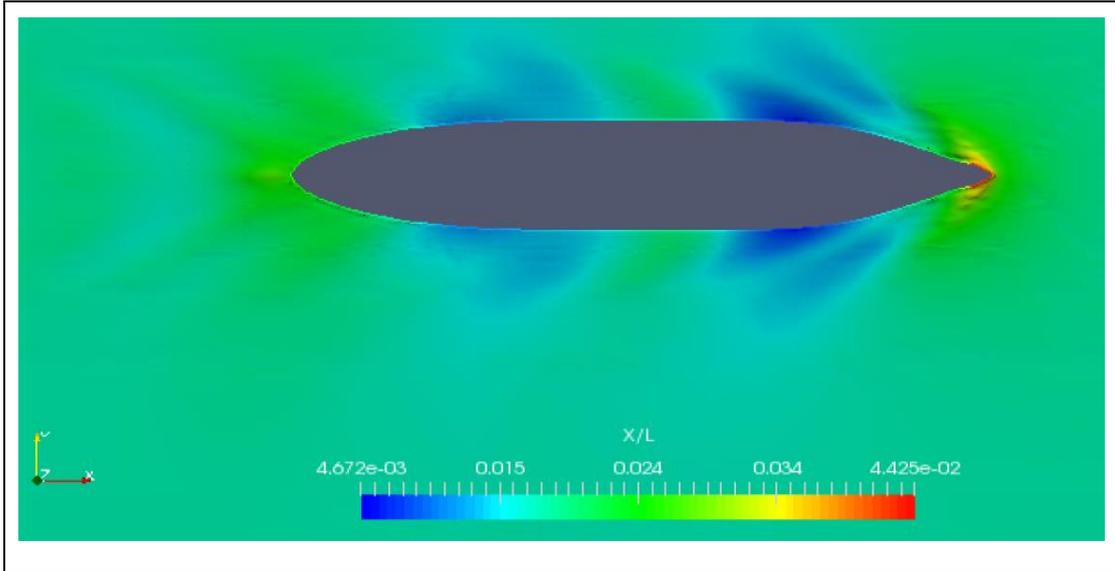


Figura No. 3.23 Patrón de ola - Modelo con bulbo (1.524 m/s).

[Fuente: Software OpenFoam.]

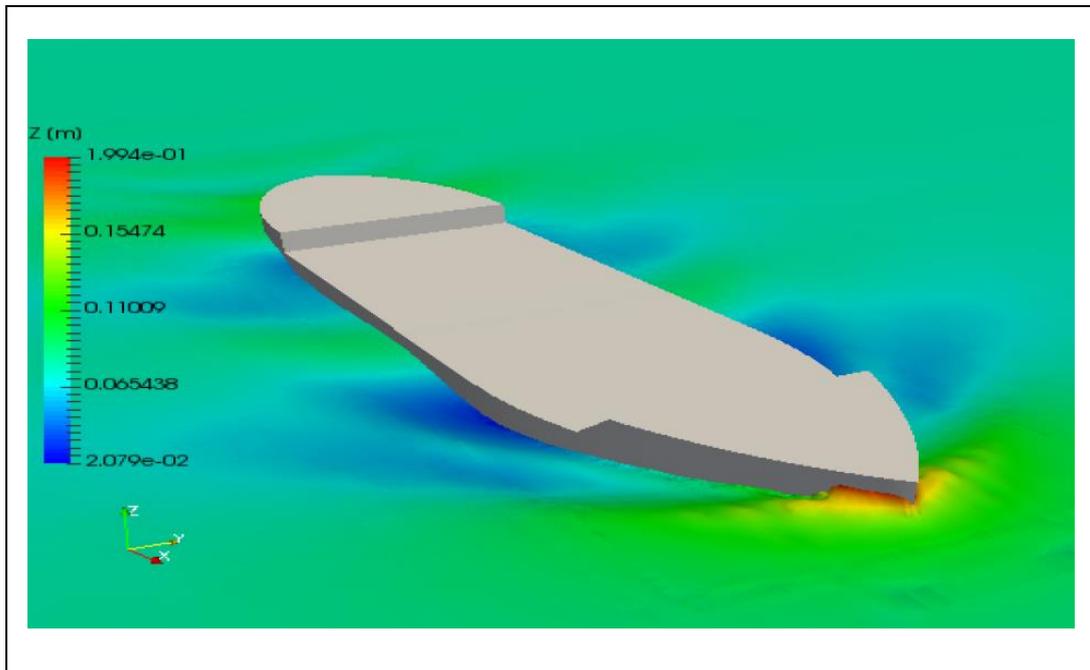


Figura No. 3.24 Altura de ola - Modelo con bulbo (1.524 m/s).

[Fuente: Software OpenFoam.]

En el ANEXO K, se presenta el patrón de olas generado en Maxsurf para ambos modelos. A continuación, se presenta el resumen de los resultados obtenidos en las simulaciones para ambos modelos, véase en la Tabla No. 63.

Velocidad [m/s]	Resistencia [N]	
Modelo	Sin Bulbo	Con Bulbo
1.016	13.764	13.327
1.143	17.568	16.764
1.270	22.567	21.182
1.397	27.828	26.110
1.524	34.870	32.264
1.651	44.975	42.382
1.778	62.575	59.386

Tabla No. 63. Comparación de resultados de Resistencia de CFD.

[Fuente: Elaboración propia]

En la Figura No. 3.25 se aprecia que para velocidades entre 1.3 y 1.7 m/s existe una disminución en la resistencia al avance del modelo. Siendo este el caso de análisis, ya que la velocidad de diseño de la embarcación es de 12.33 nudos, que para el modelo serían 1.566 m/seg. Por lo tanto, se ha decidido seleccionar las formas que poseen bulbo de proa y popa para el cálculo final de la resistencia total.

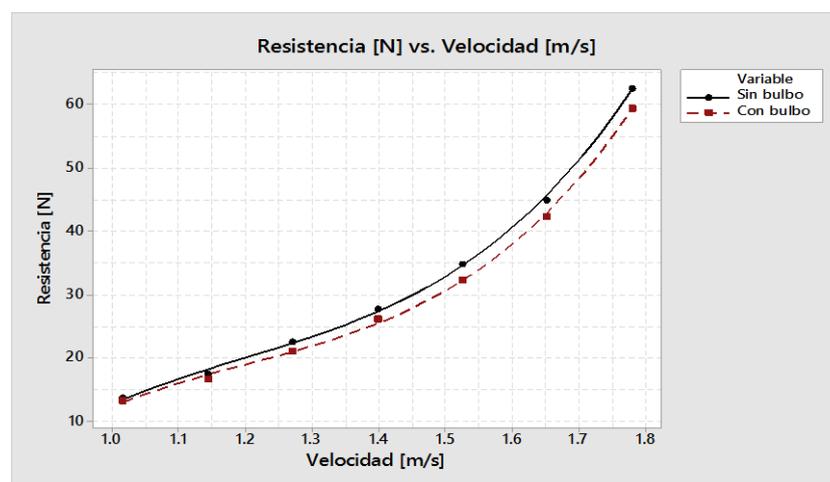


Figura No. 3.25 Resistencia al avance para ambos modelos.

[Fuente: Software Minitab 17.]

Para pasar del cálculo de resistencia al avance del modelo al de escala real, se ha procedido según las recomendaciones presentadas por [25]. Estas formulaciones se las presenta en el ANEXO J. Los resultados obtenidos para el coeficiente residual del modelo y el de la embarcación se presentan a continuación.

Lwl_M [m]	4.44
V_M [m/s]	1.56
Sm_M [m²]	5.24
P	1025
C_{TM}	0.0054
Re_m	6324525.98
(1+k)	1.27
C_{FM}	0.0033
C_R	0.0012

Tabla No. 64. Calculo del Coeficiente de resistencia residual.

[Fuente: Elaboración propia]

A seguir se presenta los resultados obtenidos para la resistencia al avance de la embarcación.

Lwl [m]	72.81
Crs	0.001
dCfs	0.001
Res	419848112.6
Cfs	0.002
Cts	0.004
Sm [m²]	1399.28
Vs [m/s]	6.34
At [m²]	131.47
(1+k) buque	1.28
Caa	0.0001
Rt [N]	120811.99

Tabla No. 65. Calculo de la Resistencia al avance de la embarcación.

[Fuente: Elaboración propia]

Finalmente, se tiene como resistencia al avance de la embarcación el valor de:

$$R_t \text{ [kN]} = 120.81$$

Para obtener la resistencia total se le ha adicionado a este valor la resistencia generada por los apéndices (Timón, eje y orza). Por lo tanto, el área de cada uno de estos apéndices será:

Área proyectada del Timón	7.269	m ²
Área proyectada de la Orza	2.209	m ²
Área proyectada del eje	0.128	m ²

Para el cálculo de la resistencia por apéndices se ha utilizado la formulación presentada por Holtrop, obteniendo lo siguiente:

$$R_{app} \text{ [kN]} = 1.11$$

Por ende, la resistencia total para la embarcación presentada en la Figura No. 3.26 será:

$$R_t \text{ [kN]} = 121.92$$

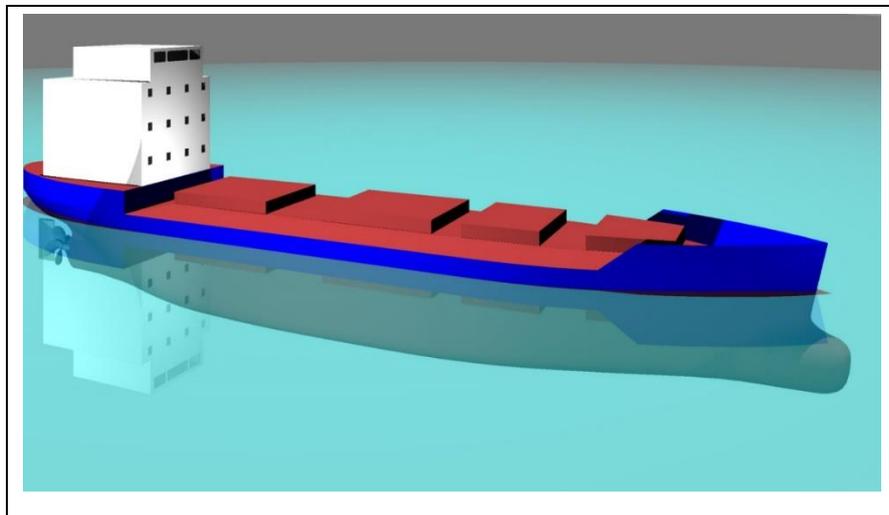


Figura No. 3.26 Modelado 3D del diseño definitivo.

[Fuente: Rhinoceros 5.0.]

En el ANEXO L, se presentan los planos de líneas de forma de esta embarcación, así como también el plano de distribución y línea de eje.

3.10. Simulación numérica de la maniobrabilidad usando un modelo no lineal basado en la geometría y propiedades de masa del buque.

3.10.1. Objetivo

Implementar un código en Matlab utilizando un modelo no lineal que ayude a estimar el círculo de evolución del buque granelero.

3.10.2. Introducción

Para evaluar las características de maniobrabilidad en esta etapa del diseño se ha utilizado un modelo no lineal basado en las propiedades de masa y geometría de la embarcación. Este ha sido desarrollado usando métodos numéricos e implementados en Matlab.

Para validar este modelo, se ha utilizado la metodología de [14], cuyo rango de aplicación se lo mostrará más adelante. Para calificar estas características de maniobrabilidad y determinar si la embarcación tiene estabilidad de ruta se ha hecho uso de las recomendaciones y formulaciones presentadas por ABS.

3.10.3. Embarcación

Las principales características de la embarcación que han sido utilizados en este modelo no lineal se presentan a continuación.

Eslora total	73.82	m
Eslora entre perpendiculares	71.01	m
Manga	13.20	m
Calado de diseño	5.58	m
C_B	0.69	-
Ab	5.89	m ²

Tabla No. 66 Principales características para la prueba de

[Fuente: Elaboración Propia]

3.10.4. Modelo Matemático

El modelo dinámico que se ha utilizado ha sido presentado por [1] y reescrito como se ve a continuación:

$$\begin{aligned}
 X' &= (m' + m'_x) \left(\frac{L}{U} \right) \left(\frac{\dot{U} \cos \beta}{U} - \dot{\beta} \sin \beta \right) + (m' + m'_y) r' \sin \beta \\
 Y' &= -(m' + m'_y) \left(\frac{L}{U} \right) \left(\frac{\dot{U} \sin \beta}{U} + \dot{\beta} \cos \beta \right) + (m' + m'_x) r' \cos \beta \quad (3.15) \\
 N' &= -(I'_{zz} + i'_{zz}) \left(\frac{L}{U} \right)^2 (\dot{U} r' + U \dot{r}')
 \end{aligned}$$

Todos estos términos son adimensionales con la geometría y características de la embarcación como se ve en el ANEXO M.

Se asume que X' , Y' y N' se dividen de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 X' &= X'_H + X'_P + X'_R \\
 Y' &= Y'_H + Y'_P + Y'_R \\
 N' &= N'_H + N'_P + N'_R
 \end{aligned} \quad (3.16)$$

Donde los subíndices H, P y R representan la contribución debida al casco, el propulsor y el timón respectivamente. En la presente se ha asumido durante la mayoría de la maniobra que la velocidad se mantiene constante. También, se ha asumido que en la desviación del timón no surgirán aceleraciones significantes que tomen lugar. Por lo tanto se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 Y' &= Y'_H + Y'_R \\
 N' &= N'_H + N'_R
 \end{aligned} \quad (3.17)$$

Para los componentes de la fuerza del timón se ha utilizado las formulaciones presentadas en el ANEXO M.

La fuerza lateral (Y_H) y el momento de guiñada (N_H) actuando sobre el casco del buque se han expresado de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} Y'_H &= Y_\beta \beta + Y_r r + Y_{\beta\beta} \beta |\beta| + Y_{rr} r |r| + (Y_{\beta\beta r} \beta + Y_{\beta r r} r) \beta r \\ N'_H &= N_\beta \beta + N_r r + N_{\beta\beta} \beta |\beta| + N_{rr} r |r| + (N_{\beta\beta r} \beta + N_{\beta r r} r) \beta r \end{aligned} \quad (3.18)$$

Donde sus coeficientes hidrodinámicos de fuerza y momento se presentan en el ANEXO M.

Para las ecuaciones de Y y N según la referencia de [26], se la presenta de forma lineal para obtener:

$$\begin{aligned} (m - Y_v) \dot{v} - (Y_{\dot{r}} - m x_G) \dot{r} &= Y_v v + (Y_r - m U) r + Y_\delta \delta \\ (I_{zz} - N_{\dot{r}}) \dot{r} - (N_v - m x_G) \dot{v} &= N_v v + (N_r - m x_G U) r + N_\delta \delta \end{aligned} \quad (3.19)$$

Donde δ es la desviación del timón medido acorde a la Figura No. 3.27, donde negativo corresponde al ángulo del timón que ocasiona un giro del buque hacia la derecha.

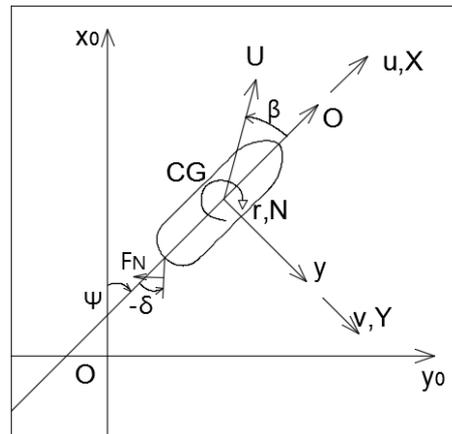


Figura No. 3.27 Esquema del sistema de referencia del modelo no lineal.

[Fuente: Software Matlab.]

Estas ecuaciones de movimiento se han manipulado para producir un par de ecuaciones de segundo orden desacopladas en r y v como se ve a continuación. Las cuales son conocidas como las ecuaciones de Nomoto.

$$\begin{aligned} T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r &= K\delta + K T_3 \dot{\delta} \\ T_1 T_2 \ddot{v} + (T_1 + T_2) \dot{v} + v &= K_v \delta + K_v T_4 \dot{\delta} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Para este proyecto la segunda ecuación no ha sido considerada. En el ANEXO M se presenta las formulaciones que se han utilizado para los índices K y T que relacionan estos índices con los coeficientes hidrodinámicos. Existe una relación entre la velocidad de giro y el ángulo del timón a través de una función de transferencia de segundo orden. La cual es dada por Nomoto como sigue:

$$\frac{r}{\delta} = \frac{K + T_3 s}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2) s + 1} \quad (3.21)$$

Esta puede ser simplificada por una función de transferencia de primer orden como sigue:

$$\frac{r}{\delta} = \frac{K}{T s + 1} \quad (3.21)$$

Esta ecuación es conocida como la ecuación de primer orden de Nomoto.

$$T \dot{r} + r = K \delta \quad (3.22)$$

Donde:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 \quad (3.23)$$

Y su solución en términos de K y T es dado por:

$$r = K\delta \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \quad (3.24)$$

3.10.5. Validación del modelo

Para corroborar los resultados obtenidos de la estimación del círculo de giro usando el método no lineal se hizo uso nuevamente de las formulaciones presentadas por [14]. En la Tabla No. 67 se observa el rango de aplicación de este método y los valores que se han obtenido del buque.

Parámetros	Mínimo	Máximo	Buque
L, m	55	350	73.82
Cb	0.56	0.88	0.68
$\delta_R(^{\circ})$	10	45	30
L/B	5.56	9.1	5.59
Trim/L	0	0.05	0
$Sp \cdot Ch / (L \cdot T)$	0.01	0.04	$3.35 \cdot 2.17 / (73.82 \cdot 5.58) = 0.017$
$A_B / (L \cdot T)$	-0.11	+0.04	$5.89 / (73.82 \cdot 5.58) = 0.014$
$\frac{V}{\sqrt{L}}$ (nudos $- m^{-0.5}$)	0.20	1.0	$12.33 / (73.82^{0.5}) = 1.43$
T_L / T	0.5	1.0	1

Tabla No. 67 Rango de aplicación de las formulaciones de Lyster.

[Fuente: Elaboración Propia]

Donde:

Sp	Altura del timón.	m
Ch	Cuerda principal del timón.	m
A_B	Área Lateral del timón (+ delante de la Per. de proa)	m^2
V	Velocidad al que se va a realizar la prueba de maniobrabilidad.	nudos

T_L Calado al que se va a realizar la prueba de maniobrabilidad.

m

Como se puede observar en la Tabla No. 67 para la velocidad de diseño de 12.33 nudos, este método no se podría utilizar. Por lo tanto se ha decidido hacer la prueba de giro a una velocidad de 8.5 nudos (4.372 m/s) con el fin de poder corroborar los resultados obtenidos, teniendo lo siguiente:

Círculo de evolución del buque			
DG [m]	213.43 (3.00*Lpp)	Resultado	Evaluación
DT [m]	250.77	3.53*Lpp	DT < 5*Lpp
Estado		Si cumple	
TR [m]	120.02 (1.69*Lpp)	Resultado	Evaluación
AV [m]	224.59	3.16*Lpp	DA < 4.5*Lpp
Estado		Si cumple	

Tabla No. 68 Resultados del círculo de evolución - Lyster.
[Fuente: Elaboración Propia]

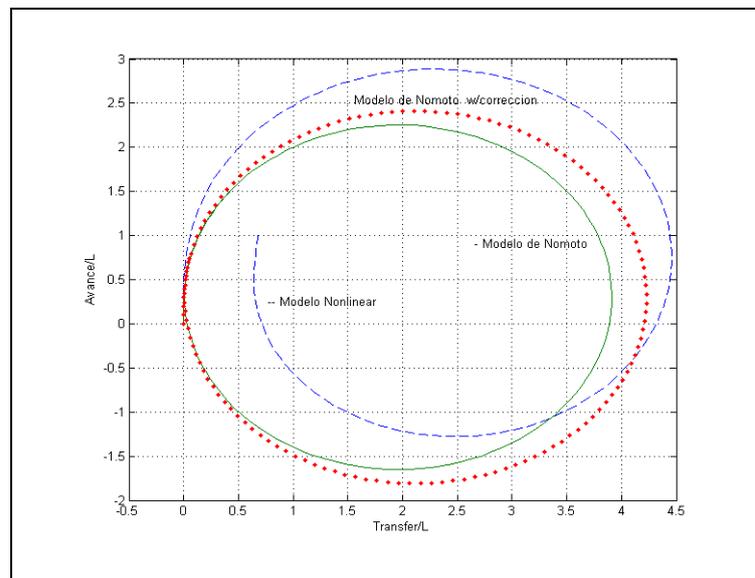


Figura No. 3.28 Resultados del círculo de evolución 35 ° – Método no lineal.

[Fuente: Software Matlab.]

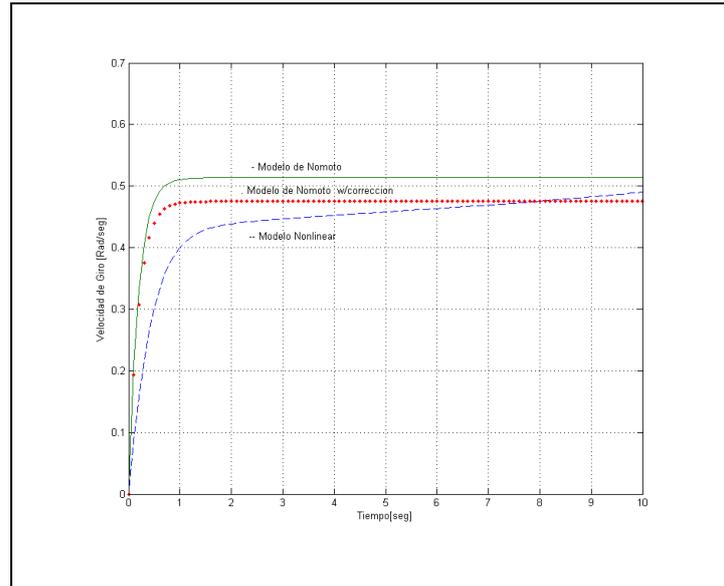


Figura No. 3.29 Resultados de la velocidad de giro 35 °– Método no lineal.

[Fuente: Software Matlab.]

Para el método no lineal se observa en la Figura No. 3.28, que el Diámetro táctico y el Avance de la embarcación son aproximadamente de $4.4 \cdot L_{pp}$ y $2.8 \cdot L_{pp}$ para un ángulo del timón de 35°. Esto corrobora que si cumple con lo recomendado por ABS e IMO como se ha estimado en la Tabla No. 68.

Para el método lineal y su respectiva corrección se observa en la Figura No. 3.28, que el Diámetro táctico y el Avance también están dentro del rango de aceptación sin embargo ya que el modelo no lineal involucra más características de la embarcación que el modelo lineal y se considera este modelo más exacto al predecir la maniobrabilidad de la embarcación. Por lo que estos se los ha graficado para simple comparación de los mismos con el método no lineal.

Para observar cómo sería el comportamiento del buque aplicando el modelo no lineal para un ángulo de timón de 15 grados se presenta la Figura No. 3.30 y la Figura No. 3.31. Por tanto, se observa que este método al disminuir el ángulo del timón se aproxima al modelo lineal por corrección de deslizamiento lateral, pero al aumentar el ángulo esta diferencia se incrementa considerablemente.

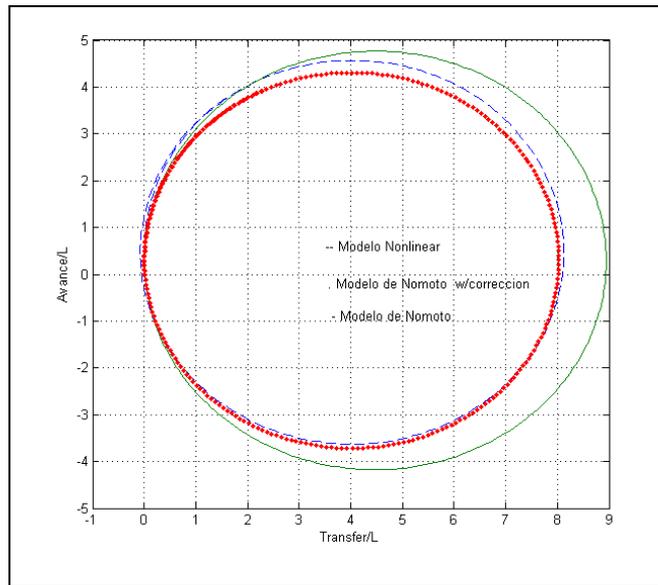


Figura No. 3.30 Resultados del círculo de evolución 15 °– Método no lineal.

[Fuente: Software Matlab.]

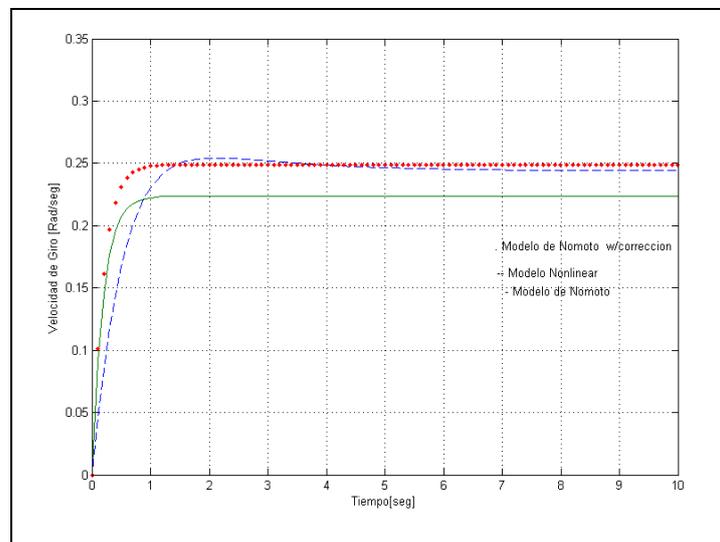


Figura No. 3.31 Resultados de la velocidad de giro 15 °– Método no lineal

[Fuente: Software Matlab.]

3.10.6. Resultados de evaluar las características de maniobrabilidad.

Resultados Regresionales

A seguir se muestran los resultados que se han obtenido a partir de las formulaciones de Lyster presentadas anteriormente y de las formulaciones de ABS para evaluar la prueba de zig-zag a 10 y 20 grados. Véase Tabla No. 69.

Descripción		Requerimiento	Estado
DG [m]	213.43		
DT [m]	250.77 Rtd = 3	< 5*Lpp; IMO Rtd>1; ABS	AP AP
AV [m]	224.59	< 4.5*Lpp; IMO y ABS	AP
TR [m]	120.02		
Zig-zag 10/10	Rtd=3	IMO y ABS	AP
Zig-zag 20/20	Rtd=3	IMO y ABS	AP
Habilidad de detenerse	9.17 Lpp Rtd=3	< 15 Lpp; IMO	AP

Tabla No. 69 Características de maniobrabilidad – Resultados Regresionales.

[Fuente: Elaboración propia]

Resultados aplicando el modelo no lineal y lineal corregido.

A seguir se muestran los resultados que se han obtenido a partir del modelo no lineal.

Círculo de evolución del buque			
DG [m]	269.83 (3.8*Lpp)	Resultado	Evaluación
DT [m]	312.44	4.4*Lpp	DT < 5*Lpp
Estado		Si cumple	
TR [m]	124.26 (1.75*Lpp)	Resultado	Evaluación
AV [m]	198.82	2.8*Lpp	DA < 4.5*Lpp
Estado		Si cumple	

Tabla No. 70. Características de maniobrabilidad – Modelo no lineal.

[Fuente: Elaboración propia]

A seguir se muestran los resultados que se han obtenido a partir del modelo lineal por corrección de deslizamiento lateral.

Circulo de evolución del buque			
DG [m]	298.24 (4.2*Lpp)	Resultado	Evaluación
DT [m]	298.24	4.2*Lpp	DT < 5*Lpp
Estado		Si cumple	
TR [m]	120.71 (1.7*Lpp)	Resultado	Evaluación
AV [m]	170.42	2.4*Lpp	DA < 4.5*Lpp
Estado		Si cumple	

Tabla No. 71. Características de maniobrabilidad – Modelo lineal corregido.

[Fuente: Elaboración propia]

Para mostrar los resultados obtenidos del círculo de evolución aplicando los cuatro métodos de análisis se muestra la siguiente tabla:

	Lyster - Regresional	Modelo Lineal	Modelo no Lineal	Modelo Lineal Corregido
DG [m]	213.43	269.83	269.83	298.24
DT [m]	250.77	269.83	312.44	298.24
TR [m]	120.02	120.71	124.26	120.71
AV [m]	224.59	159.77	198.82	170.42

Tabla No. 72. Características de maniobrabilidad – Modelo lineal corregido.

[Fuente: Elaboración propia]

3.11. Optimización estructural del compartimento de sala de máquina mediante la aplicación de Elementos Finitos.

La estructura de este compartimento de sala de máquinas ha sido analizada aplicando el método de elementos finitos. Este sector está sometido a diversas cargas y vibraciones que pueden ocasionar fallas estructurales. En la siguiente figura se muestra la ubicación del compartimento de análisis.

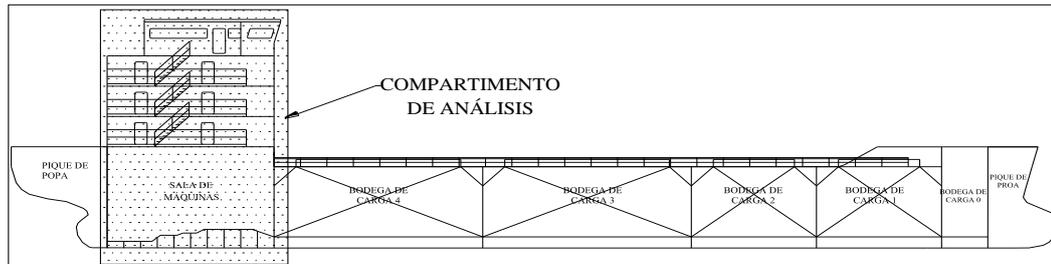


Figura No. 3.32 Compartimento de análisis estructural – Vista de perfil.

[Fuente: Elaboración propia]

Este compartimento tiene una longitud de 12 metros, la altura de la sala de máquinas es de 8,3 metros y la altura de la caseta 1, 2, 3 y puente de mando es de 2,6 metros, como se ve en la Figura No. 3.33.

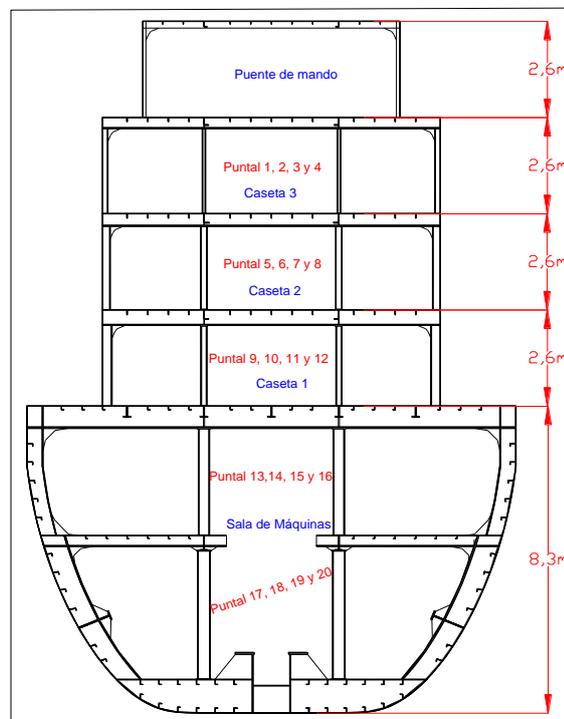


Figura No. 3.33 Compartimento de análisis estructural – Vista Transversal.

[Fuente: Elaboración propia.]

3.11.1. Escantillón del compartimento

Optimizada la embarcación se obtienen los perfiles correspondientes a cada compartimento tal como se mostró en el capítulo anterior, el escantillón de superestructura fue determinado usando el software Poseidón.

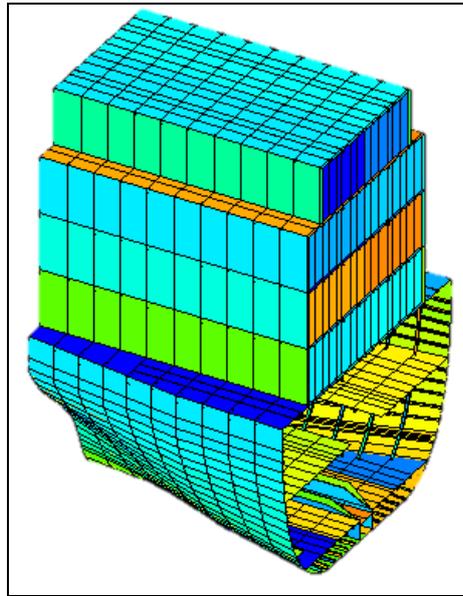


Figura No. 3.34 Escantillón usando el software Poseidón.

[Fuente: Software POSEIDON]

➤ Superestructura

Esta sección del compartimento consta de cuatro casetas, cuyo escantillón es detallado a continuación.

	Ref. Longitudinales (mm)	Ref. Transversales (mm)	Vigas Transversales (mm)	Panel (mm)
Puente de mando				
Costado		L 100*40*6	L120*40*8	7
Cubierta	PL 100*8	L 120*65*8	L 160*75*10	7
Caseta 3				
Costado		L 110*50*10	160*70*12	7
Cubierta	PL 100*8	200*100*18	310*150*24	9
Caseta 2				
Costado		150*65*10	230*100*14	8
Cubierta	PL 100*8	200*110*18	350*140*20	9
Caseta 1				
Costado		180*65*12	250*100*18	8
Cubierta	PL 100*8	220*130*20	400*150*20	9

Tabla No. 73. Perfiles de superestructura – POSEIDON

[Fuente: Elaboración propia]

➤ **Puntales y base del motor**

La colocación de puntales dentro de una embarcación es indispensable, especialmente en sitios donde se lleve una excesiva carga sobre cubierta o la longitud no soportada sea excesiva. La base de máquinas debe ser diseñada de tal manera que soporte la carga generada por el motor.

Teniendo en consideración estos detalles se ha calculado el escantillón de los elementos estructurales ya mencionados.

- Puntales

Cada cubierta transmite una carga al puntal; con esta premisa se ha utilizado la formulación recomendada por la Sociedad de Clasificación ABS, [27], la cual permite calcular la carga admisible del puntal. Para el diseño se han usado las dimensiones de puntales existentes en el mercado.

$$W_a = \left(k - n \frac{l}{r} \right) A \text{ [KN]} \quad (3.25)$$

Donde:

$k = 12.09$

$n = 0.0444$

$r =$ radio de giro, cm

$A =$ área de la sección del puntal, cm^2

$l =$ longitud no soportada del puntal, cm

De acuerdo a recomendaciones que da el libro de Martin Domínguez, [28], L se considera de acuerdo a la siguiente figura:

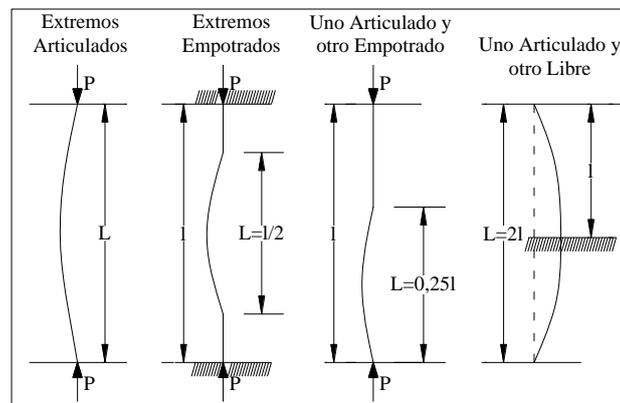


Figura No. 3.35 Longitud no soportada dada su configuración.

[Fuente: [28]]

Para el diseño de los puntales se ha considerado los extremos como simplemente soportados, Por lo que $L=l$.

La siguiente tabla muestra los resultados de los puntales seleccionados:

Puntal	D. nominal	D. exterior [mm]	Cedula	Espesor [mm]	Carga admisible [KN]	Carga transmitida (KN)
1 y 2	3	88.9	80	7.62	160.41	141.92
3 y 4	3	88.9	80	7.62	160.41	141.92
5 y 6	6	168.3	40	7.11	365.23	304.386
7 y 8	6	168.3	40	7.11	365.23	304.386
9 y 10	6	168.3	80	10.97	545.83	524.38
11 y 12	6	168.3	80	10.97	545.83	524.38
13 y 14	12	323.8	40	10.31	1095.48	1095.21
15 y 16	12	323.8	40	10.31	1095.48	963.82
17 y 18	14	355.6	80	11.13	1294.26	1312.41
19 y 20	14	355.6	80	11.13	1294.26	1101.82

Tabla No. 74. Dimensión de puntales seleccionados

[Fuente: Elaboración propia.]

- Base del motor

El diseño de la base del motor es de importancia para la estructura del compartimento. La Sociedad de Clasificación Lloyd's Register, [12], presenta las siguientes formulaciones para su dimensionamiento.

$A=120+44,2f+4,07f^2$	$t_3=10+1,5f$	(3.26)
$t=25+3,4f$	$f=\frac{P}{RI}$	
$t_1=15+4,08f$		

Tabla No. 75. Formulación para el cálculo de la base de maquinas

[Fuente: Elaboración propia.]

Donde:

A= área transversal de la base del motor

t_1 = espesor de la carlinga

t_3 =espesor de la varenga (sala de máquinas)

t = espesor de la base del motor

P = 3080 HP, potencia del motor

R = 900 RPM, revoluciones del motor

L = 2.85 m, longitud entre pernos del motor

Obteniéndose los siguientes resultados:

$A=167\text{cm}^2$	$t_3=12\text{ mm}$
$t=29\text{ mm}$	$t_1=20\text{ mm}$

Tabla No. 76. Resultados de base de maquinas

[Fuente: Elaboración propia.]

3.11.2. Modelado del Compartimento

El compartimento ha sido modelado usando el software SolidWorks, a partir de los perfiles estructurales escantillonados. Esta herramienta se ha utilizado debido a la compatibilidad con el software Ansys. El compartimento fue modelo en el software SolidWorks como sólido. La Figura No. 3.36 muestra un esquema del compartimento realizado.

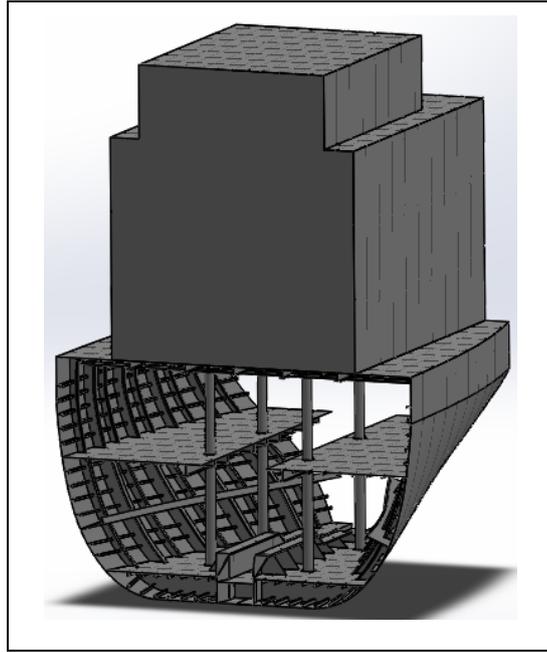


Figura No. 3.36 Modelo del compartimento de sala de máquinas realizado en SolidWorks.

[Fuente: Software SolidWorks]

3.11.3. Restricciones de deflexión y esfuerzo por la Sociedad de Clasificación.

Lloyd's Register, [12], nos presenta una tabla de límites permisibles tanto de esfuerzos como para las deformaciones de paneles, refuerzos primarios y secundarios según la sección de análisis. A continuación, se muestran estas restricciones dadas por la Sociedad de Clasificación.

Descripción		Radio de deflexión
Fondo	Refuerzo secundario	800
	Viga	1000
costado	Refuerzo secundario	800
	Viga	1000
Cubierta	Refuerzo secundario	1000
	Viga	1250
Superestructura	Refuerzo secundario	600
	Viga	750

Tabla No. 77. Deformación permisible

[Fuente: [12]]

Descripción		Esfuerzo Permisible [KN/m ²]
Fondo	Ref. secundario	1,53E+05
	Vagras y bulárcamas	1,53E+05
	carlingas	1,29E+05
Costado	Ref. secundario	1,53E+05
	Bulárcamas y palmejares	1,53E+05
Cubierta	Panel	1,76E+05
	Ref. secundario	1,53E+05
	Esloras y Bulárcamas	1,53E+05
Superestructura	frente de primera caseta	1,41E+05
	Frente del resto de casetas	1,53E+05
	Costado y fondo	1,76E+05
	Cubierta de ultimo nivel	1,76E+05
	Resto de cubiertas	1,41E+05

Tabla No. 78. Esfuerzo permisible

[Fuente: [12].]

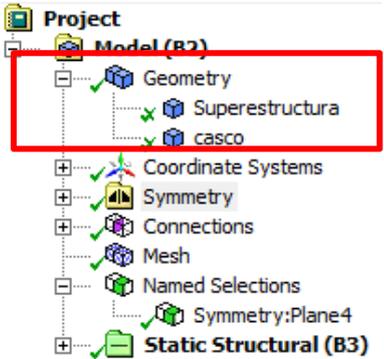
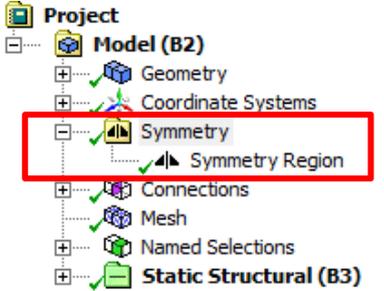
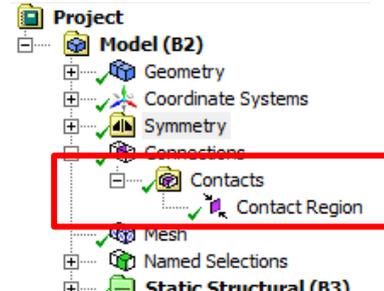
Donde el radio de deflexión se define como la relación entre la longitud no soportada y la deflexión del elemento de análisis.

3.11.4. Aplicación del software de elementos finitos

El modelo del compartimento ha sido analizado aplicando el método de elementos finitos mediante el uso del software Ansys.

El modelo del compartimento consiste de un enmallado de 597,559 nodos. El tamaño de celda, de acuerdo a lo recomendado por la Sociedad de Clasificadora, debe de ser la distancia de separación entre refuerzos, siendo este valor de 50 cm.

La siguiente secuencia de imágenes pretende explicar las opciones utilizadas para la utilización software Ansys.

	<p>Inicialmente se deben generar (importar de SolidWorks) los componentes que forman el compartimento de análisis, siendo estos tal como se menciona en la imagen de la izquierda el caso y superestructura.</p>
	<p>Ansys permite realizar simetría al modelo generado (simulando virtualmente que la estructura este completa). Esto permite agilizar el enmallado y los cálculos.</p>
	<p>En este punto se ha verificado que exista el contacto entre las estructuras ingresadas.</p>

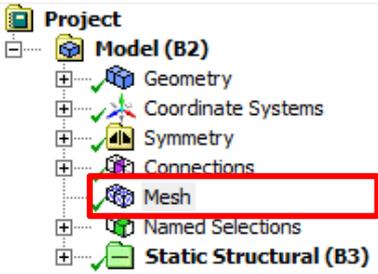
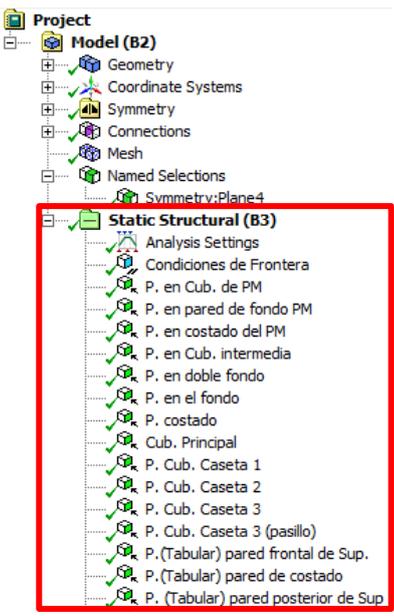
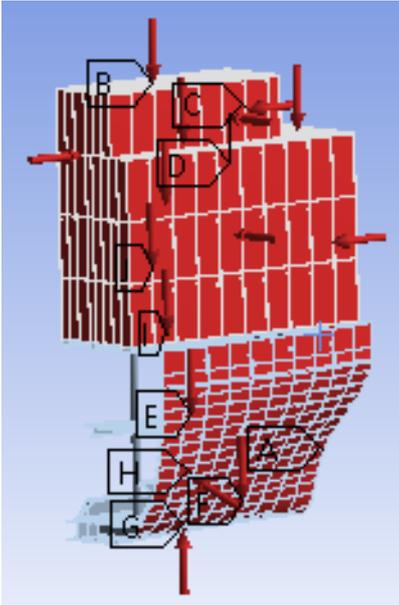
 <table border="1" data-bbox="316 593 694 896"> <thead> <tr> <th colspan="2">Defaults</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Physics Preference</td> <td>Mechanical</td> </tr> <tr> <td>Relevance</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Sizing</td> </tr> <tr> <td>Use Advanced Size Fun...</td> <td>Off</td> </tr> <tr> <td>Relevance Center</td> <td>Fine</td> </tr> <tr> <td>Element Size</td> <td>0,50 m</td> </tr> <tr> <td>Initial Size Seed</td> <td>Active Assembly</td> </tr> <tr> <td>Smoothing</td> <td>Medium</td> </tr> <tr> <td>Transition</td> <td>Fast</td> </tr> <tr> <td>Span Angle Center</td> <td>Coarse</td> </tr> <tr> <td>Minimum Edge Length</td> <td>8,0984e-007 m</td> </tr> </tbody> </table>	Defaults		Physics Preference	Mechanical	Relevance	100	Sizing		Use Advanced Size Fun...	Off	Relevance Center	Fine	Element Size	0,50 m	Initial Size Seed	Active Assembly	Smoothing	Medium	Transition	Fast	Span Angle Center	Coarse	Minimum Edge Length	8,0984e-007 m	<p>Esta opción permite generar el enmallado a toda la estructura.</p>
Defaults																									
Physics Preference	Mechanical																								
Relevance	100																								
Sizing																									
Use Advanced Size Fun...	Off																								
Relevance Center	Fine																								
Element Size	0,50 m																								
Initial Size Seed	Active Assembly																								
Smoothing	Medium																								
Transition	Fast																								
Span Angle Center	Coarse																								
Minimum Edge Length	8,0984e-007 m																								
																									
<p>En esta etapa se han ingresado las cargas a las que estará sometida la embarcación en sus diferentes sectores, incluyendo las condiciones de frontera ubicadas en los bordes de las caras de popa y proa de los mamparos de sala de máquinas.</p>																									

Tabla No. 79. Opciones utilizadas en el software Ansys

[Fuente: Ansys Workbench.]

- **Primer análisis**

Al modelo se le han aplicado cargas y restricciones. A continuación, se presentan los resultados de deformación y esfuerzos máximos en las diferentes zonas.

	Deformación máxima (mm)	Deformación permisible (mm) [12]
Fondo	0,5	3
Costado	5	3
Cubierta	3	2.4
Superestructura	5.4	4

Tabla No. 80. Comparación de deformaciones -1

[Fuente: Elaboración propia.]

- **Análisis final**

Dado que los resultados iniciales no han cumplido los límites establecidos por la Sociedad Clasificadora, el escantillón de los elementos ha sido cambiado. A seguir se presentan las dimensiones finales.

	Fondo	Costado	Cubierta	Cubierta Intermedia
Ref. Longitudinales(mm)	L 130*75*10	L 150*75*8	L 100*70*10	L 80*50*8
Ref. Transversales(mm)		L 380*200*26	L 270*130*18	L 210*100*18
Vigas Longitudinales(mm)		T 900*250*30	T 300*200*26	T 400*200*22
Vigas Transversales (mm)	PL 12	L 650*280*50	L 600*260*36	L 290*180*22
Ref. Trans. sobre cub. intermedia (mm)		L 290*150*18		
Vigas Trans. sobre cub. intermedia (mm)		L 420*180*20		
Panel (mm)	PL13	PL 10	PL 9	PL8

Tabla No. 81. Dimensión definitiva de los refuerzos del Casco

[Fuente: Elaboración propia.]

	Ref. Longitudinales (mm)	Ref. Transversales (mm)	Vigas Transversales (mm)	Panel (mm)
Caseta 1				
Costado		100*40*10	120*50*10	7
Cubierta	PL 100*8	130*65*12	180*75*12	7
Caseta 2				
Costado		130*80*12	175*90*16-	7
Cubierta	PL 100*8	220*100*22-	340*150*28-	9
Caseta 3				
Costado		150*75*12	250*100*16	8
Cubierta	PL 100*8	220*120*22	370*170*28	9
Puente de mando				
Costado		200*75*14	280*120*20	8
Cubierta	PL 100*8	250*150*22	430*190*22	9

Tabla No. 82. Dimensión definitiva de los refuerzos de Superestructura

[Fuente: Elaboración propia.]

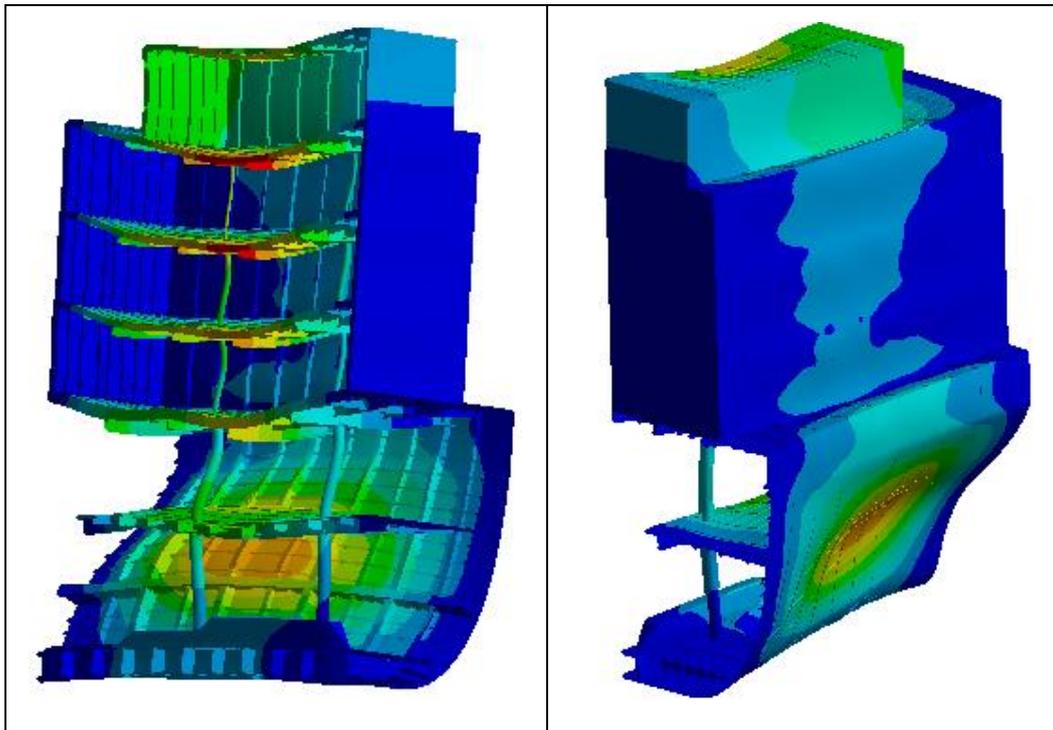


Figura No. 3.37 Deflexión final del compartimento analizado.

[Fuente: Ansys Workbench.]

Una vez analizado el compartimento se tiene como resultado las siguientes tablas.

	Deformación máxima (mm)	Deformación permisible (mm) [12]
Fondo	0,5	3
Costado	2,9	3
Cubierta	2,4	2.4
Superestructura	3,4	4

Tabla No. 83. Comparación de deformaciones finales

[Fuente: Elaboración propia.]

Descripción		Esfuerzo Máximo [KN/m2]	Esfuerzo Permisible [KN/m2] [12]
Fondo	Ref. secundario	2,60E+04	1,53E+05
	Vagras y bulárcamas		1,53E+05
	carlingas	1,30E+04	1,29E+05
Costado	Ref. secundario	4,80E+04	1,53E+05
	Bulárcamas y palmejares		1,53E+05
Cubierta	Panel	1,94E+04	1,76E+05
	Ref. secundario		1,53E+05
	Esloras y Bulárcamas		1,53E+05
Superestructura	frente de primera caseta	1,30E+04	1,41E+05
	Frente del resto de casetas	6,60E+04	1,53E+05
	Costado y fondo	2,20E+04	1,76E+05
	Cubierta de ultimo nivel	1,80E+04	1,76E+05
	Resto de cubiertas	9,60E+03	1,41E+05

Tabla No. 84. Comparación de esfuerzos

[Fuente: Elaboración propia.]

En ANEXO N se muestra el plano estructural de una bulárcama con las dimensiones finales.

Con el objetivo de evitar vibraciones del compartimento, se ha calculado la frecuencia natural de la estructura, procurando sea mayor a la frecuencia de las aspas.

- **Frecuencia de las aspas**

La siguiente formulación permite calcular la frecuencia de las aspas.

$$F_{\text{aspas}} = \frac{N_{\text{rev motot}} * Z}{R_{\text{reduccion}} * 60} [\text{HZ}] \quad (3.27)$$

$$F_{\text{aspas}} = 14.84 [\text{HZ}]$$

- **Frecuencia del compartimento**

La frecuencia del compartimento ha sido calculada usando el software ansys.

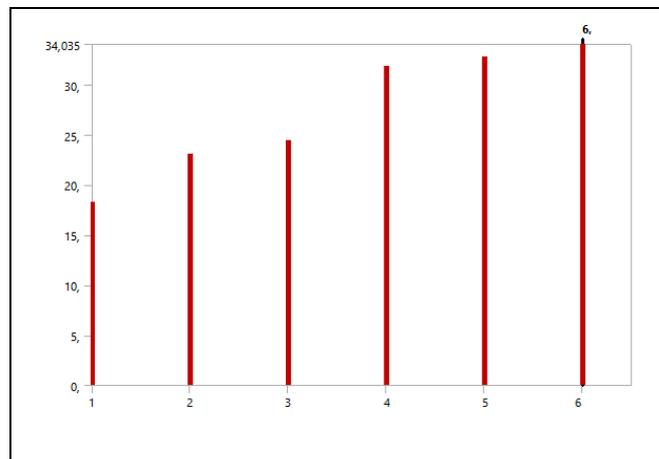


Figura No. 3.38 Modos de vibración vs Frecuencia.

[Fuente: Ansys Workbench.]

- **Comparación de frecuencias**

La siguiente tabla muestra una comparación entre las frecuencias calculadas.

Modo	Frecuencia Natural [Hz]	Frecuencia de las aspas [Hz]
1	18.28	14.84
2	23.05	
3	24.44	
4	32.81	

Tabla No. 85. Modos de Vibración (F. natural V F. aspas)

[Fuente: Elaboración propia.]

CAPITULO 4

4. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO

Para el buque se han estimado los costos de construcción y operación, a fin de determinar su viabilidad económica.

Para el financiamiento del buque se ha aplicado el modelo de fletamento a casco desnudo (Bare Boat Charter), esto indica que la gestión náutica se transfiere al arrendatario, quien lo arma y lo equipa, convirtiéndose en el “armador”. Este tipo de arrendamiento se realiza a largo plazo. Para este proyecto se ha establecido que el propietario del buque tenga a su cargo los costos de la inversión inicial, préstamo a la entidad financiera y ciertos gastos operacionales, en la siguiente tabla se muestran los rubros a dividirse entre las partes involucradas para el financiamiento.

Distribución de costos de las partes	
fletamento a casco desnudo	
Costos Capital	Fletante
Costos de operación	Fletador
Costos en el puerto	
Costos durante la navegación	

Tabla No. 86. Distribución de costos

[Fuente: Elaboración propia.]

4.1. Consideraciones para el análisis

Se debe tener en cuenta que los ingresos y egresos son estimaciones realizadas en base a precios referenciales y fórmulas empíricas. El precio de arrendamiento a determinar es tal que permita pagar el préstamo realizado y recuperar la inversión inicial.

4.2. Costo del proyecto

En los siguientes puntos se detallan y explican cada uno de los rubros tomados en cuenta para este ítem.

- **Costo de construcción estructural**

A partir del resultado de la optimización de la estructura se obtuvo que los hombres horas de estructura son 150097 HH, con este valor se procedió a obtener el costo de producción del casco, superestructura y a seleccionar el número de plantel productivo y administrativo necesario para el desarrollo del proyecto. Se considera que el plazo de obra es de 18 meses.

Especialidad	No. Td	No. Tn	Especialidad	No.
Maestros de obra	1	1	Presidente	1
Maestros	6	6	Vice-Presidente proyecto	1
Soldador	6	0	Gerente proyectos	1
Técnicos	0	6	Ing. de obra	2
Ayudantes	6	6	Bodeguero	1
Total, al mes- personal producción	19	19	Seguridad	2
			Secretarias	2
			Total, al mes- personal producción	10

Tabla No. 87. Plantel laboral

[Fuente: Elaboración propia.]

A continuación, se presenta en resumen los costos del grupo 100 durante la construcción, obtenidos mediante la programación en el software Matlab.

Ítem	Valor
Costo neto HH	\$ 20,32
Ítem	Valor
Material	\$ 976.195,71
Movilización	\$ 390.478,28
Misceláneos	\$ 146.429,36
Equipos grandes	\$ 86.400,00
Equipos medianos	\$ 57.600,00
Maquinaria - herramientas	\$ 5.184,00
Oxigeno	\$ 28.364,04
Soldadura	\$ 39.394,50
Fungibles	\$ 50.424,96
Mano de obra	\$ 3.050.234,87
Total, Grupo 100	\$ 4.830.705,72

Tabla No. 88. Costo total de construcción.

[Fuente: Elaboración propia]

- **Costos de Propulsión y Maniobrabilidad.**

El costo sistema de propulsión ha sido determinado usando la siguiente formulación presentada por Aalbers [año desconocido].

$$\$ N_{\text{prop}} 1086 * P_{\text{prop}}^{0.79} \quad (4.1)$$

Donde:

P = la potencia instalada en KW

Según la misma referencia, el costo del sistema de maniobrabilidad se lo estima en \$50000 para barcos de una hélice. Obteniendo se n valor total de:

$$\$ 834,243.74$$

- **Costo del Sistema Eléctrico.**

Según Hekkenberg [29], el costo del sistema eléctrico incluido el generador se puede estimar usando la siguiente formulación.

$$\$563.83/\text{kVA} \quad (4.2)$$

Donde:

Kva: es la capacidad total del generador en kilovatios.

- **Costo del Sistema de achique y lastre.**

Usando la referencia anterior, los costos de los sistemas de achique y lastre son estimados con la longitud de la embarcación, considerando \$507,45 por metros de eslora.

- **Costo de Acomodación.**

Hekkenberg [29], menciona que el costo de acomodación tiene un precio estimado de \$676.74 por cada metro cuadrado de espacio usado.

- **Costo de sistema de amarre.**

Teniendo las dimensiones de la embarcación (L, B y T), el costo del sistema de amarre ha sido determinado aplicando de la siguiente formulación presentada por Hekkenberg [29].

$$\frac{\$14.664}{\text{m}^3} * \text{LBT}(\text{m}^3) = \$ 77,589.44 \quad (4.3)$$

- **Costo del Equipamiento.**

Hekkenberg [29], permite calcular este rubro con la siguiente formulación $\$45100 * W^{\frac{2}{3}}$, donde W es el peso del equipamiento expresado en toneladas y se lo estimó utilizando la gráfica que nos facilita Watson [30], obteniendo un valor de 290 Ton.

- **Costos Misceláneos.**

El costo de los misceláneos se ha determinado considerando equipos electrónicos y navegación, equipos de seguridad, clasificación de la embarcación, además del costo por adquisición de software, etcétera. Estimando un valor de \$100.000.

- **Costo de margen de riesgo.**

Un margen del 5% es incluido por el astillero al costo total de la embarcación.

- **Costo de diseño e ingeniería de producto**

Este costo se considera en \$871.833,79 correspondiente a un 10% de la suma total de los rubros calculados en los puntos anteriores, En la Tabla No. 89. Se presenta un resumen del costo total de activos fijos.

Sistema	Valor (USD)
Costo de construcción	\$ 4.830.705,72
Propulsión y Maniobrabilidad	\$ 834.243,74
Sistema Eléctrico	\$ 157.872,40
Sistema de achique y lastre	\$ 37.465,03
Acomodación	\$ 219.263,76
Sistema de amarre y fondeo	\$ 77.589,44
Tapas de escotilla	\$ 79.599,42
Otros Sistemas (Outfitting)	\$ 1.986.683,01
Misceláneo	\$ 100.000,00
Margen de Riesgo	\$ 394.915,97
Diseño e ingeniería	\$ 871.833,79
Costo Total	\$ 9.590.171,70

Tabla No. 89. Total de activos fijos.

[Fuente: Elaboración propia]

- **Depreciación**

Eventualmente los activos a lo largo del tiempo van perdiendo su valor ya sea por uso u obsolescencia, para tratar de compensar esta pérdida contable se aplican depreciaciones a todos los bienes, en la Tabla No. 90 se aprecia la vida útil considerada para las diferentes partes de la embarcación.

Ítem	Vida Útil
Casco grupo 100	30
Propulsión y Maniobrabilidad	25
Sistema Eléctrico	20
Sistema de achique y lastre	25
Acomodación	20
Sistema de amarre y fondeo.	30
Tapas de escotilla	30
Otros Sistemas (Outfitting)	20
Misceláneo	28

Tabla No. 90. Vida útil.

[Fuente: Elaboración propia]

- **Permisos**

Permisos legales que permiten que se ponga en marcha la construcción de la embarcación y posterior operación, estos son emitidos principalmente por la Subsecretaria de Puertos y DIRNEA, para este rubro se tiene un valor correspondiente a \$35000.

4.3. Costos de operación

En este rubro se encuentran todos aquellos costos generados a partir de la operación de la embarcación, cabe recalcar que estos fueron asignados como responsabilidad del arrendador, a continuación, se detallan estos costos:

Ítem	Costo promedio anual
Seguro	\$207.330,89
Mantenimiento y Repuestos	\$79.366,00
TOTAL	\$286.697,36

Tabla No. 91. Costos de operación.

[Fuente: Elaboración propia]

4.4. Inversión y financiamiento

En el proyecto el inversionista es el propietario aportando un 80% de la inversión total, y el porcentaje restante será cubierto por un préstamo realizado a largo plazo a una entidad financiera.

La siguiente tabla muestra la inversión inicial del proyecto.

Inversión inicial	
Activos Fijos Totales	\$ 9.590.171,70
Permiso de Funcionamiento	\$ 35.000,00
Capital de Trabajo	\$ 70.692,50
Total	\$ 9.695.864,20

Tabla No. 92. Inversión Inicial.

[Fuente: Elaboración propia]

El préstamo a realizar supone un 20% de la inversión inicial correspondiente a \$1.933.772,84, la entidad financiera en la actualidad tiene una tasa de interés de 11,83%, generando así una tasa efectiva de 0,99%. Se pretende cubrir la deuda en 10 años, la tabla mostrada a continuación muestra el capital y los intereses que se han generado anualmente.

Año	Capital	Intereses	Total dividendo	Amortización
1	\$107.896,90	\$223.678,21	\$331.575,11	\$1.831.275,94
2	\$121.376,45	\$210.198,66	\$331.575,11	\$1.709.899,49
3	\$136.539,99	\$195.035,12	\$331.575,11	\$1.573.359,49
4	\$153.597,91	\$177.977,20	\$331.575,11	\$1.419.761,58
5	\$172.786,88	\$158.788,23	\$331.575,11	\$1.246.974,70
6	\$211.627,48	\$147.578,89	\$359.206,37	\$1.035.347,22
7	\$220.811,71	\$110.763,40	\$331.575,11	\$814.535,51
8	\$248.397,68	\$83.177,43	\$331.575,11	\$566.137,83
9	\$279.429,97	\$52.145,14	\$331.575,11	\$286.707,86
10	\$286.707,86	\$17.235,99	\$303.943,85	\$0,00

Tabla No. 93. Tabla de amortización.

[Fuente: Elaboración propia]

4.5. Ingresos

Se ha definido que la embarcación sea arrendada, logrando facturar en el primer año un aproximado de \$ 3.809.280, éste valor ha sido calculado basándose en los costos que tiene que solventar el propietario anualmente, sin olvidar generar un porcentaje de ganancia razonable.

4.6. Tasa de descuento

La tasa de descuento fue determinada aplicando a la siguiente ecuación denominada CAPM:

$$R_i = R_f + \beta(R_m - R_f) + R_p \quad (4.4)$$

Donde:

R_i = Tasa de descuento del accionista

R_f = 1.6, Tasa libre de riesgo

$\beta = 1.28$, Beta o volatilidad de acciones similares en el mercado
 $R_m =$ Retorno esperado del mercado
 $R_m - R_f = 6.7\%$
 $R_p = 7.97$, Riesgo del País

Tenido una tasa de descuento de:

$$R_i = 18.12\%$$

4.7. Flujo de Caja

Flujo de caja o flujo de efectivo, básicamente se define como la cantidad de dinero en efectivo que se espera tener en un momento específico del futuro, en el ANEXO O se muestra en detalle este flujo.

- **Cálculo del Valor actual neto (VAN)**

El valor actual neto se lo conoce como el beneficio neto actualizado de un proyecto y se define como los valores presentes de los flujos anuales, deducidos los gastos e inversiones generados durante la vida útil del proyecto, la siguiente formulación presentada por Guerrero, [31] permite calcular el VAN.

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{F_t}{(1+r)^t}; \quad t = 0, 1, 2, \dots \quad (4.5)$$

Donde:

$F_t = Y - G$, Flujos de caja para cada periodo

Y = ingresos

G = egresos

t = 25, número de periodos considerados periodo

r = tasa de descuento.

La siguiente tabla muestra en detalle el cálculo del valor actual neto.

r	18,12%	
Años (t)	Flujo Neto (Ft)	Flujo actualizado al 18,12%
		$Ft/((1+r)^t)$
0	-\$ 9.668.864,20	-\$ 9.668.864,20
1	\$ 3.028.477,34	\$ 2.563.898,87
2	\$ 1.863.599,26	\$ 1.335.689,93
3	\$ 1.938.076,75	\$ 1.175.981,95
4	\$ 2.015.325,70	\$ 1.035.264,90
5	\$ 2.095.492,56	\$ 911.315,87
6	\$ 2.151.181,72	\$ 792.020,59
7	\$ 2.271.985,21	\$ 708.176,37
8	\$ 2.356.001,12	\$ 621.710,19
9	\$ 2.449.675,51	\$ 547.264,93
10	\$ 2.574.780,53	\$ 486.974,07
11	\$ 2.968.729,82	\$ 475.349,29
12	\$ 2.947.139,09	\$ 399.502,38
13	\$ 3.040.586,75	\$ 348.941,56
14	\$ 3.136.881,76	\$ 304.768,45
15	\$ 3.236.110,43	\$ 266.177,76
16	\$ 3.338.361,65	\$ 232.465,43
17	\$ 3.443.727,01	\$ 203.016,00
18	\$ 3.552.300,89	\$ 177.291,48
19	\$ 3.664.180,47	\$ 154.821,59
20	\$ 3.779.465,90	\$ 135.195,32
21	\$ 3.898.260,36	\$ 118.053,44
22	\$ 4.020.670,11	\$ 103.081,99
23	\$ 4.146.804,64	\$ 90.006,63
24	\$ 4.276.776,75	\$ 78.587,61
25	\$ 4.410.702,64	\$ 68.615,44
	Valor actual Neto	\$ 3.665.307,83

Tabla No. 94 Calculo del VAN

[Fuente: Elaboración propia]

- **Calculo de la tasa interna de retorno (TIR)**

La tasa interna de retorno se define como la tasa que hace cero al VAN, teniendo como función objetivo la siguiente ecuación.

$$\sum_{t=0}^n \frac{F_t}{(1+r)^t} = 0 \quad (4.6)$$

Para su resolución se expande la ecuación anterior y por medio de prueba y error o usando una hoja electrónica se determina la tasa (TIR) que permite cumplir la igualdad.

$$-\frac{F_0}{(1+r)^0} + \frac{F_1}{(1+r)^1} \dots + \frac{F_{25}}{(1+r)^{25}} = 0$$

Para el cálculo de la tasa interna de retorno se ha usado la función TIR de Excel, a seguir se muestran los argumentos de entrada requeridos por esta función.

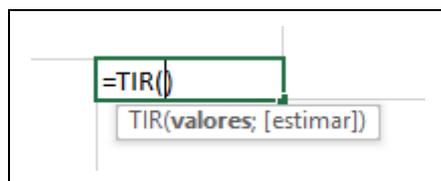


Figura No. 4.1 Función TIR utilizada desde Excel

[Fuente: Microsoft office]

Donde:

Valores: corresponde al ingreso de los valores actuales a lo largo de los años

Estimar: es un número que el usuario estima que se aproximara a resultado de TIR; se asume 0,1 si se omite.

Finalmente se obtiene un valor del TIR igual a:

$$\text{TIR}=24.58\%$$

En la siguiente tabla se muestran los indicadores para evaluar financieramente el proyecto. El VAN obtenido es positivo, representando así un aumento del capital y la TIR que comparada con la tasa de descuento es superior, podemos concluir que el proyecto es rentable.

Ítem	Valor
Tasa de descuento	18.12%
VAN	\$3.665.307.83
TIR del proyecto	24.58%

Tabla No. 95 Parámetros de viabilidad económica.

[Fuente: Elaboración propia]

4.8. Punto de equilibrio para la demanda

Básicamente el punto de equilibrio (PE) se define como el nivel en que los ingresos son iguales a los gastos y costos, siendo la utilidad y pérdidas igual a cero.

En la determinación del punto de equilibrio se debe considerar que se desea recuperar la inversión inicial durante el periodo de trabajo de la embarcación, para esto se han realizado variaciones porcentuales a los ingresos anuales en el flujo de caja. Esto se ha realizado con el objetivo de determinar con qué porcentaje de ingreso anual el VAN se hace cero. A continuación, se presenta una tabla con las variaciones realizadas y los resultados obtenidos.

% de reducción de los ingresos anuales	Ingresos	VAN por reducción de ingresos	TIR por reducción de ingresos
15	\$3.237.888,00	\$ 9.351,41	18,14%
15.03836	\$3.236.426,76	\$ 0	18,12%

Tabla No. 96 Análisis del punto de equilibrio.

[Fuente: Elaboración propia]

Tal como se puede apreciar en la tabla anterior, con una reducción cercana al 15.038% en los ingresos el Van es aproximadamente cero y la TMAR similar al TIR, logrando así que el proyecto sea sostenible. Finalmente tenemos que el punto de equilibrio para la demanda del proyecto es de:

$$PE \approx \$3.236.426,76$$

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. Se ha diseñado un buque granelero que cumpla con las características propuestas por el propietario, sin dejar de lado el cumplimiento de los criterios de estabilidad y las regulaciones establecidas por las Sociedades de Clasificación. Se optimizó la embarcación teniendo como principal objetivo la reducción de su costo, esto se alcanzó básicamente optimizando la parte estructural, ya que comúnmente este rubro es el más elevado en los buques.
2. Se ha logrado mejorar las formas definitivas de la embarcación logrando como principal objetivo disminuir la resistencia al avance y la presencia de la presión dinámica alrededor del casco. Obteniendo una resistencia total de 121.92 kN.
3. Se ha evaluado los índices de maniobrabilidad de la embarcación utilizando el modelo no lineal que fue implementado en Matlab, logrando obtener una embarcación aceptable para la sociedad clasificadora y que puede mantener su ruta.
4. Se ha calculado los esfuerzos y deformaciones del compartimento mediante la aplicación del software de elementos finitos y uso de las reglas de la Sociedad de Clasificación, teniendo como resultado, que ciertos sectores tenían deformaciones ligeramente excedidas en comparación con lo permitido, de manera que se optó por mejorar el escantillón de las secciones que hayan fallado, logrando así que estén dentro de los límites permitidos por la Sociedad de Clasificación. Se ha calculado la frecuencia natural de todo el compartimento, verificando que el resultado obtenido sea mayor a la frecuencia de las aspas y así evitar la resonancia.
5. Según lo calculado la inversión inicial del proyecto es de \$9.590.171,70, ya que se trata una fuerte inversión, se realizó el flujo de caja con una proyección de 25 años, obteniéndose un VAN de \$3.665.301.83, y un TIR de 23.58% mayor a la tasa de descuento, con estos resultados se puede concluir que proyecto es rentable.

Recomendaciones

1. Para el modelo 3D que se utilice para el análisis de la carena aplicando CFD, se deberá verificar que la superficie no tenga deformaciones que puedan generar una mal adquisición de resultados.
2. Para el cálculo de la resistencia al avance se recomienda realizar la simulación utilizando una malla fina, que permita obtener resultados más exactos que los obtenidos con la malla gruesa.
3. Se recomienda al lector que el precio del alquiler calculado no debe ser tomado como una referencia definitiva, ya que los costos y gastos se obtuvieron a partir de estimaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Z. A. M. YAVIN, A feasibility study of Ship Maneuverability in the Vicinity of an Obstacle.
- [2] R. Taggart, Ship Design and Construction, R. Taggart, Ed., New York: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1980.
- [3] M. Ventura, «Estimation Methods for Basic Ship Design,» pp. 6-61.
- [4] R. Alvariño, J. Azpiroz y M. Meisozo, El Proyecto Basico del Buque Mercante, Madrid, 1997.
- [5] Caterpillar, «Marine Engines Application and Installation Guide,» Caterpillar Inc., 2000.
- [6] ABS, CREW HABITABILITY ON SHIPS, Houston: American Bureau of Shipping, 2013.
- [7] IACS, «Common Structural Rules for Bulk Carriers de la IACS,» 2012.
- [8] IMO, «SOLAS,» International Maritime Organization, London, 2009.
- [9] Lloyd's, «Rule finder,» 2003.
- [10] GL, «Rules for Classification and Construction,» DNV GL SE, Hamburg,, 2015.
- [11] DNV.GL, «POSEIDON». GERMANY 2015.
- [12] LR, «General Information for the Classification of Special Service Craft,» Loyd's Register, 2016.
- [13] S. V. U. 9. M. i. L. ABS, Vessel Maneuverability, Houston,USA, 2006.
- [14] C. a. K. H. Lyster, Prediction equations for ships' turnig circles, NECIES, 1979.
- [15] P. F. H. Todd, Series 60-MEthodical Experiments with Models of Single-Screw Merchant Ships, July, 1963.
- [16] IMO, Convención internacional de Lineas de Carga, Tercera Edición .
- [17] P. O'Doguerthy, Comportamiento en la mar de buques pesqueros, Madrid, Febrero, 1975.
- [18] R. A. (. IMO instruments, «Code on Intact Stability for all types of ships covered,» 4 de Noviembre, 1993.

- [19] J. Holtrop, A statistical Re-Analysis of Resistance and Propulsion Data, Holanda: Maritime Research Institute Netherlands, 1984.
- [20] P. M. J. A. Nelson A, Estudio Comparativo de Maniobrabilidad de un buque portacontenedor, 2006.
- [21] G. Loyd's, «Common Structural Rules,» 2013.
- [22] RINA, Rules for the Classification, Genova: RINA, 2012.
- [23] D. Butler, GUIDE TO SHIP REPAIR ESTIMATES, Oxford, 2000.
- [24] G. H. y. J. J. Gómez, Determinación Experimental de la Influencia del Bulbo de Proa en una embarcación Sardinera Ecuatoriana., Guayaquil, 2013.
- [25] ITTC-7.5-02-0.3-1.4, Performance, Propulsion 1978 ITTC Performance Prediction Method, 1999.
- [26] F. A. N. p. S. PAPOULIAS, Dynamics of Marine Vehicles, 1993.
- [27] ABS, «STEEL VESSELS UNDER 90 METERS (295 FEET) IN LENGTH,» American Bureau of Shipping, Houston, 2016.
- [28] R. M. Dominguez, Calculo de Estructuras de Buques, Madrid, 1969.
- [29] R. G. Hekkenberg, A building cost estimation method for inland ship, Netherlands, 2013.
- [30] D. G. Watson, Practical Ship Design, Scotland: Ocean Engineering Series, 1998.
- [31] G. Guerrrero, Proyectos de Inversión, Guayaquil: ESPOL, 2007.
- [32] *Ministerio de Transporte y Obras Publicas*, 2013.
- [33] DNV, «Structure».
- [34] A. M. Fernandez, Buque Granelero 32000 TPM, Madrid: Universidad Politecnica de Madrid.
- [35] A. M. Kracht, Design of Bulbous Bows, Vol. 86, 1978.
- [36] ITTC, ship model correlation line, 1957.
- [37] Kijima, «On a prediction method of ship manoeuvring characteristics,» MARSIM, 1993, pp. 285-294.

[38] Reintjes, Capacity Chart, Marine Gearboxes, 2009.

[39] S. V. U. 9. M. i. L. ABS, Part 4, Vessel System and Machinery, Houston, USA, 2015.

[40] H. B. V. Schnnekuth, Ship Design for efficiency and Economy, Butterworth-Heinemann, 1998,Segunda edicion..

[41] DNV, «ts302,» enero 2011. [En línea]. Available: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNV/ruleship/2011-01/ts302.pdf>. [Último acceso: 15 julio 2015].

ANEXOS

ANEXO A – Estimación de dimensiones – DP.

NAME	TPM (ton)	L (m)	Lpp (m)	B (m)	T (m)	D (m)	V (Kn)	Ct
KIRISHIMAMARU	1266	65,1	61,5	11,2	4	4,5	13	102,7
MEIZAN MARU	1720	70	66,1	11,4	4,6	5,1	13,5	109,2
KANNA MARU	1710	70	66,1	11,4	4,6	5,2	13,5	111,3
RISSHO MARU	1711	70	66,1	11,4	4,6	5,2	13,5	111,3
STELLAMARIS	4720	102,7	95,9	15,5	6,1	7,7	14	120,8
ENVIK	3683	95,8	88,5	16,5	5,4	7,8	10	126,8
AKI MARU	1745	69,5	65	11,5	5,1		13	134,4
VASTANVIK	3019	90,2	82	13	5,5	7,6	12	140,9
SHIN HOYO MARU	1753	68,8	65,5	11,5	4,6	5,1	13	153,3
RYUJIN MARU	3131	87,5	82,8	13,5	5,4	6,6	15	154,2
NAN XIANG	4385	95,7	88,8	14,2	5,6	7	11	161,9
WILSON HUSUM	4119	89,9	84,8	15,2	5,6	7,1	13	169
CEMLUNA	3982	89,4	84,9	13,5	5,3	7	12	171,7
GUANG XING	2803	80,0	74,3	13,6	5,2	7	12	200
GL GLORIA 1	2803	80,0	74	13,6	5,2	7	11,7	221,8
GOLDEN OCEAN	2846	80,0	74	13,6	5,2	7	11,7	221,8
QUING PING	2859	80,0	74	13,6	5,2	7	11,7	221,8
QUING RU	2847	80,0	74	13,6	5,2	7	11,7	221,8
HONGSHENG	2600	80,0	74,3	13,6	5,2	7	11,7	222,1
AMBUJA ROHINI	2784	80,7	77,4	15	4,1	6,6	10	256

Tabla No. 97. Base de Datos.

[Fuente: Elaboración Propia]

A continuación, se presentan graficas de regresión lineal realizadas para determinar cada una de las características de la embarcación, en estas el parámetro de peso muerto se deja en el eje de las x, de tal manera que la ecuación generada dependa únicamente de este parámetro que ha sido fijado por el armador.

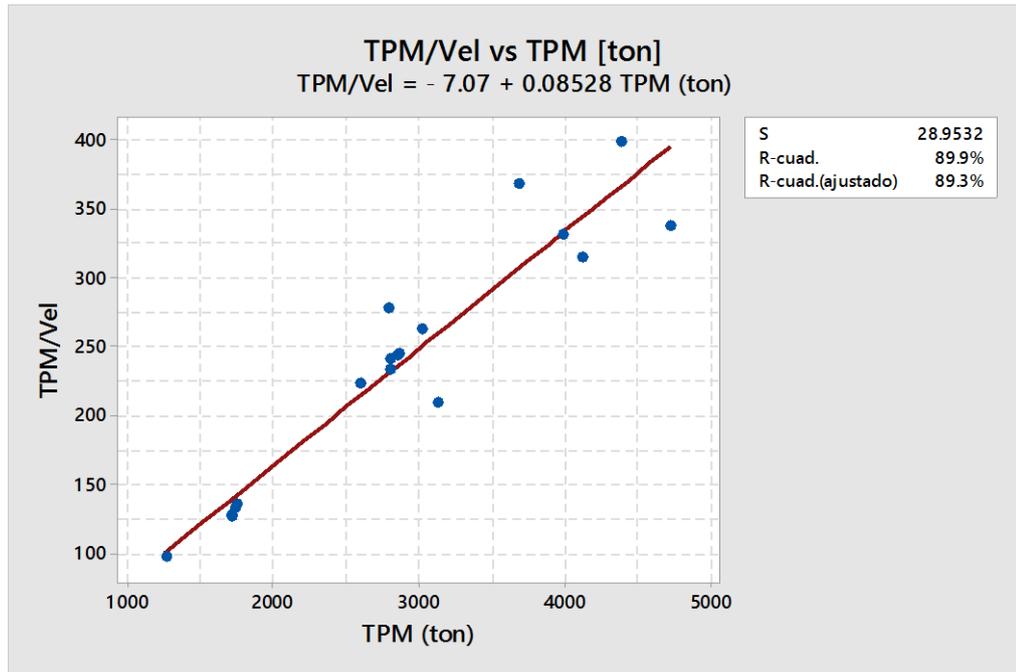


Figura No. A. 1 TPM/V Vs TPM
 [Fuente: Software Minitab 17.]

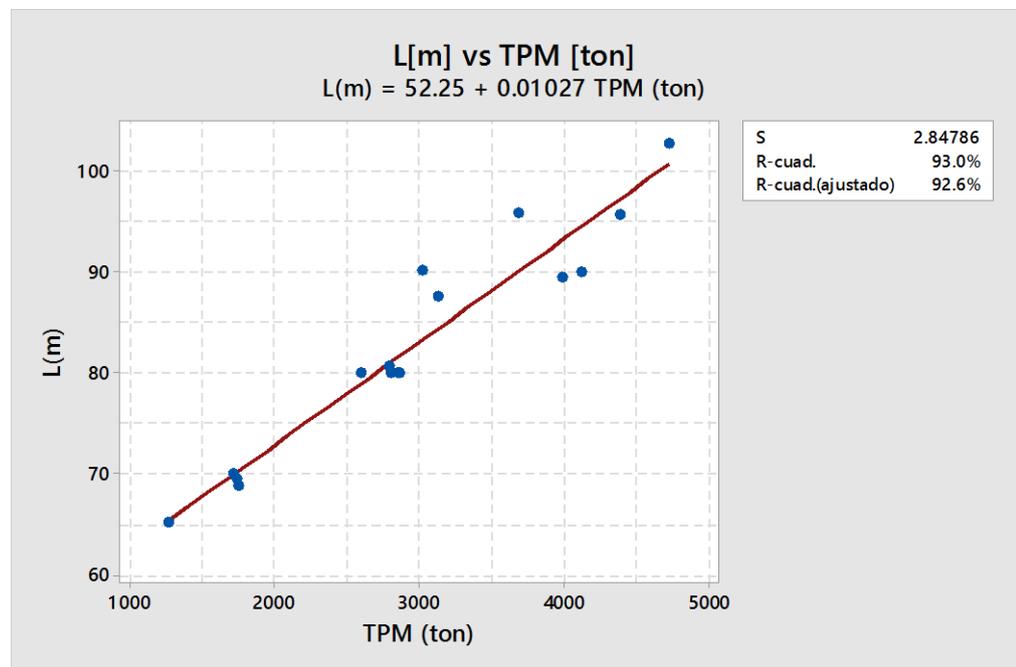


Figura No. A. 2 L Vs TPM
 [Fuente: Software Minitab 17.]

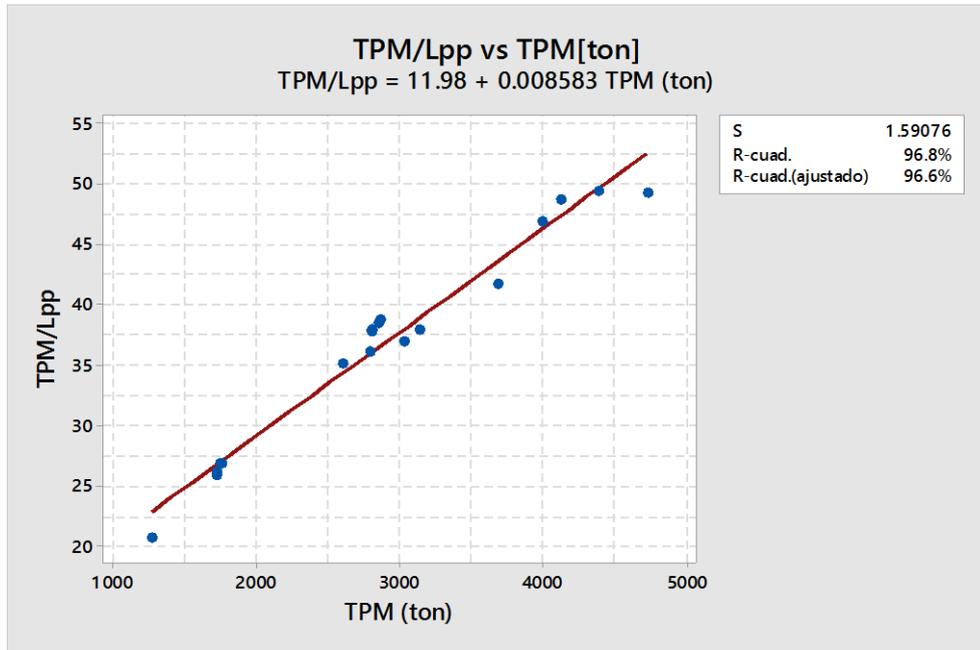


Figura No. A. 3 TPM/Lpp Vs TPM
 [Fuente: Software Minitab 17.]

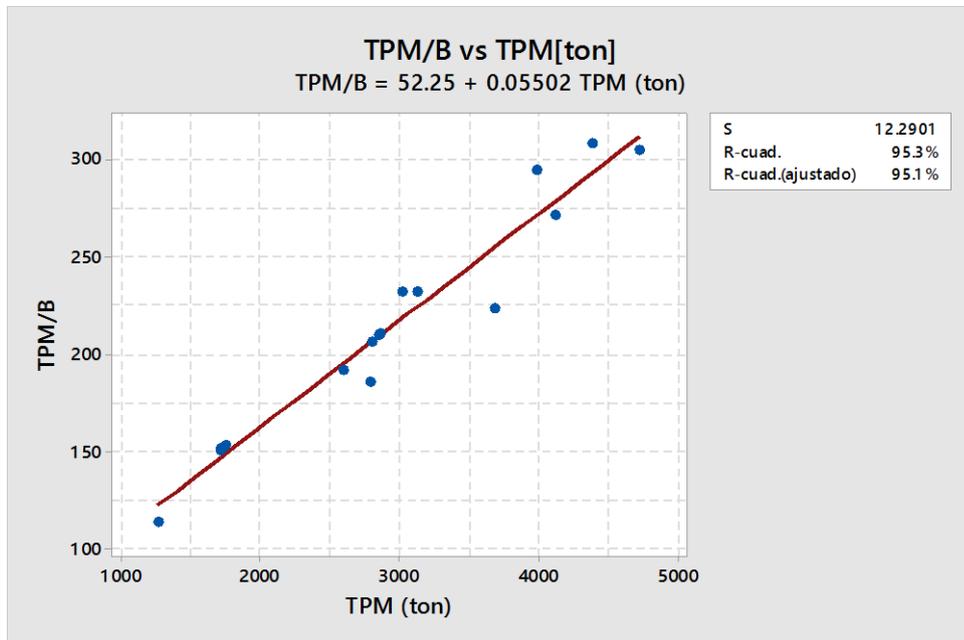


Figura No. A. 4 TPM/B Vs TPM
 [Fuente: Software Minitab 17.]

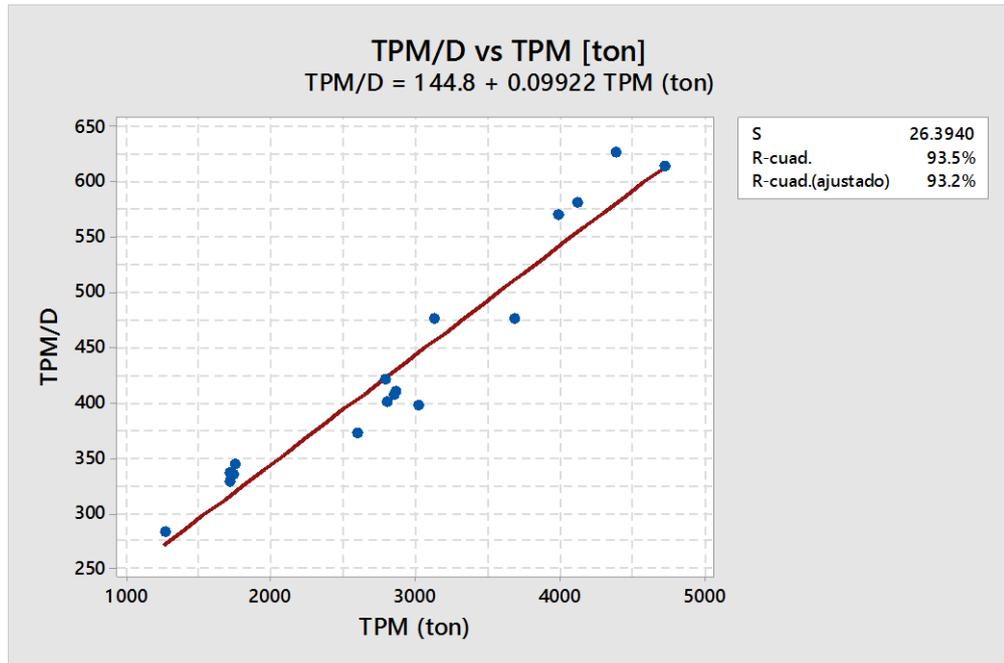


Figura No. A. 5 TPM/D Vs TPM
 [Fuente: Software Minitab 17.]

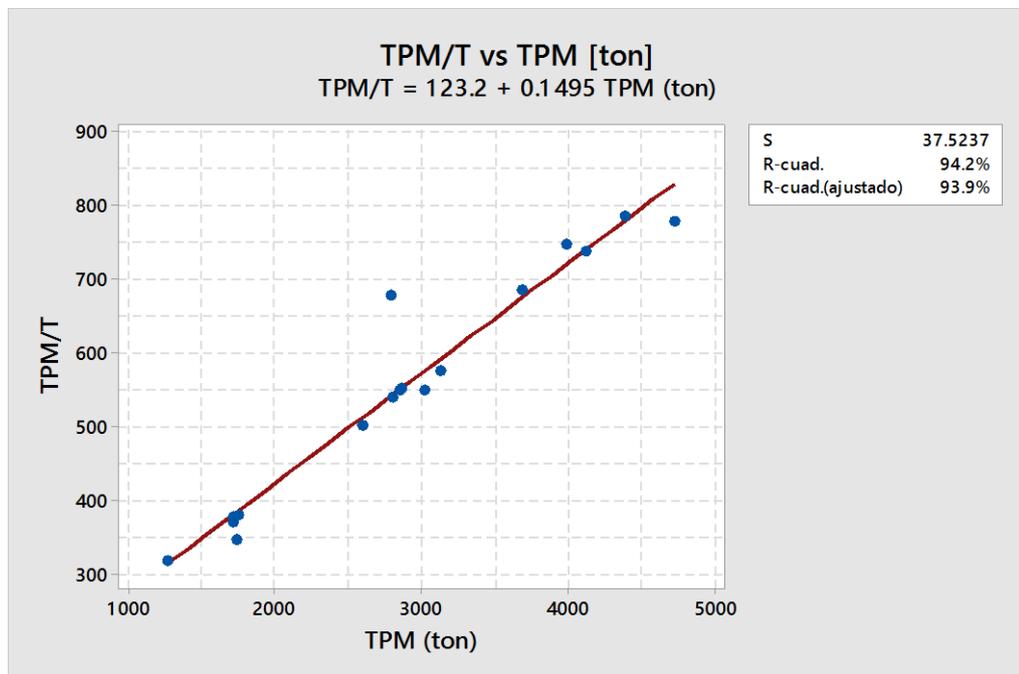


Figura No. A. 6 TPM/T Vs TPM
 [Fuente: Software Minitab 17.]

ANEXO B – Estimación de parámetros – DP.

Se presenta un breve resumen de las formulaciones utilizadas presentadas por el prontuario de Ventura, [3], gracias a estas se puede determinar de manera conceptual ciertos parámetros hidrostáticos con los que deberá cumplir la embarcación.

- Coeficiente de Froud

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL_{pp}}} = \frac{(12.22 * 0.514)}{(9.8 * 75.13)^{\frac{1}{2}}}$$

- Coeficiente block – formulación de KATSOULIS

$$C_b = 0.8217 * f * L_{pp}^{0.42} * B^{-0.3072} * T^{0.1721} * V^{-0.6135}$$

Donde f depende de la siguiente tabla basada en el tipo de embarcación:

Roros	0.97	Graneleros	1.03
Frigoríficos	0.97	Gaseros	1.04
Cargueros	0.99	Petroleros de productos	1.05
Petroleros de crudo	0.99	Quimiqueros	1.06
Portacontenedores	1.00	Ferris	1.09
Obos	1.00		

- Coeficiente de sección media – promedio entre las formulaciones de Kerlen y por HSVA

C_m	$1.006 - 0.0056(Cb^{-3.56})$	$C_m = 0.984$
	$\frac{1}{1 + (1 - Cb)^{3.5}}$	$C_m = 0.982$

Tabla No. 98. Cálculo del coeficiente de sección media - DP.

[Fuente: Elaboración Propia]

- Coeficiente prismático

$$C_p = \frac{C_b}{C_M}$$

- Coeficiente de área de flotación - promedio entre las formulaciones de SCHNEEKLUTH, TORROJA Y PARSON.

C_{wl}	$0.95C_p + 0.17(1 - C_p)^{\frac{1}{3}}$	0,77
	$(1/3)(1 + 2C_b)$	0,79
	$0.248 + 0.778C_b$	0,78
	$\frac{0.6785}{0.471 + 0.551C_b}$	0,80

Tabla No. 99. Cálculo del coeficiente del plano de flotación - DP.

[Fuente: Elaboración Propia]

- Froud Volumétrico – Si $F_{vol} < 1$, la embarcación se ha de considerar de desplazamiento

$$F_{vol} = \frac{V}{\sqrt{g(\nabla^{\frac{1}{3}})}}$$

- Coeficiente de Carga - Si $3 < CP < 5$, la embarcación puede ser de desplazamiento

$A_p = C_{wl}BL_{wl} = 793$	$C_p = \frac{A_p}{\nabla^{\frac{2}{3}}}$
-----------------------------	--

Tabla No. 100. Cálculo del coeficiente prismático - DP.

[Fuente: Elaboración Propia]

- Centro de Boyantes - promedio entre las formulaciones de Normand, Shneekluth, Wobing.

	Ecuación	Resultado
KB	$T\left(\frac{5}{6} - \frac{1}{3}\left(\frac{C_b}{C_{wl}}\right)\right)$	2.76
	$T(0.9 - 0.36C_M)$	2.77
	$T(0.9 - 0.3C_M - 0.1)$	2.72
	$T\left(0.78 - 0.285\left(\frac{C_b}{C_{wl}}\right)\right)$	2.70

Tabla No. 101. Cálculo del centro de boyantes - DP.

[Fuente: Elaboración Propia]

- Posición longitudinal del centro de flotación - formulación de SCHNEEHLUTH para tanqueros y Graneleros, presentada como un porcentaje de Lpp medida desde sección media (+ hacia proa).

$$lcb = -13.5 + 19.4(Cp)$$

ANEXO C – Estimación de pesos – DP.

➤ Estimación de Arqueo Bruto

Para el cálculo de Arqueo bruto se considerará la ecuación 55 obtenida del libro de Alvariño, [4].

$$GT = k_1 * V_{util}$$

Donde:

- $V_{util} = VTC + V_{sup} + VES \text{ (m}^3\text{)}$

$$VTC = CBD * L_{pp} * B * DA + VBR$$

$$ARM = \left(\frac{3.3}{100}\right) \left(\frac{L_{pp}}{3} + 10\right) * 0.0125$$

$$DA = D + ARM$$

$$VBR = 0.12 L_{pp} * B^2$$

$$CBD = CB + \frac{0.35(D-T)}{T} (1-CB)$$

$$V_{sup} = 41 L_{pp} - 755 \text{ m}^3$$

$$VES = 0.5 L_{pp} * 0.5 B * 0.5 \text{ m}^3$$

$$V_{util} = 4598.05 + 2325.3 + 123.8 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$V_{util} = 7047.14 \text{ [m}^3\text{]}$$

- $K1 = 0.2 + 0.02 * \log_{10}(V_{util})$

$$K1 = 0.2 + 0.02 * \log_{10}(7047.14)$$

$$GT = 0.28 * (7047.14)$$

$$GT = 1951.78$$

➤ Peso de Muerto

- **Peso del combustible**

El peso de combustible fue estimado en base al tiempo de viaje de ida, considerando que el barco se abastecerá en el puerto de llegada tanto de combustible como de víveres,

entonces el peso de combustible para 10 días de viaje es de 228.5 [m³] lo que equivale a 194.27 [ton].

- **Peso del aceite**

Para el peso del aceite se considera una densidad típica de 0.8916 [ton/m³] para motores marinos de 4T última generación utilizados en el sector marino [5]. Para el peso de aceite se asume un 3.5% de la capacidad de combustible, teniendo un peso de 7.13 [ton].

- **Peso del agua dulce, tripulantes y víveres**

A continuación, se detalla la dotación mínima de la embarcación, basándonos en lo aprobado por la Autoridad Marítima Nacional, [32] , tanto para la sección de cubierta y sala de máquinas. La cual establece que para calcular el mínimo número de tripulantes a bordo se debe ingresar el tonelaje de registro bruto y potencia instalada, ya que no se posee información suficiente para estimar la potencia, basándonos en embarcaciones de similar condición se implanta de manera conceptual en 3000 HP.

T.R. B	Oficial de cubierta			Patrón de altura	Contra maestr e	Marinero de primera de puente	Marinero de cubierta	Total
	1er	2do	3er					
1951	1	10	1	1	1	2	2	9

POT BHP	Oficial de maquinas			oficial electro- técnico	marinero de primera de maquinas		marinero de maquina	Total
	1er	2do	3er					
3000	1	1	1	1	2	1	1	8

Tabla No. 102. Dotación mínima requerida en la embarcación - DP.

[Fuente: Elaboración Propia]

Se considera que habrá un cocinero, haciendo un total de 18 tripulantes y estableciendo un promedio de peso por persona en 125 Lb, tenemos un peso total de tripulación de 2.25 [ton].

Ya que se considera que se abastecerá de agua dulce en el puerto, entonces el peso de agua dulce para el viaje de ida o vuelta es de 29.5 m³ lo que equivale a 29.5 [ton].

Los víveres para 12 días de viaje y operación tienen un peso aproximado de 1.1 [ton].

➤ **Peso en Rosca (WR)**

Para el cálculo de este peso se utilizaron las formulaciones presentadas en Libro de Albariño, [4], lográndose descomponer el peso en rosca en el siguiente desglose de pesos:

$$WR = WST + WQ + WOA$$

- Peso del Acero (WST) – Casco y Superestructura - formulación de J.L. Garcés

$$WST=0.024Lpp^{1.5}BD^{0.5}[\text{ton}]$$

A la formulación anterior según la misma referencia se le aumenta de 4% a 4,6% de tal manera que se considere el doble casco:

$$WST=1.046(0.024Lpp^{1.5}BD^{0.5}) [\text{ton}]$$

- Peso de la Maquinaria (WQ)

Este peso se desglosa de la siguiente manera:

$$WQ = WME + WRP + WQR + WQE$$

Donde:

$$WME = 2.5 + 9.5x \left[\frac{MCO}{N} \right]^{0.91} [ton]$$

MCO [hp] es la potencia máxima estimada en PropExpert expuesta en el capítulo 3. N [RPM] del motor propulsor igual 750 rpm; estimación de las revoluciones de un motor en base a la potencia considerada.

$$WRP = Km MCO^{0.7} [ton]$$

Donde el coeficiente Km es 0.56 para buques graneleros

$$WQR = 0.03 V_{CM \text{ corregido}} [ton]$$

Donde $V_{CM}[m^3]$ es el volumen de la cámara de Maquinas, estimado mediante la siguiente ecuación:

$$VCM = Lpp * B * D * \left(\frac{0.042D}{T} - 0.04Cb + (Lcm + Lpp) * \frac{Cb-0.02}{Lpp} \right) - 0.8$$

y L_{CM} (Longitud de la cámara de máquinas) estimada por la fórmula:

$$LCM = 2.53Lpp^{0.34} + 3.87 * 10^{-6} * 0.85MCO^{1.5} [m]$$

Siendo RCM una corrección del volumen calculado en VCM, el cual se restará de VCM para obtener un VCM corregido.

$$RCM = Lpp * B * D * \left(\left(\frac{DDF}{T-0.1} \right) (0.133Cb - 0.048) \right)$$

$$VCM \text{ corregido} = VCM - RCM$$

Donde DDF es la altura del doble fondo, el cual según DNV, [33] nos recomienda una altura mínima de:

$$DDF = \left(\frac{32B + 190(T^{0.5})}{1000} \right)$$

$$\mathbf{WQE} = L_{\text{eje}} * \text{Área}_{\text{eje}} * \text{Densidad}$$

Se estima el Peso de la línea del eje considerando que este es de acero al carbón con una densidad de 8 ton/m³, una longitud de 8 [m] y un área de 0.05 [m²].

- Peso del Equipo y la Habilitación (WOA)

Viene dado por la fórmula:

$$\mathbf{WOA} = Ke \times Lpp \times B$$

Donde:

$$\mathbf{Ke} = 0.39 - 0.0001 \times Lpp$$

Teniendo el valor total del peso en Rosca, a este normalmente se le resta el 10% según de lo recomendado en la Tesis de ETSIN, [34], obteniéndose el siguiente resultado.

$$\mathbf{WR} = 1105.29 \text{ [Ton]}$$

ANEXO D – Generación de formas – DP.

Tal como se mencionó, se realizó el análisis en el software PropExpert obteniendo las siguientes características para el motor y hélice además del grafico de eficiencia del propulsor.

Serie	Series B
# Palas Z	4
Relación pala área	1.0
Diámetro [mm]	2800
Paso/Diámetro	0.72
Reducción	3.038:1

Tabla No. 103. Características de la hélice del prototipo.

[Fuente: Elaboración Propia]

Potencia al freno instalada [hp]	4640
RPM del motor	900
Velocidad esperada [nudos]	12.2
Numero de propulsores	1

Tabla No. 104. Características del motor del prototipo.

[Fuente: Elaboración Propia]

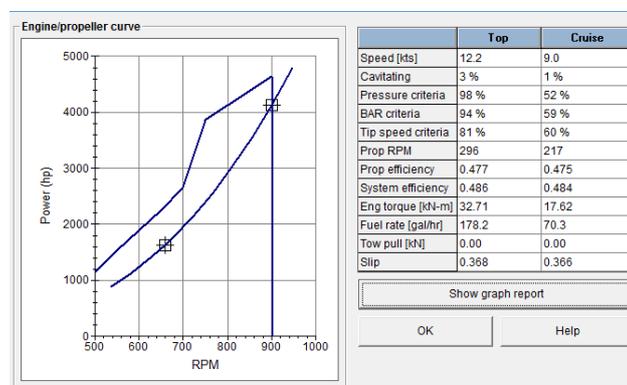


Figura No. D. 1 Curva del motor/hélice- DP
[Fuente: Elaboración Propia]

- Plano de líneas de forma

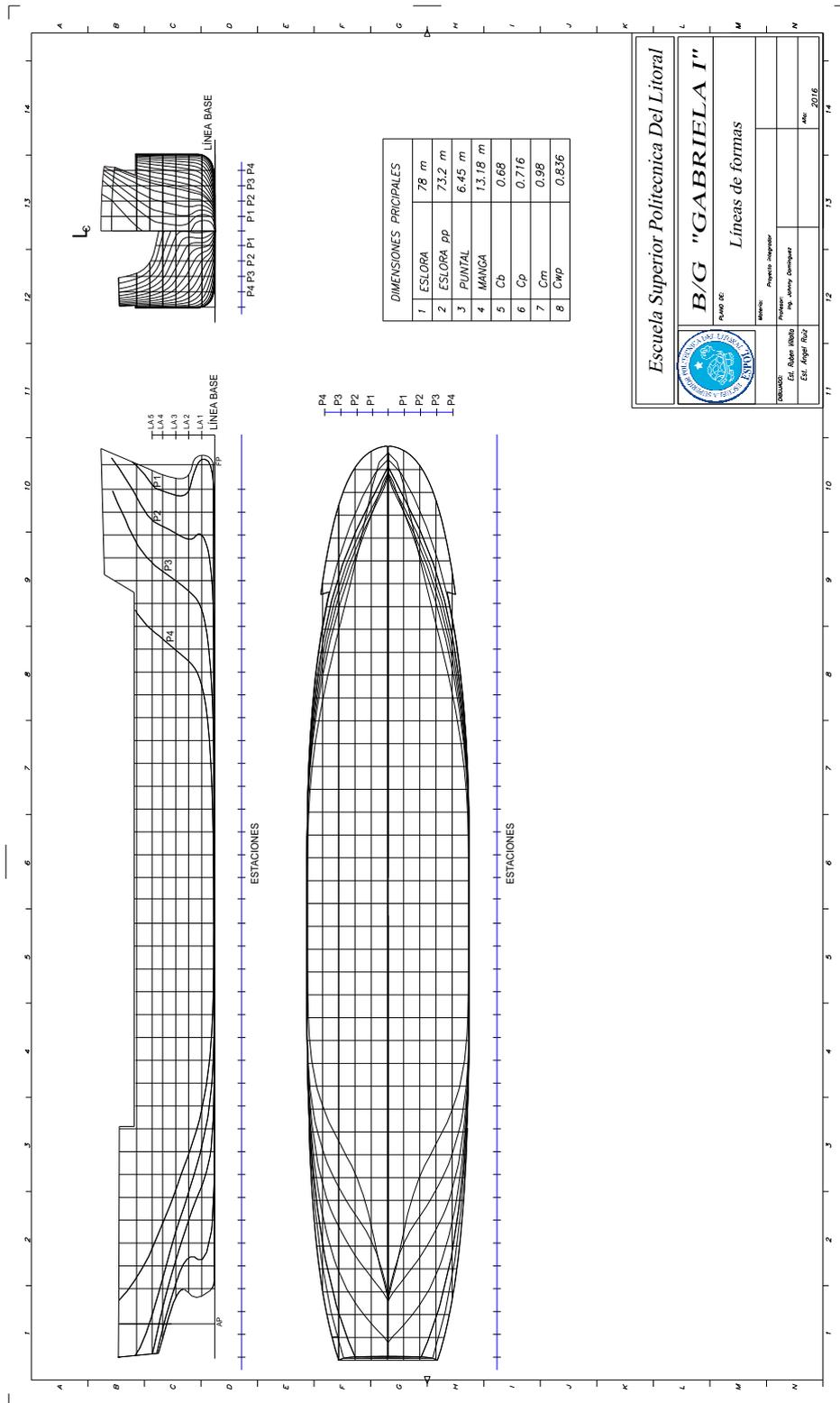


Figura No. D. 2 Plano de líneas de forma-DP.

[Fuente: Elaboración Propia]

Se verifico y aplico las recomendaciones dadas por Caterpillar, [5], para asegurar:

- Buque de desplazamiento, corte a $\frac{1}{4}$ de la manga, desde flotación se observa que el ángulo formado con la tangente a la curva sea mayor de 7 grados

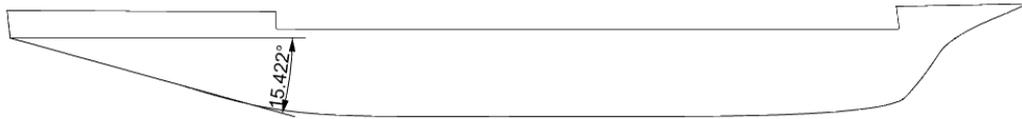


Figura No. D. 3 Verificación de ángulo de salida vista de perfil.

[Fuente: Elaboración Propia]

Ángulo de la embarcación es $15.42^\circ > 7^\circ$

- Ángulo de entrada, este ángulo debe ser menor a 15 grados para evitar los vórtices. Corte realizado en la posición del calado de diseño.



Figura No. D. 4 Verificación de ángulo de entrada en el plano de flotación.

[Fuente: Elaboración Propia]

Ángulo de entrada $14.14^\circ < 15^\circ$

- Ángulo de salida, Este ángulo tiene que estar en entre los 25 y 35 grados, se trata de evitar los vórtices. Corte realizado en la manzana de la hélice (se aproximó la ubicación).



Figura No. D. 5 Verificación de ángulo de salida en la manzana de la helice.

[Fuente: Elaboración Propia]

Ángulo de salida $25^\circ < 26.8^\circ < 35^\circ$

ANEXO E – Arreglo General – DP.

- Plano de rayado estructural

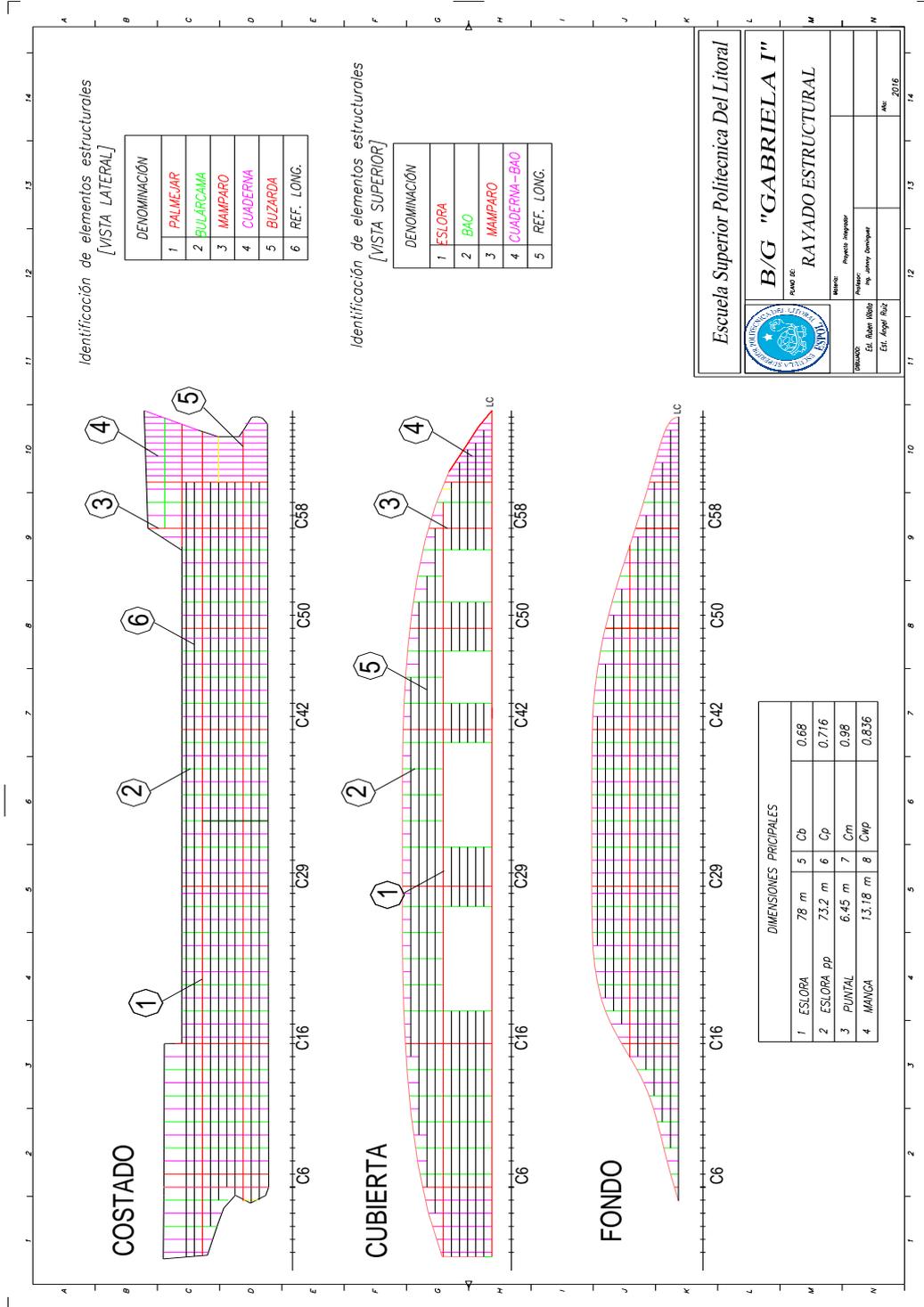


Figura No. E. 1 Plano de Rayado Estructural-DP.

[Fuente: Elaboración Propia]

- Plano de Distribución de Cubiertas

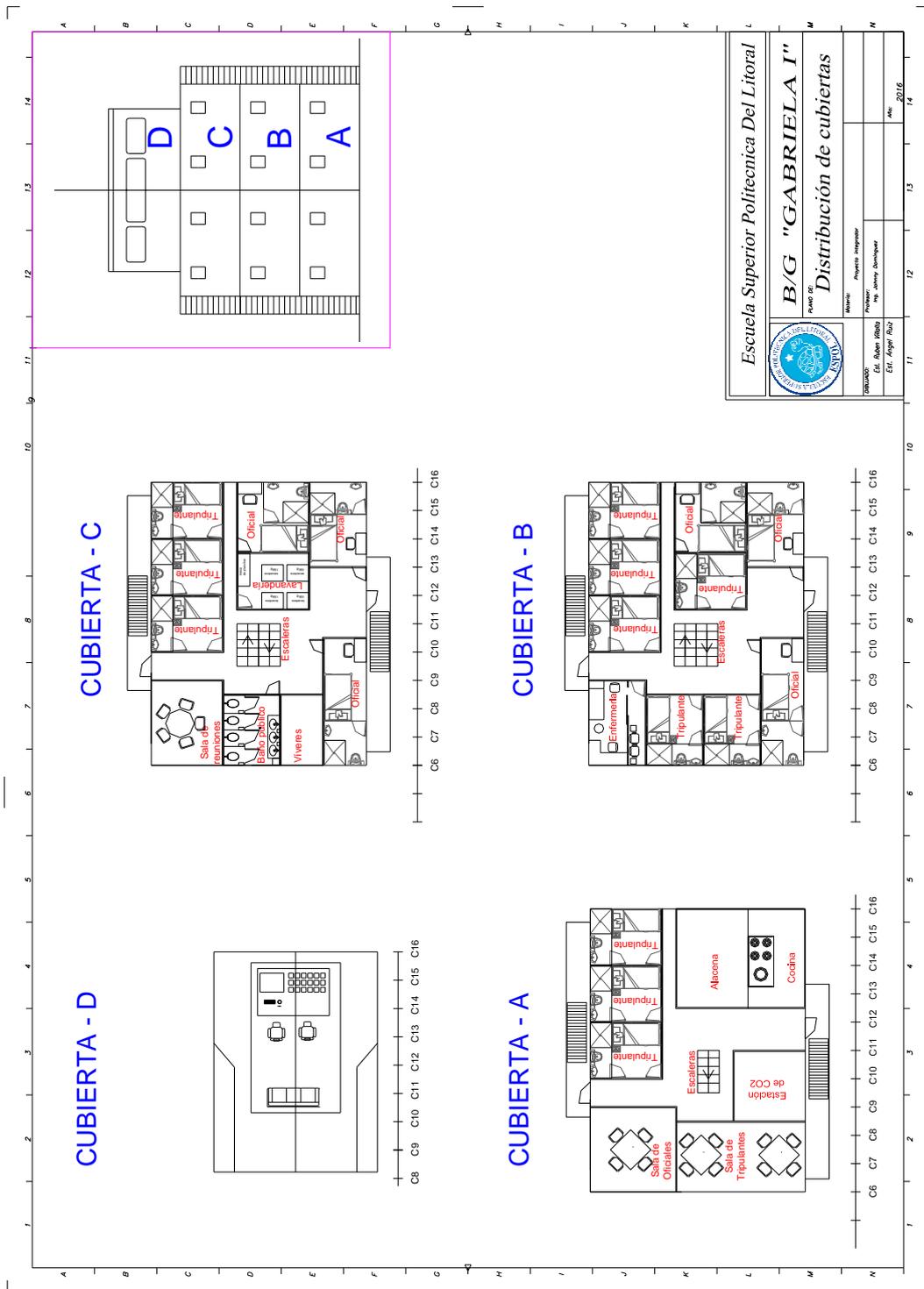


Figura No. E. 2 Distribución de cubiertas- DP.

[Fuente: Elaboración Propia]

Cubierta Principal	Cubierta Superior (1)	Cubierta Superior (2)	Cubierta D (mando)
3 cabinas de tripulantes	Enfermería	2 camarotes de oficiales con baño	Puente de gobierno
Baño	Camarote de cocinero	1 camarote de oficial	
Cocina	6 cabinas para la tripulación	Lavandería	
Despensa	3 Camarote de conrmaestre con baño	Despensa	
Provisiones de comida seca, vegetales, pescado, carne etc.	1 baño para tripulantes.	Sala de Reuniones	
Comedor de tripulación.		3 Cabinas para la tripulación	
Comedor de oficiales.		2 Baños tripulantes	
Estación de co2			

Tabla No. 105. Distribución de casetas.

[Fuente: Elaboración Propia]

- Comedores para tripulación 13 pie²/hombre
- Servicio higiénico público. 75 pie²
- Camarote de tripulantes. 110 pie²
- Cocina 1.5m²/hombre
- Lavandería 3.5 pie²/hombre

- Guardarropa 3.5 pie²/hombre
- Bodega para alimentos refrigerados: 0.30 pie²/hombre/día de navegación
- Escaleras, [6]:
 - Angulo de la inclinación máximo desde la línea horizontal: 40°, 45°, 50°
 - Alto del escalón 23 cm, ancho del escalón
 - Alto del pasamano en las escaleras 94 cm
 - Ancho de la escalera si es para una persona 61 cm y para dos personas 91,5 cm, se escoge espacio de escaleras de 75 cm.
- Pasillos, [6]: Espacios para pasillos mínimo 71 cm en las habitaciones
- Material antideslizante: Se coloca material antideslizante en donde haya presencia de posible agua y aceite
- Puerta [6]
 - Esquinas de puertas deben ser redondeadas.
 - Distancia desde la cubierta inferior hasta la parte superior de la puerta mínimo 1,90 m y ancho aproximado de la puerta de 75 cm
- Rampas, [6]: Angulo máximo en la rampa de 15° y colocar en la superficie material antideslizante
- Callejón: 71 cm del ancho del callejón

Cabina de tripulación: 5,5 m²/ Por persona y mínimo 4,5 m²/POR PERSONA de espacio libre

Cabina de oficial: 7,5 m²

Espacio libre de una persona para movimiento dentro del baño debe de ser mínimo de 1.1 m²

ANEXO F – Arquitectura Naval – DP.

Condición de Máxima carga

Calado (m)	0,90	1,81	2,68	3,50	4,29	5,03
Desplazamiento (Ton)	500	1121	1742	2364	2985	3606
Volumen(m³)	488	1094	1700	2306	2912	3518
Lwl (m)	71,70	70,80	69,24	70,90	73,97	75,36
Sm (m²)	678,92	832,33	969,98	1099,69	1233,17	1363,93
Aw (m²)	637,95	686,73	716,35	753,04	791,78	827,80
CP	0,64	0,68	0,72	0,72	0,71	0,72
Cb	0,58	0,65	0,70	0,71	0,70	0,70
Cm	0,92	0,95	0,96	0,97	0,98	0,98
Cwp	0,69	0,74	0,78	0,81	0,81	0,83
LCB +proa (m)	4,17	3,77	3,26	2,75	2,23	1,69
LCF +proa (m)	3,89	2,88	1,83	0,81	-0,33	-1,30
KB (m)	0,49	0,97	1,43	1,86	2,29	2,70
KG (m)	5,12	5,12	5,12	5,12	5,12	5,12
BMt (m)	13,88	7,35	5,05	3,93	3,27	2,83
BML (m)	326,36	162,36	115,33	98,10	90,23	85,32
GMt (m)	9,25	3,21	1,36	0,68	0,44	0,41
GML (m)	321,73	158,21	111,63	94,84	87,40	82,90
KMt (m)	14,37	8,33	6,48	5,80	5,56	5,53
KML (m)	326,85	163,33	116,75	99,96	92,52	88,02
TPc (ton/cm)	6,54	7,04	7,34	7,72	8,12	8,49
MTc (ton.m)	21,33	23,52	25,79	29,73	34,59	39,64

Tabla No. 106. Cálculos hidrostáticos Máxima Carga – DP.

[Fuente: Elaboración Propia]

- Curvas y Datos hidrostáticas

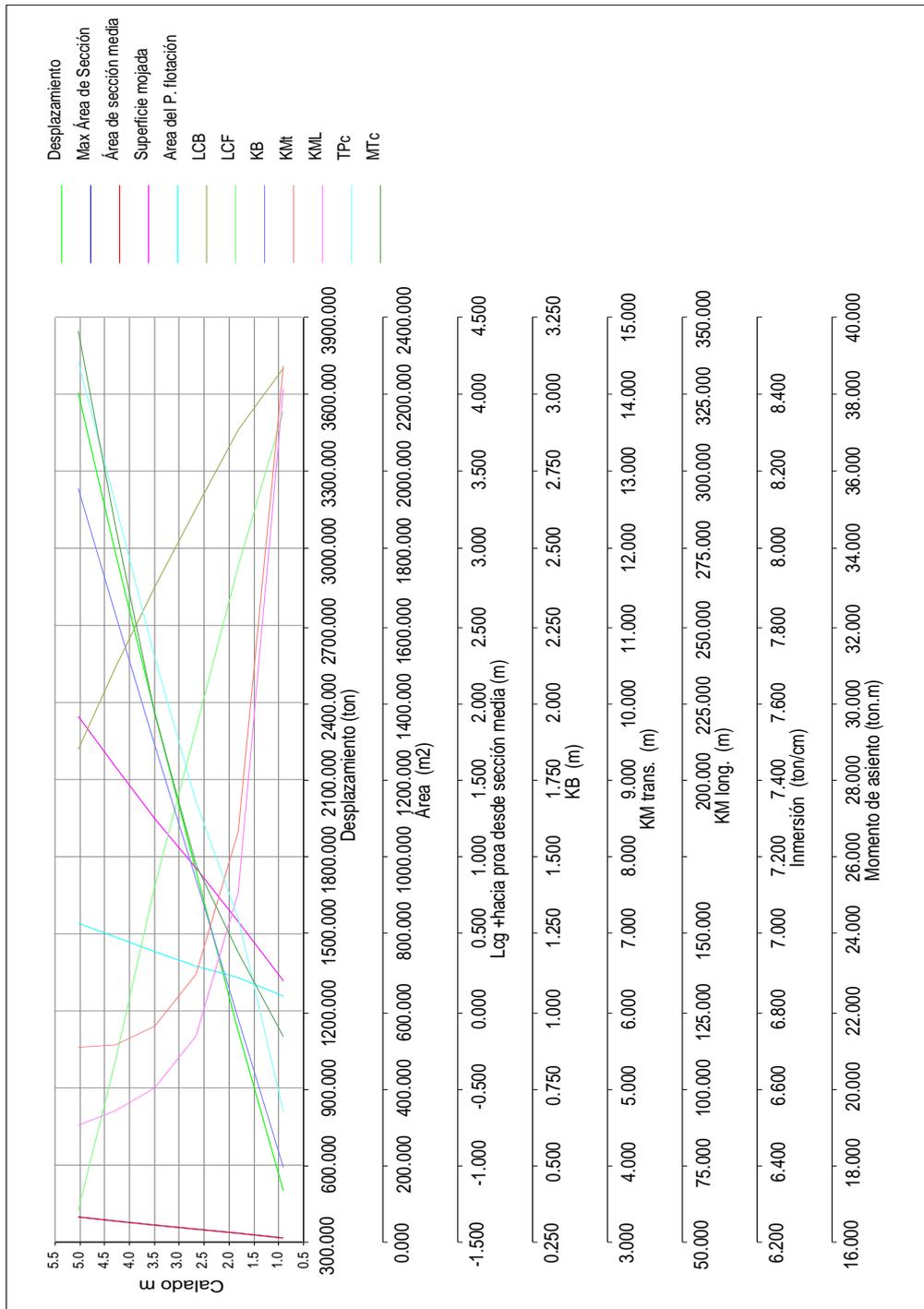


Figura No. E. 3 Curvas Cruzadas-Máxima Carga - DP.

[Fuente: Resultado del software Hydromax – Versión de prueba]

- Curva de Brazo Adrizante

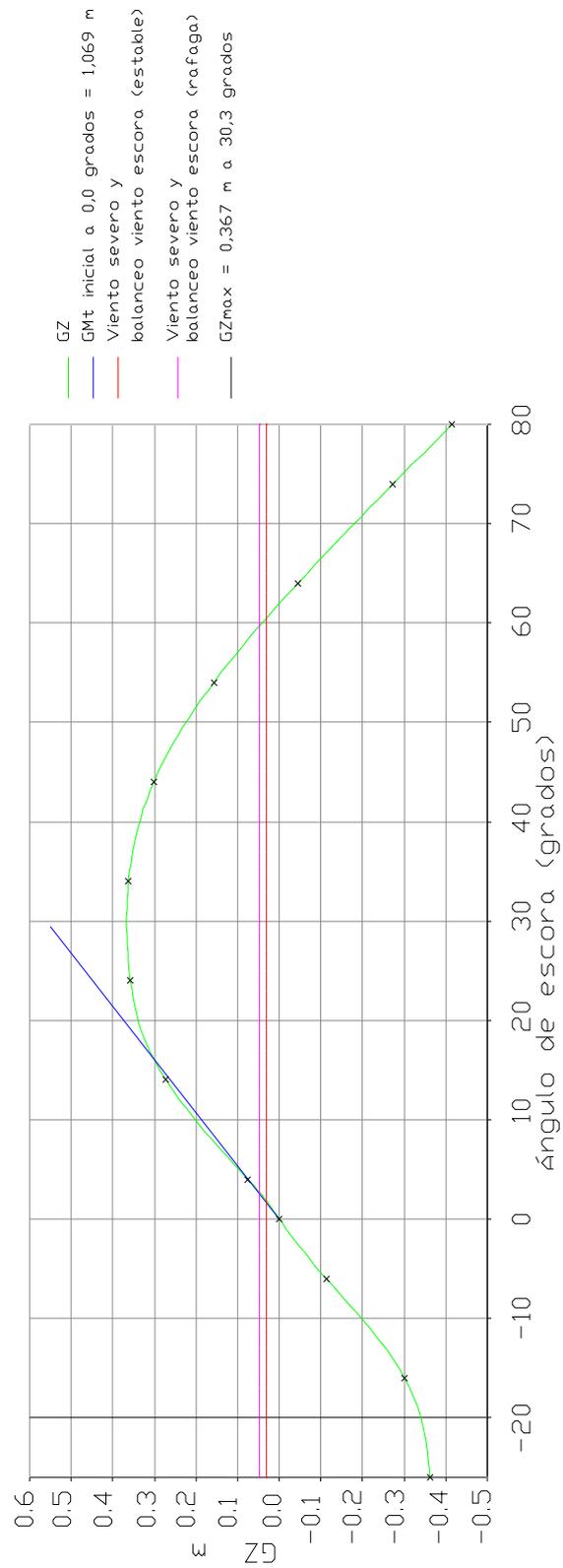


Figura No. E. 4 GZ vs θ Máxima Carga - DP.

[Fuente: Resultado del software Hydromax – Versión de prueba]

- Análisis de los criterios de estabilidad

Código	Criterio	Valor	Unidades	Valor actual	Estado	Margen%
267(85) Ch2 – Criterio General	2.2.1: Área bajo la curva de GZ, de 0 a 30	3,1513	m.grados	7,3019	Paso	+134.02
267(85) Ch2 - Criterio General	2.2.1: Área bajo la curva de GZ, de 0 a 40	5,1566	m.grados	10,9425	Paso	+112.2
267(85) Ch2 - General Criterio	2.2.1: Área bajo la curva de GZ, de 30 a 40	1,7189	m.grados	3,5678	Paso	107,56
267(85) Ch2 - Criterio General	2.2.2: Máximo GZ a 30 o mayor	0,2	m	0,367	Paso	83,5
267(85) Ch2 - Criterio General	2.2.3: Angulo de GZ	25	grados	28,2	Paso	12,73
267(85) Ch2 - Criterio General	2.2.4: GMt inicial	0,15	m	1,069	Paso	612,67
267(85) Ch2 - Criterio General	2.3: Viento severo y balanceo				Paso	
	Ángulo de escora constante no deberá ser superior a (\leq)	16	grados	1.8	Paso	+788.45
	Ángulo de escora constante /ángulo de inmersión del borde de cubierta, no deberá ser mayor que (\leq)	80	%	15.57	Paso	+80.58
	Area1 / Area2 no deberán ser menor a (\geq)	100	%	103.98	Paso	+3.98

Tabla No. 107. Análisis de estabilidad Máxima carga - DP.

[Fuente: Resultado del software Hydromax]

- Resultados de Criterio Meteorológico

Angulo de escora provocado por un viento constante	φ_1	22.8°
Angulo de escora provocado por un viento escorante	φ_0	1.8°
Angulo al que se produce la inundación descendente	φ_2	28°
Área 1	a	5.39 (m.grad)
Área 2	b	5.18 (m.grad)
Brazo escorante provocado por el viento	l_{w1}	0.032 m
Brazo escorante provocado por el viento	l_{w2}	0.048 m

Tabla No. 108. Criterio Meteorológico (Máxima Carga) - DP.

[Fuente: Elaboración Propia]

ANEXO G – Arquitectura Naval – DD.

A continuación, se presentan características de los modelos generados.

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6	Modelo 7	Modelo 8	Modelo 9	Modelo 10	Modelo 11	Modelo 12	Modelo 13
	76.64	81.341	71.54	76.664	83.277	72.357	77.829	82.674	71.977	77.374	83.167	72.276	78.458
lwl [m]	76.64	81.341	71.54	76.664	83.277	72.357	77.829	82.674	71.977	77.374	83.167	72.276	78.458
lpp [m]	74.34	78.90	69.40	74.36	80.78	70.19	75.49	80.19	69.82	75.05	80.67	70.11	76.10
Bwl [m]	13.20	15.76	15.74	15.75	11.97	11.97	11.97	13.86	13.86	13.86	15.74	15.74	15.74
Tproa [m]	5.07	4.22	4.81	4.49	5.38	6.11	5.72	4.73	5.38	5.33	4.11	4.67	4.33
Tpopa [m]	5.48	4.22	4.81	4.49	5.38	6.11	5.72	4.73	5.38	5.33	4.11	4.67	4.33
vol [m3]	3707.32	3707.32	3707.32	3707.32	3707.32	3707.32	3707.32	3707.32	3707.32	3707.32	3707.32	3707.32	3707.32
lcb	4.87E-03	1.64E-02	1.35E-02	1.50E-02	1.06E-02	6.76E-03	8.78E-03	3.25E-03	1.06E-02	3.48E-03	1.26E-02	8.83E-03	1.11E-02
Abt [m2]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hb [m]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cm	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99
Cwp	0.80	0.76	0.77	0.76	0.79	0.81	0.80	0.77	0.79	0.78	0.78	0.80	0.79
At [m2]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sapp [m2]	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38
C stern	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
V [knots]	12.33	12.33	12.33	12.33	12.33	12.33	12.33	12.33	12.33	12.33	12.33	12.33	12.33
Sumk2	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95
A proa [m2]	131.24	195.03	173.30	184.88	135.80	115.30	126.24	165.16	143.99	145.61	141.87	121.21	133.53
Kg buque[m]	4.40	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	3.67	3.67	3.67
Gm trans.[m]	1.01	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	0.84	0.84	0.84
Km trans. [m]	5.41	5.74	5.74	5.74	5.74	5.74	5.74	5.74	5.74	5.74	4.51	4.51	4.51
h [m]	13.50	13.50	13.50	13.50	13.50	13.50	13.50	13.50	13.50	13.50	13.50	13.50	13.50
P [kg/m2]	51.43	51.43	51.43	51.43	51.43	51.43	51.43	51.43	51.43	51.43	51.43	51.43	51.43
A [m2]	291.09	424.54	327.01	375.58	300.57	206.81	253.48	370.16	274.22	292.46	271.21	197.15	237.51
z [m]	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Ak [m2]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla No. 109. Datos de entrada de los prototipos - 1.

[Fuente: Elaboración Propia.]

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6	Modelo 7	Modelo 8	Modelo 9	Modelo 10	Modelo 11	Modelo 12	Modelo 13
Maniobrabilidad	DEL _R [°]	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00
	AB [m ²]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Dis [ton]	3800.00	3800.00	3800.00	3800.00	3800.00	3800.00	3800.00	3800.00	3800.00	3800.00	3800.00	3800.00
Estimación de la eficiencia propulsora	N motor [RP M]	900.00	900.00	900.00	900.00	900.00	900.00	900.00	900.00	900.00	900.00	900.00	900.00
	R reducción	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04
	Potencia [HP]	3390.00	3390.00	3390.00	3390.00	3390.00	3390.00	3390.00	3390.00	3390.00	3390.00	3390.00	3390.00
	Diámetro [m]	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30
Dimensiones principales (m)	Z	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
	H inmersión	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75
	L	78.00	84.91	73.39	79.15	84.91	73.39	79.15	84.91	73.39	79.15	84.91	73.39
	B	13.20	15.78	15.78	15.78	12.00	12.00	12.00	13.89	13.89	13.89	15.78	15.78
Carga en bodegas (Ton)	D	6.80	7.22	7.22	7.22	7.22	7.22	7.22	7.22	7.22	5.67	5.67	5.67
	BODEGA 1	630.04	630.04	630.04	630.04	630.04	630.04	630.04	630.04	630.04	630.04	630.04	630.04
	BODEGA 2	690.01	690.01	690.01	690.01	690.01	690.01	690.01	690.01	690.01	690.01	690.01	690.01
	BODEGA 3	379.20	379.20	379.20	379.20	379.20	379.20	379.20	379.20	379.20	379.20	379.20	379.20
	BODEGA 4	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Tabla No. 110. Datos de entrada de los prototipos - 2.

[Fuente: Elaboración Propia.]

	Modelo 14	Modelo 15	Modelo 16	Modelo 17	Modelo 18	Modelo 19	Modelo 20	Modelo 21	Modelo 22	Modelo 23	Modelo 24	Modelo 25	Modelo 26
	83.996	83.568	72.599	78.089	77.46	71.98	77.46	83.63	72.65	78.14	83.24	72.28	77.76
lwl [m]	81.48	81.06	70.42	75.75	75.14	69.82	75.14	81.12	70.47	75.80	80.74	70.11	75.43
lpp [m]	11.97	13.86	13.85	13.86	15.74	15.74	15.74	11.97	11.97	11.97	13.86	13.86	13.86
Bwl [m]	5.22	4.60	5.21	4.88	4.09	4.45	4.09	5.10	5.99	5.51	4.34	5.12	4.70
Tproa [m]	5.22	4.60	5.21	4.88	4.77	5.02	4.77	5.50	6.05	5.76	4.97	5.48	5.21
vol [m3]	3707.32	3707.32	3707.32	3707.32	3707.32	3707.32	3707.32	3707.32	3707.32	3707.32	3707.32	3707.32	3707.32
lcb	5.33E-03	3.22E-03	5.34E-03	7.41E-03	3.47E-03	3.74E-03	3.47E-03	3.22E-03	3.70E-03	3.44E-03	3.23E-03	3.72E-03	3.46E-03
Abt [m2]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hb [m]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cm	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99	0.98
Cwp	0.82	0.80	0.82	0.81	0.78	0.79	0.78	0.81	0.82	0.81	0.79	0.80	0.80
At [m2]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sapp [m2]	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38
C stern	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
V [knots]	12.33	12.33	12.33	12.33	12.33	12.33	12.33	12.33	12.33	12.33	12.33	12.33	12.33
Sumk2	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95
A proa [m2]	96.98	119.15	99.05	109.76	158.60	147.33	158.60	116.42	96.21	106.99	142.24	121.54	132.58
Kg buque[m]	3.67	3.67	3.67	3.67	4.17	4.17	4.17	4.17	4.17	4.17	4.17	4.17	4.17
Gm trans. [m]	0.84	0.84	0.84	0.84	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Km trans. [m]	4.51	4.51	4.51	4.51	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12
h [m]	13.50	13.50	13.50	13.50	13.50	13.50	13.50	13.50	13.50	13.50	13.50	13.50	13.50
P [kg/m2]	51.43	51.43	51.43	51.43	51.43	51.43	51.43	51.43	51.43	51.43	51.43	51.43	51.43
A [m2]	153.31	219.39	146.94	182.96	319.46	262.27	304.91	227.05	144.22	185.44	295.04	210.63	252.64
z [m]	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Ak [m2]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla No. 111. Datos de entrada de los prototipos - 3.

[Fuente: Elaboración Propia.]

	Modelo 14	Modelo 15	Modelo 16	Modelo 17	Modelo 18	Modelo 19	Modelo 20	Modelo 21	Modelo 22	Modelo 23	Modelo 24	Modelo 25	Modelo 26
Maniobrabilidad	DELR [°]	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00
	AB [mZ]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Dis [ton]	3800.00	3800.00	3800.00	3800.00	3800.00	3800.00	3800.00	3800.00	3800.00	3800.00	3800.00	3800.00
	N motor[RPM]	900.00	900.00	900.00	900.00	900.00	900.00	900.00	900.00	900.00	900.00	900.00	900.00
	R reducción	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04
Estimación de la eficiencia propulsora	Potencia [HP]	3390.00	3390.00	3390.00	3390.00	3390.00	3390.00	3390.00	3390.00	3390.00	3390.00	3390.00	3390.00
	Díámetro [m]	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30
	Z	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
	H inmersión	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75
Dimensiones principales (m)	L	84.91	84.91	73.39	79.15	73.39	79.15	84.91	73.39	79.15	84.91	73.39	79.15
	B	12.00	13.89	13.89	13.89	15.78	15.78	12.00	12.00	12.00	13.89	13.89	13.89
	D	5.67	5.67	5.67	5.67	6.45	6.45	6.45	6.45	6.45	6.45	6.45	6.45
Carga en bodegas (Ton)	BODEGA 1	730.04	730.04	730.04	730.04	730.04	730.04	730.04	730.04	730.04	730.04	730.04	730.04
	BODEGA 2	740.01	740.01	740.01	740.01	740.01	740.01	740.01	740.01	740.01	740.01	740.01	740.01
	BODEGA 3	413.42	413.42	413.42	413.42	413.42	413.42	413.42	413.42	413.42	413.42	413.42	413.42
	BODEGA 4	360.20	360.20	360.20	360.20	360.20	360.20	360.20	360.20	360.20	360.20	360.20	360.20

Tabla No. 112. Datos de entrada de los prototipos - 4.

[Fuente: Elaboración Propia.]

Prototipo	0°	5 °	10 °	15 °	20 °	25 °	30 °	35 °	40 °
1	0	0,47	0,94	1,41	1,83	2,20	2,55	2,87	3,15
2	0	0,58	1,17	1,76	2,37	2,96	3,46	3,86	4,17
3	0	0,57	1,14	1,72	2,29	2,80	3,24	3,62	3,93
4	0	0,57	1,15	1,74	2,33	2,89	3,36	3,75	4,06
5	0	0,43	0,86	1,29	1,72	2,11	2,47	2,80	3,11
6	0	0,45	0,89	1,31	1,69	2,05	2,38	2,69	2,98
7	0	0,44	0,87	1,31	1,72	2,08	2,43	2,75	3,05
8	0	0,49	0,98	1,48	1,98	2,47	2,90	3,28	3,60
9	0	0,49	0,99	1,48	1,95	2,36	2,74	3,09	3,40
10	0	0,49	0,98	1,48	1,97	2,42	2,82	3,19	3,51
11	0	0,60	1,20	1,78	2,24	2,65	2,98	3,25	3,46
12	0	0,59	1,15	1,59	1,98	2,32	2,61	2,86	3,07
13	0	0,59	1,19	1,71	2,14	2,51	2,83	3,10	3,30
14	0	0,44	0,80	1,13	1,44	1,73	1,99	2,22	2,43
15	0	0,50	1,00	1,43	1,80	2,13	2,43	2,69	2,91
16	0	0,50	0,89	1,24	1,57	1,86	2,12	2,35	2,56
17	0	0,50	0,97	1,35	1,70	2,01	2,28	2,53	2,75
18	0	0,59	1,18	1,79	2,37	2,87	3,28	3,62	3,87
19	0	0,58	1,15	1,72	2,20	2,62	3,00	3,31	3,57
20	0	0,58	1,17	1,76	2,29	2,75	3,15	3,47	3,73
21	0	0,43	0,87	1,28	1,64	1,97	2,28	2,57	2,83
22	0	0,45	0,83	1,18	1,52	1,83	2,12	2,39	2,63
23	0	0,44	0,87	1,24	1,59	1,91	2,21	2,49	2,74
24	0	0,50	0,99	1,49	1,95	2,36	2,72	3,04	3,31
25	0	0,50	1,00	1,43	1,82	2,17	2,50	2,79	3,05
26	0	0,50	0,99	1,48	1,90	2,27	2,62	2,92	3,19

Tabla No. 113. Valores KN de los prototipos.

[Fuente: Elaboración Propia.]

ANEXO H – Escantillonado – DD

Formulaciones programadas en Matlab presentadas por la Sociedad de Clasificación, [10], para determinar:

Espesores de panel

	Espesores (mm)		
	Fondo	Cubierta	Costado
Espesor mínimo (mm)	$t = 5 + 0.04L + t_k$	$t = 5 + 0.02L + t_k$	$t = 5 + kL + t_k$
Espesor de paneles (mm)	$t = 1.9n_f s \sqrt{Pk} + t_k$	$t = 1.9n_f s \sqrt{Pk} + t_k$	$t = 1.9n_f s \sqrt{Pk} + t_k$

	Espesores (mm)
Doble Fondo	$t = 1.1s\sqrt{pk} + t_k$
Varengas	$t = t_m - 2\sqrt{K}$
Vagras	$t = \frac{h^2}{120h_a}$
Quila	$t_m = \frac{h}{h_a} \left(\frac{h}{100} + 1 \right) \sqrt{K}$

Tabla No. 114. Espesores mínimos requeridos por la Sociedad de Clasificación.

[Fuente: Elaboración Propia.]

Donde:

h = Altura de la quilla [mm].

h_a = Altura de la quilla diseñada.

p = Presión de diseño según el área de diseño (KN/m²).

L = eslora según la regla m.

t_k = 1.5 mm, adición por corrosión

Módulo seccional

Descripción		Módulo Seccional cm^3		
MS cm^3	Ref. Transversales	$Z = 0.63l^2 spw_k$	$Z = \frac{83l^2 spw_k}{\sigma}$	$Z = 0.5l^2 spw_k$
	Ref. Longitudinales	$Z = \frac{83l^2 spw_k}{\sigma}$	$Z = \frac{83l^2 spw_k}{\sigma}$	$Z = \frac{83l^2 spw_k}{\sigma}$
MS cm^3	Bulárcamas	$Z = \frac{100l^2 spw_k}{\sigma}$	$Z = 0.63l^2 spw_k$	$Z = 0.5l^2 spw_k$ $Z = 6.5\sqrt{L}$
	Elementos primarios	$Z = \frac{100l^2 spw_k}{\sigma}$	$Z = \frac{100S^2 bpw_k}{\sigma}$	$Z = \frac{100S^2 bpw_k}{\sigma}$

Tabla No. 115. Formulaciones para el cálculo del módulo seccional.

[Fuente: Elaboración Propia.]

Donde:

l = longitud no soportada, m,

s = Espaciamiento entre refuerzos, m

$$Z_B = 1.549 m^3$$

$$Z_D = 0.842 m^3$$

$$Z_R = 0.674 m^3$$

$n_f = 0.83$, depende del tipo de cuadernaje.

$k = 1$, para $R_{eH} = 235 \frac{N}{\text{mm}^2}$, esfuerzo de fluencia

k_a = factor de corrección = $(1,1 - 0,25 s/l)^2$

= máximo 1 para $s/l = 0,4$

= mínimo 0, 72 para $s/l = 1,0$

σ = esfuerzo permitido, N/mm²

wk = factor de corrosión en tanques

b = longitud de paneles, m,

S = longitud no soportada de vigas m.

Presiones de Diseño

Descripción	Presiones $\left[\frac{\text{KN}}{\text{m}^2}\right]$
Presión en el fondo	$p_B = 10T + p_0 c_F$
Presión el costado bajo la línea de flotación	$P_S = 10(T - z) + P_0 c_F \left(1 + \frac{z}{T}\right)$
Presión el costado sobre la línea de flotación	$P_S = P_0 c_F \frac{20}{10 + z - T}$
Presión en cubierta	$p_D = p_0 \frac{20T}{(10 + z - T)H} c_D$
Presión en doble fondo	$P_I = 9.81 \frac{G}{V} h(1 + a_v)$

Tabla No. 116. Formulaciones para el cálculo del módulo seccional.

[Fuente: Elaboración Propia.]

Donde:

T= Calado [m]

$P_0 = 2.1(C_B + 0.7)c_0 c_L f$ Presión dinámica externa [kN / mm²],

$c_0 = \left[\frac{L}{25} + 4.1\right] c_{RW}$, coeficiente de ola.

$c_{RW} = 1$; servicio sin restricción.

$c_L = \sqrt{\frac{L}{90}}$, Coeficiente de eslora.

f = 1.00;

c_F = Factor de distribución.

G = Carga total en bodegas, Ton

V = Volumen en bodegas, [m³]

h = Distancia desde el doble fondo hasta el punto más alto de la carga, [m],
asumiendo la bodega totalmente llena

a_v = Aceleración adicional

Frecuencia Natural

Descripción	Frecuencias [Hz]
Frecuencia de paneles (f_i)	$f_n = 5.5375 \frac{t}{ab} \sqrt{\left(\frac{b}{a}\right)^2 + \left(\frac{a}{b}\right)^2 + 0.6045}$
Frecuencia de refuerzos (f_i)	$f_i = \frac{K_i}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{m \left(1 + \frac{\pi^2 EI}{L^2 GA}\right)}}$

K _i	1	2	3	4	5
Modo de vibración	22.4	61.7	121.0	200.0	299.0

Tabla No. 117. Formulaciones para el cálculo de la frecuencia natural.

[Fuente: Elaboración Propia.]

Donde:

- a Longitud del panel (m)
- b ancho del panel (m)
- t espesor del panel (mm)

K_i : Constante según el modo de vibración.

EI = rigidez flexural, combinación entre el panel y el refuerzo

L = longitud de la viga

GA = Rigidez al corte, combinación entre el panel y el refuerzo

A : área seccional con plancha asociada.

m = masa por unidad de longitud del refuerzo asociado a la plancha

En caso de que el elemento se encuentre por debajo de la línea de flotación deberá multiplicarse el valor calculado por el parámetro Ψ , obtenido a partir de la siguiente formulación:

$$f_{agua} = f_i \Psi$$

$$\Psi = \sqrt{\frac{p}{p + \frac{\rho_l}{\rho_p}}}; \quad p = \pi t \sqrt{\left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}\right)}$$

Donde:

ρ_l = densidad del liquido

ρ_p = Densidad de la plancha

t = espesor del panel

Criterio de Pandeo según las Sociedad Clasificadora, [22].

ITEMS	RATIO	MATERIAL (R_{eff})						
		235		315		355 and 390		
		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	
Bottom and deck plates	s / t	56,0	65,0	51,0	60,0	49,0	55,0	
Longitudinals	flat bar web	h_w / t_w	20,0	20,0	18,0	19,0	17,5	18,0
Flanged longitudinals / girders	web	h_w / t_w	56,0	65,0	51,0	60,0	49,0	55,0
Flanged longitudinals / girders	symmetrical flange	b_f / t_f	34,0	40,0	30,0	38,0	29,0	36,0
Flanged longitudinals / girders	asymmetrical flange	b_f / t_f	17,0	20,0	15,0	19,0	14,5	18,0
Symbols: R_{eff} : minimum yield stress of the material, in N/mm ² ; s : longitudinal spacing, in mm; t : actual plate thickness, in mm; h_w : web height, in mm; t_w : web thickness, in mm; t_f : flange thickness, in mm; b_f : flange breadth, in mm;								
(1) Applicable to ships contracted for construction on or after 1 June 2000								
(2) Applicable to ships contracted for construction before 1 June 2000								

Tabla No. 118. Formulaciones para el cálculo de pandeo le refuerzos.

[Fuente: [22]..]

ANEXO I – Formulaciones empleadas para el cálculo del bulbo.

Para estimar el coeficiente de sección transversal S_{a20} se ha utilizado el rango recomendado por Alvariño para este tipo de embarcación, dicho rango está entre valores de 0.09 a 0.12.

$$S_{a20} = \frac{S_{c20}}{A_{MS}} \Rightarrow S_{c20} = S_{a20} \times A_{SM}$$

$$A_{SM} = C_m B T sm$$

Se ha calculado la máxima protuberancia (la distancia longitudinal X), en base a las formulaciones presentadas por [4]. Para esto se requiere ingresar el coeficiente de longitud de bulbo (C_{LPR}) y la eslora entre perpendiculares (L_{PP}) 70.14 [m].

$$C_{LPR} = \frac{X}{L_{PP}} ; \text{ siendo } X = L_{PP} * C_{LPR}$$

Debido a que se ha considerado que este bulbo este bajo la condición de lastre y carga. El C_{LPR} es igual a:

$$C_{LPR} = 0.2642 C_B \frac{B}{L_{PP}} + 0.0046$$

$$X = \left(0.2642 C_B \frac{B}{L_{PP}} - 0.0046 \right) L_{PP}$$

$$X = 2.04 [m].$$

Para estimar la manga del bulbo (b) se ha calculado un coeficiente (C_{bb}) que depende del coeficiente bloque. Por lo tanto para un coeficiente bloque de 0.684 [35] recomienda un valor de C_{bb} igual a 0.1554.

$$b = C_{bb} * B$$

Para estimar la altura de mayor protuberancia se ha implementado un código de Matlab que bosqueje esta altura h entre el 35% y 55% del calado de proa.

$$35\% T_{fwd} \leq h [m] \leq 55\% T_{fwd}$$

ANEXO J – Formulaciones propuestas por ITTC.

Aquí el sufijo M representa los datos del modelo mientras que S los de la embarcación. Por lo tanto para el Modelo se tiene:

$$C_{TM} = \frac{R_{TM}}{\frac{1}{2}\rho S V^2}$$

$$C_R = C_{TM} - C_{FM}(1 + k)$$

Para el buque:

El coeficiente de resistencia total sin quillas de balance y apéndices como el timón, eje, etc., es:

$$C_{TS} = C_{FS}(1 + k) + C_R + \Delta C_F + C_{AA}$$

-1+k Es el factor de forma, que será estimado con la formulación presentada por [19].

- C_{FS} Es el coeficiente friccional del buque acorde a [36].

$$\frac{0.075}{(\text{LOG}_{10}(Rn) - 2)^2}$$

- C_R Es el coeficiente residual calculado a partir del coeficiente friccional C_{FM} y C_{TM} total de la prueba de modelo.

$$C_R = C_{TM} - C_{FM}(1 + k)$$

- ΔC_F Es la rugosidad permitida.

$$\Delta C_F = \left[105 * \left(\frac{k_s}{L_{WL}} \right)^{\frac{1}{3}} - 0.64 \right] 10^{-3}$$

Donde la rugosidad $k_s = 150 \cdot 10^{-6}$ m y,

- ΔC_{AA} Es la resistencia de aire.

$$C_{AA} = 0.001 * \frac{A_T}{S}$$

ANEXO K – Resultados de Resistencia al avance utilizando CFD

- Líneas y flujo de corriente para el modelo sin y con bulbo

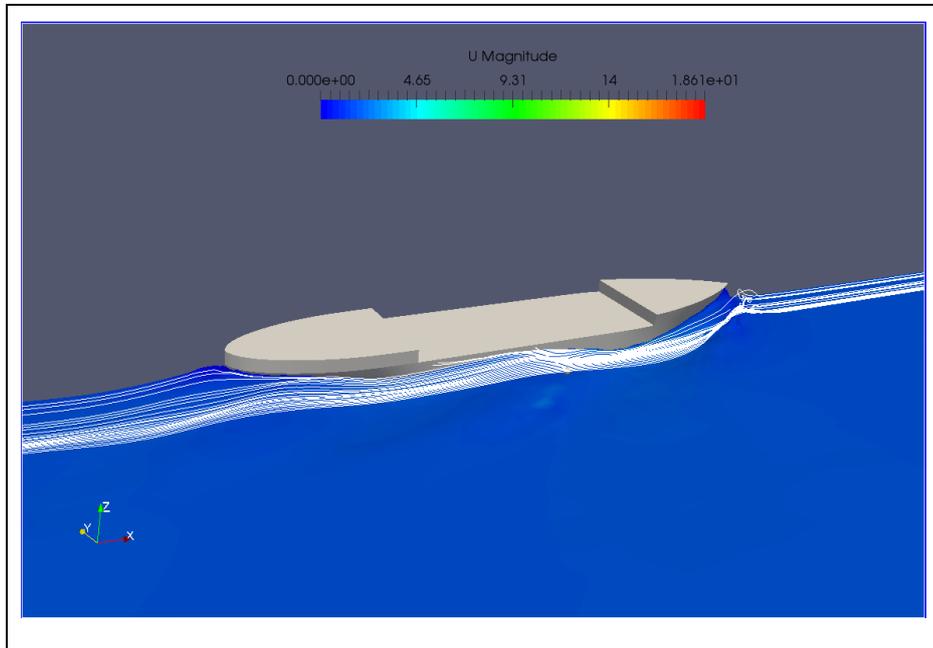


Figura No. K. 1 Líneas de corriente alrededor del casco sin Bulbo.

[Fuente: Elaboración propia.]

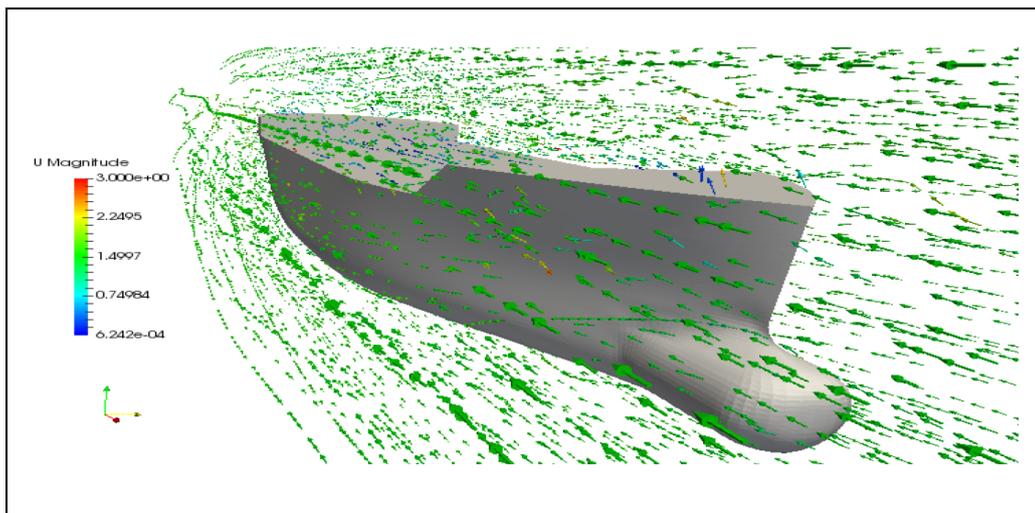


Figura No. K. 2 Flujo de Corriente para el modelo con bulbo (1.524 m/s).

[Fuente: Software OpenFoam.]

- Patrón de ola para el modelo sin y con bulbo - Maxsurf

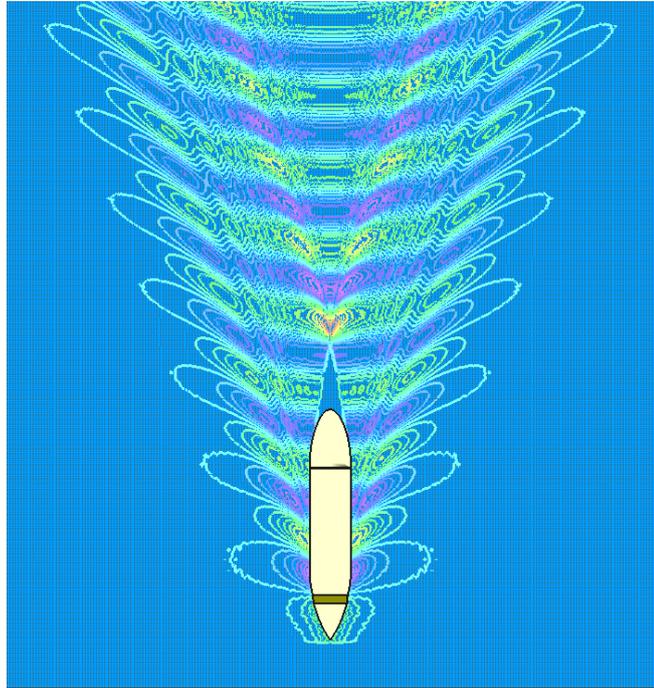


Figura No. K. 3 Patrón de ola para el modelo con bulbo (1.524 m/s) -Maxsurf

[Fuente: Software Maxsurf.]

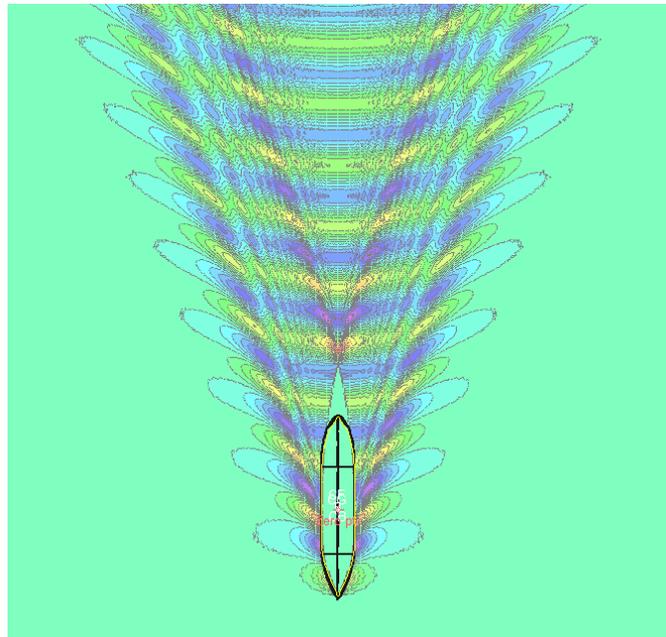


Figura No. K. 4 Patrón de ola para el modelo sin bulbo (1.524 m/s) -Maxsurf

[Fuente: Software Maxsurf.]

ANEXO L – Planos del diseño definitivo

- Líneas de Formas del diseño definitivo.

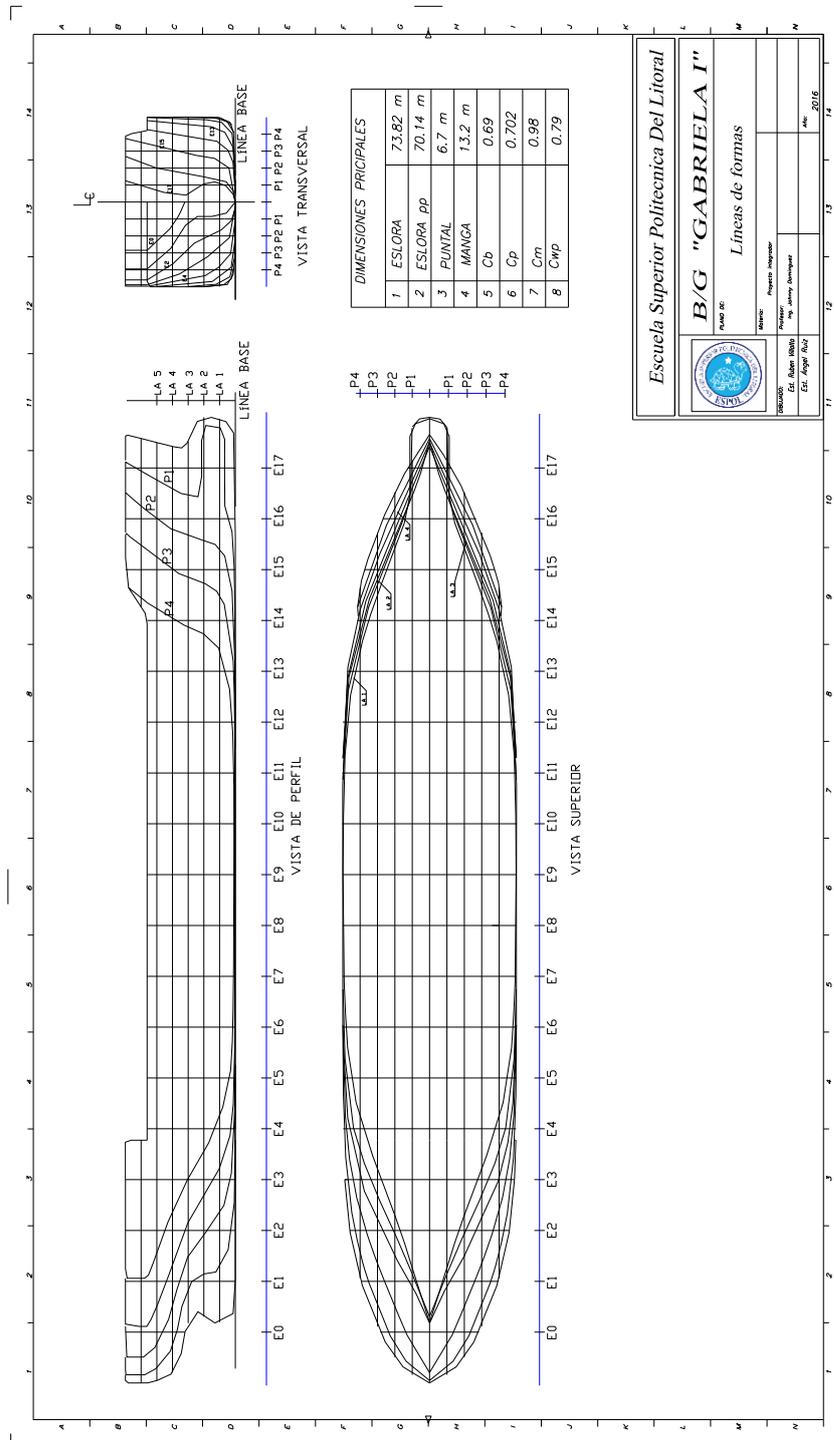


Figura No. L. 1 Formas finales del buque.

[Fuente: Elaboración propia.]

- Distribución general del diseño definitivo.

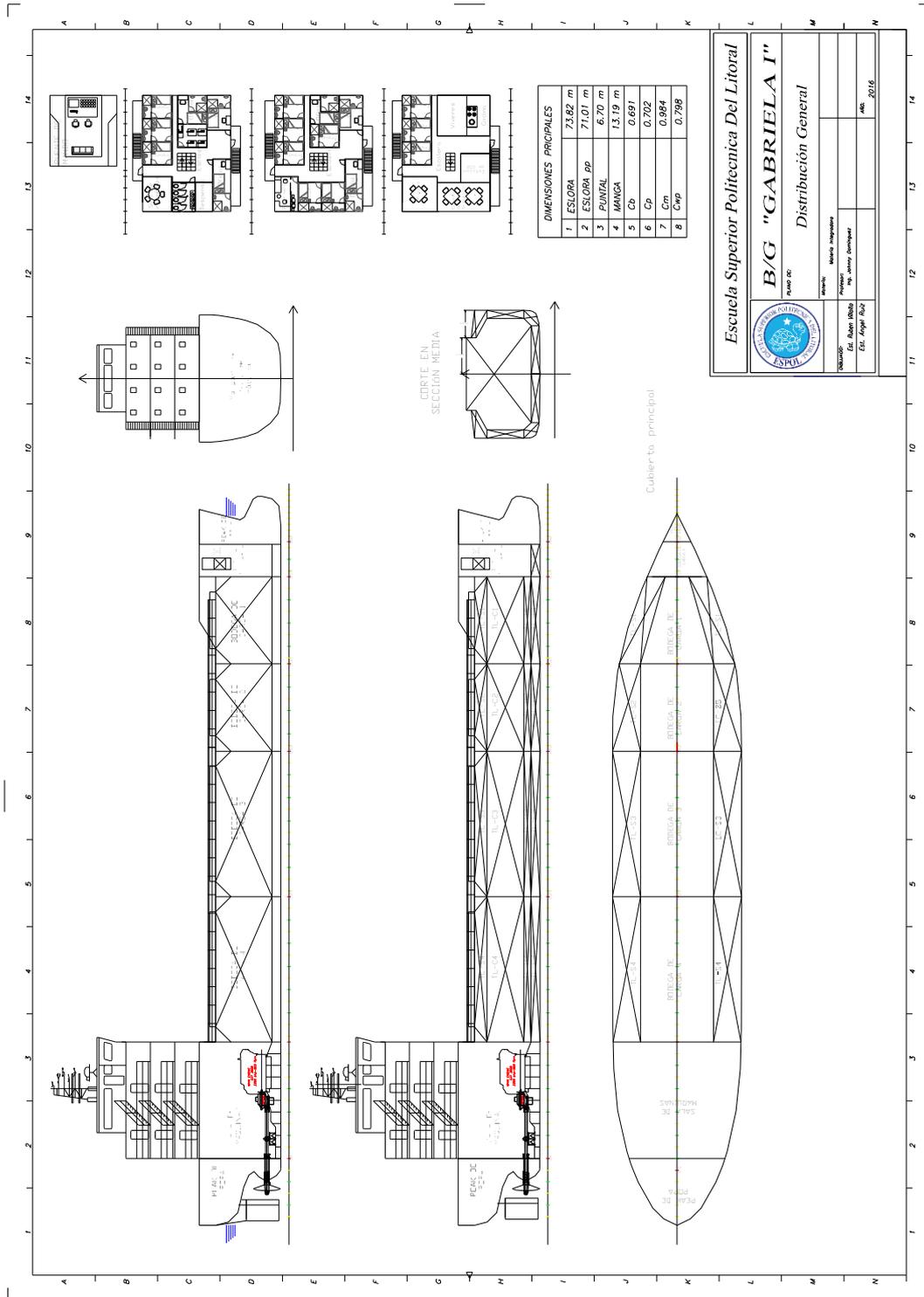


Figura No. L. 2 Distribución General del buque.

[Fuente: Elaboración propia.]

ANEXO M – Maniobrabilidad – Diseño definitivo

Modelo para matemático para predecir la Maniobrabilidad

$$X' = (m' + m'_x) \left(\frac{L}{U} \right) \left(\frac{\dot{U} \cos \beta}{U} - \dot{\beta} \sin \beta \right) + (m' + m'_y) r' \sin \beta$$

$$Y' = -(m' + m'_y) \left(\frac{L}{U} \right) \left(\frac{\dot{U} \sin \beta}{U} + \dot{\beta} \cos \beta \right) + (m' + m'_x) r' \cos \beta$$

$$N' = -(I'_{zz} + i'_{zz}) \left(\frac{L}{U} \right)^2 (\dot{U} r' + U \dot{r}')$$

Donde:

β	Es el Angulo de deriva
r	La velocidad de giro o guiñada.
$I_{zz}; i_{zz}$	Son los momentos de masa de inercia en ambos sistemas de referencia
$m; m_x; m_y$	Son la masa del buque, la masa añadida del buque en el eje x y la masa añadida del buque en el eje y.
L	Eslora entre perpendiculares

Todos estos términos son adimensionales con las características del buque como: Eslora (L), calado (T) densidad del fluido (ρ) y además su velocidad (U), tal como se muestra a continuación:

$$m' = \frac{m}{0.5\rho L^2 T} \quad m'_x = \frac{m_x}{0.5\rho L^2 T}$$

$$m'_y = \frac{m_y}{0.5\rho L^2 T} \quad I'_{zz} = \frac{I_{zz}}{0.5\rho L^4 T}$$

$$i'_{zz} = \frac{i_{zz}}{0.5\rho L^4 T} \quad X' = \frac{X}{0.5\rho L T U^2}$$

$$Y' = \frac{Y}{0.5\rho L T U^2}$$

$$N' = \frac{N}{0.5\rho L^2 T U^2}$$

$$r' = \frac{rL}{U}$$

Componentes de Y_R y N_R .

$$Y'_R = -(1 + a_H)F'_N \cos \delta$$

$$N'_R = -(x'_R + a_R x'_H)F'_N \cos \delta$$

$$F'_N = -\left(\frac{A_R}{LT}\right) C_N \left(\frac{U_R}{U}\right)^2 \sin(\delta - \gamma(\beta - 2x_R r))$$

$$C_N = 6.13 \left(\frac{K_R}{K_R + 2.25}\right)$$

$$\gamma = -22.2 \left(\frac{CbB}{L}\right)^2 + 0.02 \left(\frac{CbB}{L}\right) + 0.68$$

Donde:

F'_N	Es la fuerza actuando sobre el timón (adimensional)
A_R y K_R	Área del timón y la relación de aspecto del timón.
U_R	La velocidad del flujo interno del timón.
x'_R	Distancia entre el centro de gravedad del buque y el centro de la fuerza lateral (adimensional).
x'_H	Distancia entre el centro de gravedad del buque y el centro de la fuerza adicional lateral (adimensional).
a_H	Razón de la fuerza adicional lateral.
γ	Factor de flujo de enderezamiento.

Los coeficientes x'_H y x'_R han sido tomados de las siguientes figuras.

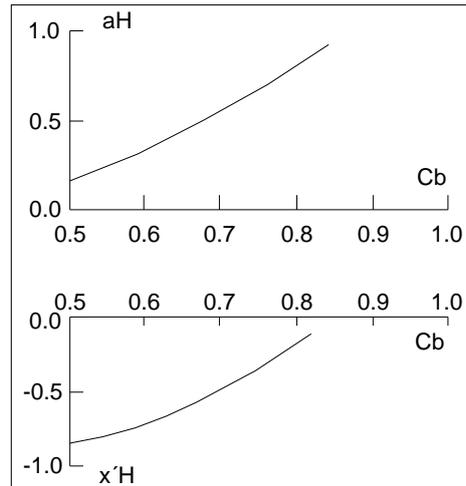


Figura No. M. 1 Coeficientes del timón en función del coeficiente bloque.

[Fuente: [37]]

Componentes de Y_H y N_H .

$$Y_r = m_1 - 1.5sC_B$$

$$Y_\beta = \frac{1}{2}\pi k + 1.4sC_B$$

$$Y_{\beta_{rr}} = 2.97\frac{k}{s}(1 - C_B)$$

$$Y_{\beta\beta} = 1.25\frac{k}{s}(1 - C_B) + 0.5$$

$$Y_{rr} = 0.17\frac{k}{s}C_B - 0.07$$

$$Y_{\beta\beta_r} = 0.75\frac{k}{s}C_B - 0.65$$

$$N_r = -0.54k + k^2$$

$$N_\beta = -k$$

$$N_{\beta\beta} = -0.48\frac{k}{s}(1 - C_B) + 0.66$$

$$N_{rr} = 0.5sC_B - 0.09$$

$$N_{\beta_{rr}} = -0.25 \frac{k}{s} C_B + 0.05$$

$$N_{\beta\beta_r} = -57.5(sC_B)^2 + 18.4sC_B - 1.6$$

Donde:

$$s = \frac{B}{L}$$

$$k = \frac{2T}{L} \quad \text{Razón de aspecto}$$

$$C_B = \frac{V}{LTB} \quad \text{Coeficiente bloque}$$

$$m_1 = 2sC_B(1 + k) \quad \text{Coeficiente de masa.}$$

Componentes de K y T para el método lineal y no lineal

$$T_1 = \frac{(Y_{\dot{v}} - m)(N_r - mx_G U) + (N_{\dot{r}} - I_{zz})Y_v}{Y_v(N_r - mx_G U)N_v(Y_r - mU)}$$

$$T_2 = \frac{-(Y_r - mx_G)N_v - (N_{\dot{v}} - mx_G)(Y_r - mU)}{Y_v(N_r - mx_G U) - N_v(Y_r - mU)}$$

$$T_3 = \frac{(N_{\dot{v}} - mx_G)Y_{\delta} - (Y_{\dot{v}} - m)N_{\delta}}{N_v Y_{\delta} - Y_v N_{\delta}}$$

$$K = \frac{N_v Y_{\delta} - Y_v N_{\delta}}{Y_v(N_r - mx_G U) - N_v(Y_r - mU)}$$

$$Y_r = N_{\dot{v}} = 0.0$$

$$Y_r = m_1 - 1.5sC_B$$

$$Y_v = -0.5\pi k + 1.4sC_B$$

$$Y_{\dot{v}} = m - m_2$$

$$Y_{\delta} = -(1 + a_H)F'_N$$

$$N_v = -k$$

$$N_{\dot{r}} = I_{zz} - I$$

$$N_{\delta} = -(x_R + a_H x_H) F'_N$$

$$N_r = -0.54k + k^2$$

$$m_i = 2sC_B(1 + \lambda_i), \quad i = 1, 2 \quad \lambda_1 = k \quad \lambda_2 = \frac{k}{s} \left(1 - \frac{s}{2}\right)$$

$$I = \left(\frac{1}{8}\right) sC_B(1 + \lambda_6) \quad \lambda_6 = \frac{k}{s}(1 - 1.6s)$$

ANEXO N – Validación estructural

- Plano estructural de la bulárcama ubicada en la sala de maquinas

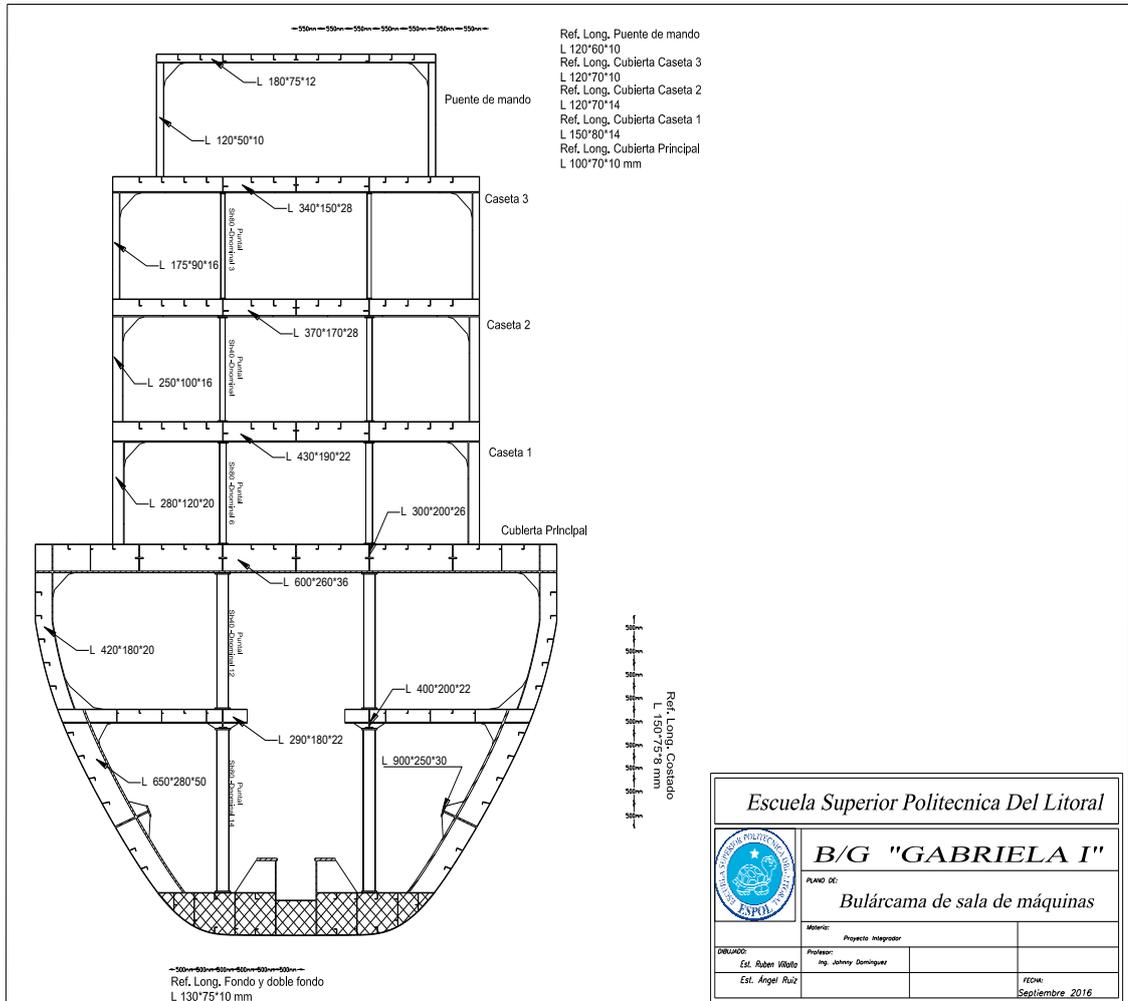


Figura No. N. 1 Plano estructural de Bulárcama en sala de máquina.

[Fuente: Elaboración propia.]

ANEXO O – Análisis económico

Detalle del flujo de caja

FLUJO DE EFECTIVO PROYECTADO									
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Inversión Inicial	\$-9.598.171,70								
Ingresos		\$3.809.280,00	\$3.923.558,40	\$4.041.265,15	\$4.162.503,11	\$ 4.287.378,20	\$ 4.415.999,55	\$ 4.548.479,53	\$ 4.684.933,92
(-)COSTO MARGINAL		\$3.809.280,00	\$3.923.558,40	\$4.041.265,15	\$4.162.503,11	\$ 4.287.378,20	\$ 4.415.999,55	\$ 4.548.479,53	\$ 4.684.933,92
(-) GASTOS OPERACIONALES									
Gastos Operacionales		\$ 450.150,88	\$ 456.124,83	\$ 462.220,65	\$ 468.440,87	\$ 474.788,03	\$ 481.264,76	\$ 487.873,73	\$ 494.617,66
TOTAL GASTOS OPERACIONALES		\$ 450.150,88	\$ 456.124,83	\$ 462.220,65	\$ 468.440,87	\$ 474.788,03	\$ 481.264,76	\$ 487.873,73	\$ 494.617,66
UTILIDAD OPERACIONAL		\$3.359.129,12	\$3.467.433,57	\$3.579.044,50	\$3.694.062,24	\$ 3.812.590,17	\$ 3.934.734,78	\$ 4.060.605,80	\$ 4.190.316,26
(-) DIVIDENDO TOTAL		\$ 330.651,78	\$ 330.651,78	\$ 330.651,78	\$ 330.651,78	\$ 330.651,78	\$ 358.206,09	\$ 330.651,78	\$ 330.651,78
UJATI		\$3.028.477,34	\$3.136.781,80	\$3.248.392,72	\$3.363.410,46	\$ 3.481.938,39	\$ 3.576.528,69	\$ 3.729.954,02	\$ 3.859.664,48
Pago de Dividendos			\$ 557.911,45	\$ 574.183,40	\$ 590.733,77	\$ 607.543,68	\$ 624.590,24	\$ 638.885,21	\$ 658.908,67
Pago Impuesto a la Renta			\$ 715.271,09	\$ 736.132,57	\$ 757.350,99	\$ 778.902,15	\$ 800.756,72	\$ 819.083,61	\$ 844.754,70
(=) EFECTIVO NETO		\$3.028.477,34	\$1.863.599,26	\$1.938.076,75	\$2.015.325,70	\$ 2.095.492,56	\$ 2.151.181,72	\$ 2.271.985,21	\$ 2.356.001,12
Préstamo	\$ 1.933.772,84								
Aporte Accionistas	\$ 7.735.091,36								
(-) FLUJO NETO	\$ 70.692,50	\$3.028.477,34	\$1.863.599,26	\$1.938.076,75	\$2.015.325,70	\$ 2.095.492,56	\$ 2.151.181,72	\$ 2.271.985,21	\$ 2.356.001,12
(+) Saldo inicial	\$ -	\$ 70.692,50	\$3.099.169,84	\$4.962.769,10	\$6.900.845,86	\$ 8.916.171,56	\$11.011.664,12	\$13.162.845,84	\$15.434.831,04
FLUJO ACUMULADO	\$ 70.692,50	\$3.099.169,84	\$4.962.769,10	\$6.900.845,86	\$8.916.171,56	\$11.011.664,12	\$13.162.845,84	\$15.434.831,04	\$17.790.832,16
Flujo Neto	\$-9.668.864,20	\$3.028.477,34	\$1.863.599,26	\$1.938.076,75	\$2.015.325,70	\$ 2.095.492,56	\$ 2.151.181,72	\$ 2.271.985,21	\$ 2.356.001,12

Tabla No. 119. Flujo de Caja-(a)

[Fuente: Elaboración Propia.]

FLUJO DE EFECTIVO PROYECTADO											
	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17		
Inversion Inicial											
Ingresos	\$ 4.825.481,94	\$ 4.970.246,39	\$ 5.119.353,79	\$ 5.272.934,40	\$ 5.431.122,43	\$ 5.594.056,10	\$ 5.761.877,79	\$ 5.934.734,12	\$ 6.112.776,14		
(-) COSTO MARGINAL	\$ 4.825.481,94	\$ 4.970.246,39	\$ 5.119.353,79	\$ 5.272.934,40	\$ 5.431.122,43	\$ 5.594.056,10	\$ 5.761.877,79	\$ 5.934.734,12	\$ 6.112.776,14		
(-) GASTOS OPERACIONALES											
Gastos Operacionales	\$ 501.499,33	\$ 508.521,59	\$ 515.687,33	\$ 522.999,52	\$ 530.461,18	\$ 538.075,40	\$ 545.845,32	\$ 553.774,16	\$ 561.865,21		
TOTAL GASTOS OPERACIONALES	\$ 501.499,33	\$ 508.521,59	\$ 515.687,33	\$ 522.999,52	\$ 530.461,18	\$ 538.075,40	\$ 545.845,32	\$ 553.774,16	\$ 561.865,21		
UTILIDAD OPERACIONAL	\$ 4.323.982,60	\$ 4.461.724,80	\$ 4.603.666,45	\$ 4.749.934,88	\$ 4.900.661,25	\$ 5.055.980,71	\$ 5.216.032,47	\$ 5.380.959,96	\$ 5.550.910,93		
(-) DIVIDENDO TOTAL	\$ 330.651,78	\$ 303.097,46	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -		
UATI	\$ 3.993.330,83	\$ 4.158.627,34	\$ 4.603.666,45	\$ 4.749.934,88	\$ 4.900.661,25	\$ 5.055.980,71	\$ 5.216.032,47	\$ 5.380.959,96	\$ 5.550.910,93		
Pago de Dividendos	\$ 676.433,23	\$ 694.045,23	\$ 716.432,91	\$ 789.989,16	\$ 815.088,82	\$ 840.953,47	\$ 867.606,29	\$ 895.071,17	\$ 923.372,73		
Pago Impuesto a la Renta	\$ 867.222,09	\$ 889.801,58	\$ 918.503,73	\$ 1.012.806,62	\$ 1.044.985,67	\$ 1.078.145,47	\$ 1.112.315,76	\$ 1.147.527,14	\$ 1.183.811,19		
(=) EFECTIVO NETO	\$ 2.449.675,51	\$ 2.574.780,53	\$ 2.968.729,82	\$ 2.947.139,09	\$ 3.040.586,75	\$ 3.136.881,76	\$ 3.236.110,43	\$ 3.338.361,65	\$ 3.443.727,01		
Préstamo											
Aporte Accionistas											
(=) FLUJO NETO	\$ 2.449.675,51	\$ 2.574.780,53	\$ 2.968.729,82	\$ 2.947.139,09	\$ 3.040.586,75	\$ 3.136.881,76	\$ 3.236.110,43	\$ 3.338.361,65	\$ 3.443.727,01		
(+) Saldo inicial	\$17.790.832,16	\$20.240.507,67	\$22.815.288,21	\$25.784.018,02	\$28.731.157,11	\$31.771.743,87	\$34.908.625,63	\$38.144.736,05	\$41.483.097,70		
FLUJO ACUMULADO	\$20.240.507,67	\$22.815.288,21	\$25.784.018,02	\$28.731.157,11	\$31.771.743,87	\$34.908.625,63	\$38.144.736,05	\$41.483.097,70	\$44.926.824,71		
Flujo Neto	\$ 2.449.675,51	\$ 2.574.780,53	\$ 2.968.729,82	\$ 2.947.139,09	\$ 3.040.586,75	\$ 3.136.881,76	\$ 3.236.110,43	\$ 3.338.361,65	\$ 3.443.727,01		

Tabla No. 120. Flujo de Caja-(b)

[Fuente: Elaboración Propia.]

FLUJO DE EFECTIVO PROYECTADO										
	Año 18	Año 19	Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24	Año 25		
Inversion Inicial										
Ingresos	\$ 6.296.159,43	\$ 6.485.044,21	\$ 6.679.595,54	\$ 6.879.983,40	\$ 7.086.382,91	\$ 7.298.974,39	\$ 7.517.943,63	\$ 7.743.481,93		
(-)COSTO MARGINAL	\$ 6.296.159,43	\$ 6.485.044,21	\$ 6.679.595,54	\$ 6.879.983,40	\$ 7.086.382,91	\$ 7.298.974,39	\$ 7.517.943,63	\$ 7.743.481,93		
(-) GASTOS OPERACIONALES										
Gastos Operacionales	\$ 570.121,82	\$ 578.547,41	\$ 587.145,49	\$ 595.919,61	\$ 604.873,42	\$ 614.010,64	\$ 623.335,07	\$ 632.850,59		
TOTAL GASTOS OPERACIONALES	\$ 570.121,82	\$ 578.547,41	\$ 587.145,49	\$ 595.919,61	\$ 604.873,42	\$ 614.010,64	\$ 623.335,07	\$ 632.850,59		
UTILIDAD OPERACIONAL	\$ 5.726.037,61	\$ 5.906.496,80	\$ 6.092.450,05	\$ 6.284.063,80	\$ 6.481.509,49	\$ 6.684.963,75	\$ 6.894.608,56	\$ 7.110.631,35		
(-) DIVIDENDO TOTAL	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -		
UATI	\$ 5.726.037,61	\$ 5.906.496,80	\$ 6.092.450,05	\$ 6.284.063,80	\$ 6.481.509,49	\$ 6.684.963,75	\$ 6.894.608,56	\$ 7.110.631,35		
Pago de Dividendos	\$ 952.536,32	\$ 982.588,05	\$ 1.013.554,85	\$ 1.045.464,43	\$ 1.078.345,35	\$ 1.112.227,03	\$ 1.147.139,78	\$ 1.183.114,83		
Pago Impuesto a la Renta	\$ 1.221.200,41	\$ 1.259.728,27	\$ 1.299.429,30	\$ 1.340.339,01	\$ 1.382.494,04	\$ 1.425.932,09	\$ 1.470.692,03	\$ 1.516.813,88		
(=) EFECTIVO NETO	\$ 3.552.300,89	\$ 3.664.180,47	\$ 3.779.465,90	\$ 3.898.260,36	\$ 4.020.670,11	\$ 4.146.804,64	\$ 4.276.776,75	\$ 4.410.702,64		
Préstamo										
Aporte Accionistas										
(=) FLUJO NETO	\$ 3.552.300,89	\$ 3.664.180,47	\$ 3.779.465,90	\$ 3.898.260,36	\$ 4.020.670,11	\$ 4.146.804,64	\$ 4.276.776,75	\$ 4.410.702,64		
(+) Saldo inicial	\$44.926.824,71	\$48.479.125,60	\$52.143.306,07	\$55.922.771,97	\$59.821.032,33	\$63.841.702,43	\$67.988.507,07	\$72.265.283,82		
FLUJO ACUMULADO	\$48.479.125,60	\$52.143.306,07	\$55.922.771,97	\$59.821.032,33	\$63.841.702,43	\$67.988.507,07	\$72.265.283,82	\$76.675.986,46		
Flujo Neto	\$ 3.552.300,89	\$ 3.664.180,47	\$ 3.779.465,90	\$ 3.898.260,36	\$ 4.020.670,11	\$ 4.146.804,64	\$ 4.276.776,75	\$ 4.410.702,64		

Tabla No. 121. Flujo de Caja-(c)

[Fuente: Elaboración Propia.]