

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



TESIS

“Propuesta de un método para optimizar selección de motor, transmisión y hélice en barcos de pesca artesanal existentes, utilizando fotogrametría y dinámica de fluidos computacional”

Para obtener el título profesional de Ingeniero Naval

Elaborado por:

Kevin Alexis Trujillo Peña

 0009-0009-6549-0278

Asesor:

M.sc. Daniel Francisco Churampi Roman

 0009-0005-2720-5529

LIMA - PERÚ

2024

| | |
|------------------------------|---|
| Citar/How to cite | Trujillo Peña [1] |
| Referencia/Reference | [1] K. Trujillo Peña, “ <i>Propuesta de un método para optimizar selección de motor, transmisión y hélice en barcos de pesca artesanal existentes, utilizando fotogrametría y dinámica de fluidos computacional</i> ” [Tesis]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024. |
| Estilo/Style: IEEE (2020) | |

| | |
|--------------------------------|---|
| Citar/How to cite | (Trujillo, 2024) |
| Referencia/Reference | Trujillo, K. (2024). <i>Propuesta de un método para optimizar selección de motor, transmisión y hélice en barcos de pesca artesanal existentes, utilizando fotogrametría y dinámica de fluidos computacional</i> . [Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI. |
| Estilo/Style: APA (7ma ed.) | |

Dedico este trabajo a mis seres queridos, cuyo amor y apoyo han sido mi fuente de inspiración a lo largo de esta travesía. Quiero hacer una mención especial a mi madre, cuyos ánimos, constante empuje y consejos siempre han iluminado mi camino. A mis amigos y colegas de trabajo, cuya solidaridad y aliento permanente fueron un pilar esencial en este camino. A todos aquellos que de una u otra forma contribuyeron a mi formación académica, gracias por ser parte de este logro.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a la empresa Olivos Maquinas SAC por brindarme la oportunidad de acceder a los datos de su empresa y por permitirme utilizarlos para mi investigación. Agradezco especialmente al equipo de proyectos que estuvo a mi disposición durante todo el proceso de investigación, brindándome información valiosa y apoyándome en todo momento.

También quisiera agradecer al Sr. Pedro Vite Pingo, dueño del barco de pesca al cual me permitió muy amablemente realizar mi investigación.

Mi gratitud se extiende a mis profesores y mi asesor Ing. Daniel Churampi, cuyas enseñanzas y orientación académica han sido fundamentales para mi desarrollo como estudiante e investigador.

Este trabajo es el resultado del esfuerzo colectivo de muchas personas y, por eso, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todos los mencionados y a aquellos que quedan sin nombrar. Su colaboración y apoyo fueron esenciales en la culminación de esta tesis.

Índice

| | |
|--|--------------|
| Lista de tablas | ix |
| Lista de figuras | xii |
| Resumen | xvi |
| Abstract | xvii |
| Prólogo | xviii |
| Capítulo I: Introducción | 1 |
| 1.1 Antecedentes investigativos | 1 |
| 1.2 Descripción del problema de investigación | 2 |
| 1.3 Formulación del problema de investigación | 6 |
| 1.4 Objetivos del estudio | 6 |
| 1.4.1 Objetivo General | 6 |
| 1.4.2 Objetivos Específicos | 6 |
| 1.5 Hipótesis del estudio | 7 |
| 1.5.1 Hipótesis General | 7 |
| 1.5.2 Hipótesis Específicas | 7 |
| 1.6 Matriz de consistencia | 8 |
| Capítulo II: Marco teórico y conceptual | 9 |
| 2.1 Estimación de resistencia al avance | 9 |
| 2.1.1 Componentes de la resistencia al avance | 9 |
| 2.1.2 Métodos de cálculo de resistencia al avance | 12 |
| 2.1.3 Extrapolación de resultados modelo-buque | 14 |
| 2.2 Estimación de potencia motora | 19 |
| 2.2.1 Distribución de la potencia | 19 |
| 2.2.2 Proceso de estimación de potencia | 23 |
| 2.2.3 Eficiencia cuasi-propulsiva | 24 |
| 2.2.4 Factor de correlación SCF | 34 |
| 2.2.5 Curvas de desempeño del propulsor y motor | 35 |
| 2.2.6 Margen de proyecto | 36 |
| 2.3 Pesos y densidades a considerar dentro de un barco de pesca artesanal .. | 37 |
| 2.4 Dinámica de fluidos computacional | 38 |
| 2.4.1 Estructura de análisis CFD | 38 |
| 2.4.2 Modelado 3D | 39 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 2.4.3 | Generación de la malla | 40 |
| 2.4.4 | Dominio computacional y condiciones de contorno | 43 |
| 2.4.5 | Modelos de turbulencia | 46 |
| 2.4.6 | Modelos RANS | 47 |
| 2.5 | Fotogrametría | 48 |
| 2.5.1 | Base teórica | 49 |
| 2.5.2 | Cámaras fotográficas | 51 |
| 2.5.3 | Software ContextCapture | 52 |
| 2.5.4 | Recomendaciones de aplicación | 53 |
| 2.6 | Marco conceptual | 54 |
| 2.6.1 | Representaciones tridimensionales | 54 |
| 2.6.2 | Dimensiones principales de un barco | 55 |
| 2.6.3 | Apéndices | 55 |
| 2.6.4 | Dinámica de fluidos computacional (CFD) | 57 |
| 2.6.5 | Pesos dentro de un barco de pesca artesanal | 58 |
| 2.6.6 | Condiciones de operación para un barco de pesca | 58 |
| 2.6.7 | Barco de pesca artesanal | 58 |
| Capítulo III: Metodología de la investigación | | 59 |
| 3.1 | Tipo de investigación | 59 |
| 3.2 | Alcance de la investigación | 59 |
| 3.3 | Objeto de investigación | 59 |
| 3.4 | Etapas de la investigación | 60 |
| 3.4.1 | Recolección de información | 60 |
| 3.4.2 | Análisis de datos obtenidos | 63 |
| 3.4.3 | Validación de datos | 63 |
| 3.4.4 | Análisis de resultados y optimización de motor, transmisión y hélice | 63 |
| 3.5 | Flujograma de investigación | 64 |
| Capítulo IV: Procesamiento fotogramétrico y generación del modelo 3D | | 65 |
| 4.1 | Proceso fotogramétrico | 65 |
| 4.1.1 | Obtención de datos | 65 |
| 4.1.2 | Procesamiento de datos | 67 |
| 4.2 | Modelado 3D y generación de líneas de forma | 74 |
| 4.2.1 | Modelado 3D | 74 |
| 4.2.2 | Generación de líneas de forma | 75 |
| 4.3 | Cálculo de pesos y datos hidrostáticos | 76 |
| 4.3.1 | Determinación del calado en condición de prueba de mar | 77 |
| 4.3.2 | Cálculo del desplazamiento en condición de pruebas de mar | 79 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 4.3.3 | Cálculo del desplazamiento en condición de servicio | 79 |
| 4.3.4 | Datos hidrostáticos | 80 |
| Capítulo V: Validación del método CFD | | 82 |
| 5.1 | Modelo de validación | 82 |
| 5.1.1 | Características del modelo | 82 |
| 5.2 | Mallado de la geometría | 83 |
| 5.2.1 | Modelo 3D | 83 |
| 5.2.2 | Limitación del dominio | 83 |
| 5.2.3 | Mallado estructurado en OpenFOAM | 84 |
| 5.3 | Simulación y validación de resultados | 85 |
| 5.3.1 | Configuración de la simulación | 85 |
| 5.3.2 | Resultados de la simulación | 86 |
| 5.3.3 | Validación de resultados | 89 |
| Capítulo VI: Simulación CFD para el barco DELIA I | | 90 |
| 6.1 | Modelo a escala | 90 |
| 6.1.1 | Generación del modelo a escala | 90 |
| 6.1.2 | Características del modelo a escala | 91 |
| 6.2 | Mallado de la geometría | 91 |
| 6.2.1 | Delimitación del dominio computacional | 91 |
| 6.2.2 | Mallado estructurado en OpenFOAM | 92 |
| 6.3 | Simulación del modelo | 93 |
| 6.3.1 | Configuración de la simulación | 93 |
| 6.3.2 | Resultados de la simulación | 94 |
| 6.4 | Extrapolación de resultados | 98 |
| 6.4.1 | Método ITTC 1978 | 98 |
| 6.4.2 | Método de Hughes | 99 |
| 6.4.3 | Factor de forma (1+k) | 100 |
| 6.4.4 | Resistencia por apéndices | 101 |
| 6.4.5 | Curvas de resistencia al avance barco DELIA I | 102 |
| 6.5 | Cálculo de curva del propulsor | 103 |
| 6.5.1 | Cálculo de potencia efectiva (EHP) | 104 |
| 6.5.2 | Cálculo de eficiencia cuasi-propulsiva | 104 |
| 6.5.3 | Cálculo potencia entregada a la hélice (DHP) | 108 |
| 6.5.4 | Eficiencia en el eje n_M y transmisión marina n_G | 108 |
| 6.5.5 | Cálculo potencia en el eje (SHP) | 109 |
| 6.5.6 | Cálculo potencia al freno del motor (BHP) | 109 |
| 6.5.7 | Curvas de propulsor | 110 |

| | | |
|---|---|------------|
| 6.6 | Validación de resultados | 111 |
| 6.6.1 | Resultados prueba de mar | 111 |
| 6.6.2 | Comparación de resultados | 112 |
| Capítulo VII: Análisis y optimización de motor, transmisión y hélice | | 115 |
| 7.1 | Evaluación del propulsor | 116 |
| 7.1.1 | Dimensiones de la hélice | 116 |
| 7.1.2 | Re-dimensionamiento de hélice | 117 |
| 7.2 | Cálculo de curvas del propulsor | 119 |
| 7.2.1 | Cálculo de potencia efectiva EHP | 119 |
| 7.2.2 | Cálculo eficiencia Cuasi-propulsiva | 119 |
| 7.2.3 | Cálculo de potencia entregada a la hélice DHP | 121 |
| 7.2.4 | Eficiencia en el eje n_M y transmisión marina n_G | 121 |
| 7.2.5 | Cálculo de potencia en el eje SHP | 121 |
| 7.2.6 | Cálculo de potencia al freno BHP | 122 |
| 7.2.7 | Curva del propulsor | 122 |
| 7.3 | Evaluación de la cavitación | 122 |
| 7.4 | Selección del motor y transmisión | 123 |
| 7.4.1 | Verificación transmisión marina | 124 |
| 7.4.2 | Verificación potencia motor | 124 |
| 7.5 | Margen de potencia | 125 |
| 7.6 | Resumen de optimización | 125 |
| Conclusiones | | 127 |
| Recomendaciones | | 129 |
| Anexos | | 134 |

Lista de tablas

| | | |
|---------------|---|----|
| Tabla N° 1.1 | Matriz de consistencia | 8 |
| Tabla N° 2.1 | Factor de forma en apéndices (1+k2) | 12 |
| Tabla N° 2.2 | Características de todas la familias de la serie B de Wageningen | 26 |
| Tabla N° 2.3 | Distancias de protección de la hélice | 28 |
| Tabla N° 2.4 | Valores $e_{i,j}$ para los polinomios de los coeficientes de propulsión | 32 |
| Tabla N° 4.1 | Distancia entre puntos de referencia | 66 |
| Tabla N° 4.2 | Dimensiones principales medidas en campo | 66 |
| Tabla N° 4.3 | Tabla de datos espacios de hélice | 67 |
| Tabla N° 4.4 | Características de hélice | 67 |
| Tabla N° 4.5 | Puntos de referencia tomados | 69 |
| Tabla N° 4.6 | Validación de puntos de referencia del barco DELIA I | 73 |
| Tabla N° 4.7 | Validación de dimensiones principales del barco DELIA I | 73 |
| Tabla N° 4.8 | Validación de espacios de hélice | 74 |
| Tabla N° 4.9 | Validación de características de la hélice | 74 |
| Tabla N° 4.10 | Dimensiones principales barco 3D DELIA I | 75 |
| Tabla N° 4.11 | Condiciones de operación | 76 |
| Tabla N° 4.12 | Pesos prueba de mar | 77 |
| Tabla N° 4.13 | Medidas de francobordo barco DELIA I | 78 |
| Tabla N° 4.14 | Determinación de calado medio | 78 |
| Tabla N° 4.15 | Pesos condición de pruebas de mar | 79 |
| Tabla N° 4.16 | Pesos condición de servicio | 80 |
| Tabla N° 4.17 | Datos hidrostáticos - Prueba de mar | 81 |
| Tabla N° 4.18 | Datos hidrostáticos - Condición de servicio | 81 |
| Tabla N° 5.1 | Dimensiones principales en condiciones de carga de diseño | 82 |
| Tabla N° 5.2 | Resultados de ensayo de remolque | 83 |
| Tabla N° 5.3 | Propiedades de los fluidos | 86 |
| Tabla N° 5.4 | Propiedades del casco DTCHull | 86 |
| Tabla N° 5.5 | Tabla de resistencia al avance generada con OpenFOAM | 88 |
| Tabla N° 5.6 | Comparación de resultados y errores-DTCHull | 89 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| Tabla N° 6.1 | Características principales-modelo escala DELIA I | 91 |
| Tabla N° 6.2 | Propiedades de los fluidos | 93 |
| Tabla N° 6.3 | Propiedades del casco DELIA I | 94 |
| Tabla N° 6.4 | Condiciones de simulación - DELIA I | 94 |
| Tabla N° 6.5 | Valores Y+ - simulación DELIA I | 95 |
| Tabla N° 6.6 | Resultados de modelo-DELIA I | 98 |
| Tabla N° 6.7 | Método ITTC DELIA I- Condición: prueba de mar | 99 |
| Tabla N° 6.8 | Método ITTC DELIA I- Condición: Servicio | 99 |
| Tabla N° 6.9 | Método Hughes DELIA I- Condición: Prueba de mar | 99 |
| Tabla N° 6.10 | Método Hughes DELIA I- Condición: Servicio | 100 |
| Tabla N° 6.11 | Datos resultantes-Método Prohaska-Condición:Prueba de mar . . . | 100 |
| Tabla N° 6.12 | Datos resultantes-Método Prohaska-Condición:Servicio | 101 |
| Tabla N° 6.13 | Factor de forma-Método Prohaska | 101 |
| Tabla N° 6.14 | Datos de apéndices-DELIA I | 102 |
| Tabla N° 6.15 | Resistencia por apéndices | 102 |
| Tabla N° 6.16 | Resultados EHP - Método Hughes | 104 |
| Tabla N° 6.17 | Resultados EHP - Método ITTC | 104 |
| Tabla N° 6.18 | Control de variables-Eficiencia del casco-Condición: Prueba de mar | 105 |
| Tabla N° 6.19 | Cálculo eficiencia del casco - Condición: Prueba de mar | 105 |
| Tabla N° 6.20 | Control de variables-Eficiencia del propulsor | 105 |
| Tabla N° 6.21 | Eficiencia del propulsor - Condición: Prueba de mar - Método: Hughes | 106 |
| Tabla N° 6.22 | Eficiencia del propulsor - Condición: Prueba de mar - Método: ITTC | 107 |
| Tabla N° 6.23 | Eficiencia rotativa relativa - Condición: Prueba de mar | 107 |
| Tabla N° 6.24 | Eficiencia cuasipropulsiva - Condición: Prueba de mar - Método: Hughes | 107 |
| Tabla N° 6.25 | Eficiencia cuasipropulsiva - Condición: Prueba de mar - Método: ITTC | 108 |
| Tabla N° 6.26 | Cálculo de DHP-Condición: Prueba de mar-Método: Hughes | 108 |
| Tabla N° 6.27 | Cálculo de DHP-Condición: Prueba de mar-Método: ITTC | 108 |
| Tabla N° 6.28 | Pérdidas en el eje y transmisión marina | 109 |
| Tabla N° 6.29 | Potencia en el eje(SHP)-Condición: Prueba de mar-Método: Hughes | 109 |
| Tabla N° 6.30 | Potencia en el eje(SHP)-Condición: Prueba de mar-Método: ITTC . | 109 |
| Tabla N° 6.31 | Potencia al freno(BHP)-Condición: Prueba de mar-Método: Hughes | 110 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| Tabla N° 6.32 | Potencia al freno(BHP)-Condición: Prueba de mar-Método: ITTC | 110 |
| Tabla N° 6.33 | Datos de RPM y velocidad obtenidos de prueba de mar | 112 |
| Tabla N° 6.34 | Método Hughes - Conversión de RPM | 112 |
| Tabla N° 6.35 | Método ITTC - Conversión de RPM | 112 |
| Tabla N° 6.36 | Validación de resultados-Método Hughes | 113 |
| Tabla N° 6.37 | Validación de resultados-Método ITTC | 113 |
| Tabla N° 7.1 | Revisión de distancias de hélice-DELIA I | 117 |
| Tabla N° 7.2 | Resumen de verificación de dimensiones de hélice actual | 117 |
| Tabla N° 7.3 | Distancias de espacios de hélice modificada-DELIA I | 118 |
| Tabla N° 7.4 | Resumen de verificación de dimensiones de hélice modificada | 118 |
| Tabla N° 7.5 | EHP-Condición servicio-DELIA I | 119 |
| Tabla N° 7.6 | Control de variables-Eficiencia del casco | 119 |
| Tabla N° 7.7 | Control de variables-Eficiencia del propulsor | 120 |
| Tabla N° 7.8 | Eficiencia del casco - Condición:servicio | 120 |
| Tabla N° 7.9 | Eficiencia del propulsor - Condición:servicio | 120 |
| Tabla N° 7.10 | Eficiencia rotativa relativa - Condición:servicio | 120 |
| Tabla N° 7.11 | Eficiencia cuasipropulsiva - Condición:servicio | 121 |
| Tabla N° 7.12 | Potencia entregada a la hélice (DHP) - Condición:servicio | 121 |
| Tabla N° 7.13 | Potencia en el eje (SHP) - Condición:servicio | 121 |
| Tabla N° 7.14 | Potencia al freno del motor (BHP) - Condición:servicio | 122 |
| Tabla N° 7.15 | Cálculo de empuje de hélice modificada | 123 |
| Tabla N° 7.16 | Cálculo de cavitación de hélice modificada. | 123 |
| Tabla N° 7.17 | Motor y transmisión óptimos - Condición:servicio | 124 |
| Tabla N° 7.18 | Conversión de RPM - Condición:servicio | 124 |
| Tabla N° 7.19 | Conjunto motor, transmisión y hélice optimizado - Condición:Servicio | 125 |

Lista de figuras

| | | |
|----------------|---|----|
| Figura N° 1.1 | Evolución de la pesca artesanal peruana(1950-2018) | 3 |
| Figura N° 1.2 | Presencia de humo negro por sobrecarga de motor en una panga | 4 |
| Figura N° 1.3 | Problemas de diseño en barcos de pesca artesanal | 5 |
| Figura N° 1.4 | Intensidad de las emisiones de CO2 de la pesca mundial | 5 |
| Figura N° 2.1 | Fuerza friccional y de presión | 9 |
| Figura N° 2.2 | Medición de la resistencia viscosa total | 10 |
| Figura N° 2.3 | Componentes básicos de la resistencia | 11 |
| Figura N° 2.4 | Esquema de ensayo de remolque de modelos | 13 |
| Figura N° 2.5 | Gráfica de Prohaska | 18 |
| Figura N° 2.6 | Distribución de energía en el barco | 19 |
| Figura N° 2.7 | Distribución de potencia en el sistema propulsivo | 20 |
| Figura N° 2.8 | Relación de eficiencia del sistema propulsivo | 20 |
| Figura N° 2.9 | Proceso de estimación de potencia | 24 |
| Figura N° 2.10 | Gráfica de $K_T - K_Q$ en aguas abiertas para un paso determinado | 25 |
| Figura N° 2.11 | Proceso típico de diseño hélices | 27 |
| Figura N° 2.12 | Distancias de protección de la hélice | 28 |
| Figura N° 2.13 | Medición de velocidad de hélice por tubos de Pitot | 31 |
| Figura N° 2.14 | Curvas de motor Weichai | 35 |
| Figura N° 2.15 | Curva de hélice marina | 36 |
| Figura N° 2.16 | Elección del punto de proyecto para una hélice de paso fijo | 36 |
| Figura N° 2.17 | Estructura de un código CFD | 38 |
| Figura N° 2.18 | Ejemplos de mallado estructurado | 41 |
| Figura N° 2.19 | Esquema de medición de ortogonalidad | 42 |
| Figura N° 2.20 | Esquema de medición de asimetría | 42 |
| Figura N° 2.21 | Esquema de relación de aspecto | 43 |
| Figura N° 2.22 | Intersección de dos rayos de luz | 50 |
| Figura N° 2.23 | Recesión espacial | 50 |
| Figura N° 2.24 | Tamaño de sensor en cámara digital | 51 |
| Figura N° 2.25 | Longitud focal | 52 |

| | |
|---|----|
| Figura N° 2.26 Solapamiento de fotografías | 53 |
| Figura N° 2.27 Representación 3D mediante archivo STL | 54 |
| Figura N° 2.28 Representación 3D de superficies NURBS | 55 |
| Figura N° 2.29 Bocina y eje de cola de un barco | 56 |
| Figura N° 2.30 Pala de gobierno de un barco | 56 |
| Figura N° 2.31 Keel cooler de un barco | 57 |
| Figura N° 3.1 Cámara fotográfica utilizada en la recolección de datos | 61 |
| Figura N° 3.2 Procedimiento de toma de fotos | 61 |
| Figura N° 3.3 Ubicación de puntos en la obra viva del casco DELIA I | 62 |
| Figura N° 3.4 Procedimiento de recorrido en prueba de mar | 62 |
| Figura N° 3.5 Flujograma de investigación | 64 |
| Figura N° 4.1 Puntos de referencia-Barco DELIA I | 65 |
| Figura N° 4.2 Zona de hélice | 66 |
| Figura N° 4.3 Importación de fotografías | 68 |
| Figura N° 4.4 Puntos de referencia en el barco DELIA I | 68 |
| Figura N° 4.5 Puntos de referencia en la hélice de DELIA I | 68 |
| Figura N° 4.6 Distancia de referencia 1A-1B | 69 |
| Figura N° 4.7 Aerotriangulación del modelo-ContextCapture | 69 |
| Figura N° 4.8 Reconstrucción del modelo-ContextCapture | 70 |
| Figura N° 4.9 Reconstrucción de la hélice-ContextCapture | 70 |
| Figura N° 4.10 Representación 3D del barco DELIA I | 71 |
| Figura N° 4.11 Representación 3D de la pala de hélice | 71 |
| Figura N° 4.12 Medición entre puntos 3H-4H. | 71 |
| Figura N° 4.13 Medición de distancia B. | 72 |
| Figura N° 4.14 Verificación de diámetro y paso de hélice | 72 |
| Figura N° 4.15 Verificación de área expandida de pala | 72 |
| Figura N° 4.16 Contorneado y delimitación del modelo STL | 74 |
| Figura N° 4.17 Casco del barco DELIA I modelado en superficies NURBS | 75 |
| Figura N° 4.18 Seccionamiento del modelo 3D | 75 |
| Figura N° 4.19 Elaboración de plano de líneas de forma barco DELIA I | 76 |
| Figura N° 4.20 Medición de francobordo barco DELIA I | 77 |
| Figura N° 4.21 Esquema de medición de francobordo barco DELIA I | 77 |

| | | |
|----------------|---|-----|
| Figura N° 4.22 | Generación del plano de flotación en condición de prueba de mar . | 78 |
| Figura N° 4.23 | Determinación de calado de proa y popa en la línea de flotación . | 78 |
| Figura N° 4.24 | Cálculo del volumen sumergido del barco DELIA I | 79 |
| Figura N° 4.25 | Datos hidrostáticos en Grasshopper | 80 |
| Figura N° 5.1 | Modelo 3D - DTCHull | 83 |
| Figura N° 5.2 | Esquema del dominio computacional | 84 |
| Figura N° 5.3 | Zonas de refinamiento | 84 |
| Figura N° 5.4 | Mallado de la geometría - DTCHull | 85 |
| Figura N° 5.5 | Revisión de calidad de la malla - DTCHull | 85 |
| Figura N° 5.6 | Vel: 1.668 m/s - Campo de velocidades | 86 |
| Figura N° 5.7 | Vel: 1.668 m/s - Campo de presión | 87 |
| Figura N° 5.8 | Gráfica de residuos-Vel:1.668 | 87 |
| Figura N° 5.9 | Gráfica de fuerzas de arrastre-Vel:1.668 | 88 |
| Figura N° 5.10 | Resistencia al avance-OpenFOAM | 88 |
| Figura N° 5.11 | Comparación de resultados-resistencia al avance | 89 |
| Figura N° 6.1 | Modelo-Prototipo Barco DELIA I | 90 |
| Figura N° 6.2 | Modelo formato STL - Delia I | 91 |
| Figura N° 6.3 | Esquema del dominio computacional | 92 |
| Figura N° 6.4 | Esquema del dominio computacional | 92 |
| Figura N° 6.5 | Mallado de la geometría - DELIA I | 93 |
| Figura N° 6.6 | Revisión de la calidad de la malla - DELIA I | 93 |
| Figura N° 6.7 | Vel: 2.30 m/s - Campo de velocidades - Condición: Prueba de mar | 95 |
| Figura N° 6.8 | Vel: 2.30 m/s - Campo de velocidades - Condición: Servicio | 95 |
| Figura N° 6.9 | Gráfica de residuos-Vel:2.30 m/s-Condición: Prueba de mar | 96 |
| Figura N° 6.10 | Gráfica de residuos-Vel:2.30 m/s-Condición: Servicio | 96 |
| Figura N° 6.11 | Gráfica de fuerzas de arrastre-Vel:2.30-Condición: Prueba de mar | 96 |
| Figura N° 6.12 | Gráfica de fuerzas de arrastre-Vel:2.30-Condición: Servicio | 97 |
| Figura N° 6.13 | Resistencia al avance(modelo)-Condición: Prueba de mar | 97 |
| Figura N° 6.14 | Resistencia al avance(modelo)-Condición: Servicio | 97 |
| Figura N° 6.15 | Gráfica de Prohaska-Condición: Prueba de mar | 100 |
| Figura N° 6.16 | Gráfica de Prohaska-Condición: Servicio | 101 |
| Figura N° 6.17 | Resistencia al avance barco DELIA I-Condición: Prueba de mar . . | 102 |

| | |
|--|-----|
| Figura N° 6.18 Resistencia al avance barco DELIA I-Condición: Servicio | 103 |
| Figura N° 6.19 Proceso de obtención de curvas de propulsor | 103 |
| Figura N° 6.20 Esquema de identificación de revoluciones del propulsor | 106 |
| Figura N° 6.21 Curva de propulsor-Condición Prueba de mar-Método Hughes . . . | 110 |
| Figura N° 6.22 Curva de propulsor-Condición Prueba de mar-Método ITTC | 111 |
| Figura N° 6.23 Prueba de mar barco DELIA I | 111 |
| Figura N° 6.24 RPM motor vs Velocidad - Barco DELIA I | 113 |
| Figura N° 7.1 Selección del sistema propulsivo óptimo - Barco DELIA I | 115 |
| Figura N° 7.2 Espacios de hélice actual - Barco DELIA I | 116 |
| Figura N° 7.3 Espacios de hélice modificado - Barco DELIA I | 118 |
| Figura N° 7.4 Curva de propulsor - Condición: Servicio | 122 |
| Figura N° 7.5 Curva de propulsor - Condición: Servicio | 125 |
| Figura N° 7.6 Curva de propulsor vs Curva de motor - Condición: Servicio | 126 |

Resumen

La propulsión de un barco es fundamental, ya que de ella depende el buen desempeño en su operación y la eficiencia adecuada en cuanto a potencia y velocidad. En Perú, muchos armadores de barcos artesanales desconocen los criterios necesarios para seleccionar el conjunto motor, transmisión y hélice. En general, se basan en la experiencia de otras embarcaciones o simplemente tienen el objetivo de economizar costos. Si a esto se suma la falta de datos de construcción (líneas de forma, curvas hidrostáticas, pruebas de estabilidad) y un diseño ineficiente del casco, no se puede seguir un proceso al momento de escoger equipos de propulsión, y las consecuencias pueden ir desde la parte económica, con un alto consumo de combustible y deterioro temprano del motor, hasta la parte ambiental, con una elevada emisión de CO₂.

Esta tesis tiene como objetivo plantear un método para optimizar la selección del motor, transmisión y hélice de un barco artesanal a través del uso de fotogrametría y CFD. Para este fin, se utilizó el barco artesanal DELIA I como modelo de prueba en la optimización. Se tomaron fotografías del barco desde diversos ángulos para el proceso de fotogrametría y se realizaron pruebas de mar para recopilar datos reales de velocidad y rendimiento del motor. A partir de este proceso, se creó un modelo 3D del barco y se llevó a cabo una simulación CFD para calcular la resistencia al avance. Esto permitió realizar cálculos y un estudio de propulsión para comprender el comportamiento teórico del barco, que luego se comparó con los resultados de las pruebas reales de mar. Como fase final, se determinó la configuración óptima de motor, transmisión y hélice, garantizando un funcionamiento eficiente y la capacidad de alcanzar velocidades deseadas de más de 9 nudos, según las necesidades del armador del barco.

Abstract

The propulsion of a vessel is fundamental, since good performance in its operation and adequate efficiency in terms of power and speed depend on it. In Peru, many small-scale boat owners are unaware of the necessary criteria for selecting the engine, transmission and propeller assembly. In general, they rely on the experience of other vessels or simply seek to save costs. If to this is added the lack of constructive data (form lines, hydrostatic curves, stability tests) and an inefficient hull design, a process cannot be followed when choosing the propulsion equipment, and the consequences can range from the economic side, with high fuel consumption and early engine deterioration, to the environmental side, with high CO₂ emissions.

This thesis aims to propose a method to optimize the selection of the propulsion system (engine, transmission, propeller) of an small scale boat by using photogrammetry and CFD. For this purpose, the DELIA I small scale boat was used as a test model in the optimization of the propulsion system. Photographs of the boat were taken from various angles for the photogrammetry process and navigation tests were conducted to collect real data on the speed and performance of the engine. From this process, a 3D model of the boat was created and a CFD simulation was performed to calculate the aerodynamic drag. This allowed calculations and a propulsion study to understand the theoretical behavior of the ship, which was then compared with the results of actual sailing tests. As a final phase, the optimal configuration of the propulsion system was determined, ensuring efficient operation and the ability to reach the desired speeds of more than 9 knots, according to the shipowner's needs.

Prólogo

La industria pesquera artesanal en Perú es un campo relativamente inexplorado por los profesionales en el sector naval. Esto se debe en gran medida a la escasa participación de empresas estatales y privadas en este ámbito. Como consecuencia más evidente de esta falta de atención, se observa la ausencia de regulaciones en aspectos esenciales, como el diseño y la construcción adecuada de embarcaciones artesanales.

Desde mi experiencia laboral, he identificado problemas notables, como el inadecuado diseño de las embarcaciones artesanales y la elección inapropiada de sistemas de propulsión. Estos problemas tienen consecuencias significativas tanto en términos económicos como medioambientales. Es precisamente este conjunto de factores lo que me motiva a llevar a cabo esta investigación.

En este contexto, el enfoque de la presente tesis se dirige hacia la mejora y optimización del motor, transmisión y hélice en barcos pesqueros artesanales que actualmente operan en condiciones deficientes.

Para abordar los expresado, la presente tesis se estructura de la siguiente manera:

Capítulo I: Introducción, primer capítulo orientado a describir los problemas y objetivos que enfocan el curso de la tesis. Detalla los problemas que surgen en la flota pesquera artesanal y el planteamiento de como solucionarlos.

Capítulo II: Fundamento teórico, en este capítulo se proporciona al lector el marco teórico relacionado a las herramientas utilizadas (CFD y fotogrametría) así como al método utilizado para realizar las estimaciones de resistencia al avance y potencia motor.

Capítulo III: Metodología de la investigación, se detalla el tipo de investigación llevada a cabo, junto con el proceso de recopilación de datos. También se detallan las etapas de trabajo realizadas en el estudio. Además, se incluye un flujograma para facilitar la visualización y comprensión del proceso de investigación.

Capítulo IV: Procesamiento fotogramétrico y generación del modelo 3D, en este capítulo se detalla el proceso de fotogrametría llevado a cabo, así como el proceso de generación del modelo 3D y la generación de datos de diseño como plano de líneas de forma y datos hidrostáticos.

Capítulo V: Validación del método CFD, capítulo orientado a justificar el método de mallado y simulación empleado. Se utiliza como base el modelo de barco DTCHull previamente estudiado en otras investigaciones.

Capítulo VI: Simulación del barco de estudio (Barco llamado DELIA I), se detalla el proceso de mallado y simulación utilizando el software OpenFOAM. Además, se muestran los cálculos de extrapolación de datos obtenidos en la simulación y se generan las curvas del propulsor, las cuales son validadas con los datos obtenidos en campo durante la prueba de mar del barco DELIA I.

Capítulo VII: Análisis de resultados y optimización, capítulo final en el que se analizan los datos obtenidos del capítulo anterior para optimizar el motor, transmisión y hélice del barco DELIA I.

En la parte final de la tesis se brindan las conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado, donde se confirma el cumplimiento de objetivos y se dan sugerencias para futuras investigaciones.

Capítulo I: Introducción

1.1 Antecedentes investigativos

El sector pesquero artesanal se representa en el Perú como una abastecedora de consumo humano directo. Su importancia en la alimentación de las familias peruanas es incuestionable. La flota pesquera artesanal, responsable de la captura de pesca y abastecedora de trabajo para más de 38 mil pescadores (Céspedes et al., 2012) por su parte abarca un total mayor a 17,920 barcos en el litoral peruano (Castillo, 2018), de los cuales muchos no cuentan con las regulaciones necesarias para poder operar. Esto puede ser consecuencia de muchos aspectos, como la ausencia de un procedimiento de construcción, la falta de planos de ingeniería y el desconocimiento por parte del constructor y armador de los procesos a seguir, guiándose únicamente del empirismo. De esta manera, gran parte de la flota pesquera artesanal cae en un estado de informalidad, ya que no pueden cumplir las regulaciones que establece el Estado (Carrere, 2021).

Regular la flota pesquera artesanal que se encuentra operando es una tarea que tomaría un gran costo monetario y de tiempo y no muchos están dispuestos a realizarlo. Es por esto que la presente tesis plantea un apoyo a la regularización de la flota artesanal, mediante la selección óptima del motor, transmisión y hélice mediante métodos fotogramétricos y de CFD.

Estudios como el de Kanun y Yakar (2021) miden la eficacia del método fotogramétrico al realizar el modelado 3D de un yate y comparar las mediciones con las medidas reales del yate, dando resultados positivos. Esto nos puede dar una importante herramienta para poder registrar y analizar mediante ingeniería inversa las deficiencias de un barco de pesca artesanal, dando soluciones en diferentes campos. Y si además consideramos que Kanun y Yakar (2021) utilizó para su estudio únicamente un celular de uso cotidiano, podemos tener una prueba de que no es necesario un equipo complejo y costoso de medición para poder obtener buenos resultados.

Estudios como el de Bahatmaka y Kim (2019) proponen la realización de estudios CFD para barcos de pesca artesanales. En este caso, se describe cómo se evaluó mediante OpenFOAM dos barcos tradicionales de Indonesia de esloras menores a 20 metros

y obtuvo la validación con una comparación de simulación realizada para un barco porta-contenedores llamado KRISO. Por medio de un análisis CFD podríamos implementar un estudio preciso al comportamiento de un barco de pesca artesanal. Esta es una herramienta importante considerando que los métodos estadísticos no ofrecen resultados para los barcos de pequeña escala como son los barcos de pesca artesanal.

Otros estudios como el de Santosa et al. (2022) describen cómo es posible realizar un cambio de motor fuera de borda a intra-borda para un barco de eslora de 9 metros y realizar el análisis CFD para el casco y la hélice, obteniendo la validación comparando la resistencia al avance obtenida y la serie matemática de Van Oortmerssen. Además, explica cómo procedió a calcular la potencia necesaria del motor a partir de los resultados obtenidos.

Como se puede apreciar, diversos estudios demuestran que es posible implementar nuevas tecnologías en el avance de la flota pesquera artesanal. Esta tesis abarca uno de los tantos puntos de deficiencia que se pueden encontrar, y se pretende aportar ideas innovadoras y dar pie a que otros investigadores aporten y ayuden a mejorar la flota pesquera artesanal, que es parte de nuestra cultura y tradición.

1.2 Descripción del problema de investigación

El sector pesquero es uno de los principales sectores productivos en nuestro país, y su impacto es tan significativo que Perú es considerado uno de los 7 principales países con mayor producción de pesca de captura a nivel mundial (FAO, 2022). Esta actividad productiva se divide en dos subsectores: la pesca industrial y la pesca artesanal. La pesca industrial se caracteriza principalmente por extraer peces para el consumo humano indirecto, mientras que la pesca artesanal, en su gran mayoría, se dedica a la captura de peces para el consumo humano directo.

Durante años, el esfuerzo para regular la pesca se ha centrado en la flota pesquera industrial, y se puede ver el progreso logrado, ejemplificado en los programas de pesca sostenible y los programas de mantenimiento y renovación de flotas en cada una de las empresas que los manejan. Sin embargo, si nos centramos en la pesca artesanal, podemos notar que ha crecido de manera descontrolada, sin ningún tipo de esfuerzo por regularla. Esta es una realidad nacional y ocurre a nivel mundial. La pesca a menor escala siempre se encuentra marginada y se deja de lado por las instituciones de gestión (Salas et al., 2007).

Si bien desde hace algunos años se ha estado implementando la formalización en la pesca artesanal, es una tarea muy complicada y con muchos obstáculos.

Algunos de los obstáculos principales que impiden la regulación de la flota artesanal son la informalidad en la construcción de nuevas embarcaciones y la ausencia de datos de diseño y construcción en los barcos que han estado operando durante años.

Astilleros informales:

Según la investigación de la Puente et al. (2020), la flota pesquera artesanal ha tenido un incremento explosivo desde 2006. Según el estudio, entre 2006 y 2010, la flota aumentó en 1,390 barcos al año y a partir de 2011 al 2018 hubo una disminución, pero aun así se estimó que la flota incrementaba en 640 barcos al año (Figura N° 1.1). Esto ha ocasionado un aumento explosivo e insostenible, lo que hace que sea muy difícil de regular. Regiones como Piura concentran el 31.7% de la flota pesquera artesanal (Castillo, 2018) y, por lo tanto, son zonas de alta demanda en construcción de barcos de madera. La alta demanda de barcos y la poca supervisión del estado han causado que se habiliten astilleros informales para construir barcos de madera. Si bien las autoridades toman cartas en el asunto y prohíben la construcción clandestina, como se aprecia en el artículo de Cabral (2017), la realidad es que aún se sigue realizando.

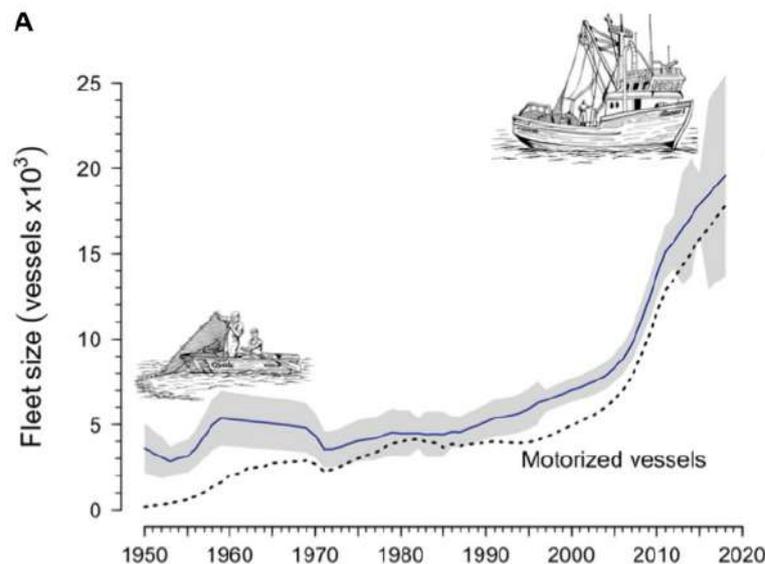


FIGURA N° 1.1: Evolución de la pesca artesanal peruana entre 1950 y 2018, destacando cambios en: número de embarcaciones y motorización de embarcaciones. Adaptado de la Puente et al. (2020)

Falta de historial de construcción y diseño:

Enfocando el problema en la construcción naval, estos astilleros operan sin seguir alguna norma de construcción ni de diseño. Se destaca la ausencia de estudios de integridad estructural, estudios de estabilidad y estudios de resistencia al avance. Y si nos referimos al diseño de los barcos, existen una gran cantidad de deficiencias en el diseño de las naves.

La razón principal por la que no se toman en cuenta normas de construcción o de diseño es por desconocimiento y falta de ingenieros en la supervisión de los proyectos. Durante décadas, la construcción de barcos de pesca artesanales se ha basado en el empirismo, siguiendo las tradiciones heredadas de familia en familia de constructores. Esta realidad es difícil de cambiar debido a que una gran cantidad de barcos que operan actualmente no cuenta con algún registro de estudios previos, ni siquiera con planos de diseño. Muchos de los constructores artesanales tienen como único modelo de diseño su experiencia, lo que resalta Herrera (2019) en una entrevista a un carpintero artesanal.

Problemas en la propulsión y sobrecarga del motor:

El motor, transmisión y hélice de un barco son de vital importancia para lograr el principal propósito de los barcos artesanales: la captura de pesca. La falta de conocimientos y el empirismo pueden llevar a una mala selección de lo mencionado, lo que puede generar problemas en el desempeño del barco, como bajas velocidades o deterioro del motor debido a la sobrecarga.

Actualmente existen una gran cantidad de barcos de pesca artesanal que operan en condición de sobrecarga.



FIGURA N° 1.2: Presencia de humo negro por sobrecarga de motor en una panga. Fuente propia.

Como se puede apreciar en la Figura N° 1.2, la presencia de humo negro es un posible indicativo de sobrecarga del motor. La causa raíz de este problema se encuentra en

el mal diseño de los barcos y la elección inadecuada de la hélice y el motor principal.



(a) Mal aprovechamiento de espacios para hélice, es una hélice muy inferior en tamaño a la que requiere el barco. Fuente propia.



(b) Hélice marina de 56 pulgadas de diámetro con paso incorrecto y mal distribuido. Fuente propia



(c) Distintos tipos de proa para barcos de similar tamaño. Fuente propia

FIGURA N° 1.3: Problemas de diseño en barcos de pesca artesanal

Una sobrecarga puede conducir a un aumento de emisiones de CO₂. Investigaciones como el estudio de Greer et al. (2019) analizan el aumento de la contaminación por CO₂ causado por la flota industrial y artesanal, y como era de esperar, las emisiones están en aumento. En el sector artesanal, esto se ve respaldado por el aumento de barcos y la sobrecarga que se produce en muchos de ellos.

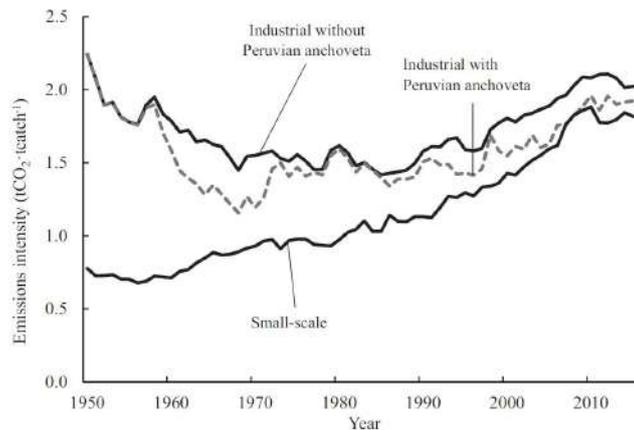


FIGURA N° 1.4: Intensidad de las emisiones de CO₂ de la pesca mundial. Adaptado de Greer et al. (2019)

1.3 Formulación del problema de investigación

La informalidad, falta de capacitación, falta de historial de construcción, entre otras, son las principales causas que producen una mala selección del conjunto motor, transmisión y hélice dentro de un barco, trayendo como consecuencias la sobrecarga, alta contaminación ambiental, deficiencia en el rendimiento del barco, entre otras consecuencias.

En base a lo planteado, nos preguntamos:

¿Es posible estructurar un método que permita seleccionar de manera óptima el conjunto motor, transmisión y hélice para un barco pesquero artesanal existente utilizando fotogrametría y dinámica de fluidos computacional?

1.4 Objetivos del estudio

1.4.1 Objetivo General

Estructurar un método que permita la optimización de la selección del motor, transmisión y hélice de un barco de pesca artesanal existente utilizando las herramientas computacionales de fotogrametría y dinámica de fluidos computacional (CFD).

1.4.2 Objetivos Específicos

- Comprobar que el uso de fotogrametría en un barco de pesca artesanal de madera brinda resultados de medición y modelado 3D lo suficientemente precisos en relación con el barco real.
- Validar la resistencia al avance producida por la simulación CFD de un modelo de barco utilizando como referencia los resultados experimentales obtenidos en canales de pruebas de remolque.
- Demostrar la fiabilidad en la predicción de velocidad para un barco de pesca artesanal utilizando cálculos matemáticos basados en los resultados de resistencia al avance producidos por una simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD).

1.5 Hipótesis del estudio

1.5.1 Hipótesis General

Utilizando herramientas de fotogrametría y dinámica de fluidos computacional, se podrá estructurar un método para optimizar la selección de motor, transmisión y hélice en un barco de pesca artesanal existente.

1.5.2 Hipótesis Específicas

- El uso del método de fotogrametría en un barco de pesca artesanal de madera producirá resultados de medición y modelado 3D lo suficientemente precisos en relación con el barco real.
- Utilizando un método de dinámica de fluidos computacional (CFD) en un modelo de barco se podrá obtener resultados de resistencia al avance con un grado de error mínimo comparados con los resultados experimentales en canales de pruebas de remolque.
- Un cálculo de predicción de velocidad para un barco de pesca artesanal utilizando los resultados de resistencia al avance producidos por dinámica de fluidos computacional (CFD) podrán generar resultados cercanos a la realidad.

1.6 Matriz de consistencia

TABLA N° 1.1: Matriz de consistencia.

| PROBLEMAS | OBJETIVOS | HIPÓTESIS | VARIABLES | INDICADORES |
|---|--|---|--|--|
| Problema general | Objetivo general | Hipótesis general | | |
| ¿Es posible estructurar un método que permita seleccionar de manera óptima motor, transmisión y hélice para un barco pesquero artesanal existente utilizando fotogrametría y dinámica de fluidos computacional (CFD)? | Estructurar un método que permita la optimización la selección del motor, transmisión y hélice de un barco de pesca artesanal existente utilizando las herramientas computacionales de fotogrametría y CFD. | Utilizando herramientas de fotogrametría y dinámica de fluidos computacional, se puede estructurar un método para optimizar la selección de motor, transmisión y hélice en un barco de pesca artesanal existente. | Variabes independientes: -Fotogrametría. -Dinámica de fluidos computacional. -Barco de estudio. Variabes dependientes: -Selección de motor, transmisión y hélice. | -Curva del propulsor. -Dimensiones de hélice. -Curvas de potencia de motor. - Velocidad esperada. |
| Problema específico | Objetivo específico | Hipótesis específica | | |
| ¿El uso de fotogrametría en un barco de pesca artesanal de madera puede producir resultados de medición y modelado 3D lo suficientemente precisos en relación al barco real? | Comprobar que el uso de fotogrametría en un barco de pesca artesanal de madera produce resultados de medición y modelado 3D lo suficientemente precisos en relación con el barco real. | El uso del método de fotogrametría en un barco de pesca artesanal de madera producirá resultados de medición y modelado 3D lo suficientemente precisos en relación con el barco real. | Variabes independiente: -Método de fotogrametría. Variabes dependiente: -Modelo tridimensional. | -Medidas físicas del barco estudiado. |
| ¿La simulación por dinámica de fluidos computacional (CFD) para un modelo de barco puede producir resultados de resistencia al avance lo suficientemente precisos en comparación con resultados experimentales? | Validar la resistencia al avance producida por la simulación CFD de un modelo de barco utilizando como referencia los resultados experimentales obtenidos en canales de pruebas de remolque. | Utilizando un método CFD en un modelo de barco se podrá obtener resultados de resistencia al avance con un grado de error mínimo comparados con los resultados experimentales en canales de pruebas de remolque. | Variabes independiente: -Modelo tridimensional del barco. Variabes dependiente: -Simulación CFD. | -Resultados de resistencia al avance. |
| ¿El uso de cálculos de predicción de velocidad para un barco de pesca artesanal basados en resultados de resistencia al avance producidos por CFD puede ofrecer resultados fiables en comparación con los resultados de pruebas de mar? | Demostrar la fiabilidad en la predicción de velocidad para un barco de pesca artesanal utilizando cálculos matemáticos basados en los resultados de resistencia al avance producidos por una simulación CFD. | Un cálculo de predicción de velocidad en un barco de pesca artesanal utilizando los resultados de resistencia al avance producidos por CFD podrán generar resultados cercanos a la realidad. | Variabes independiente: -Resistencia al avance por CFD del barco. Variabes dependiente: -Simulación CFD. | -Resultados de prueba de mar en un barco de pesca artesanal. |

Capítulo II: Marco teórico y conceptual

2.1 Estimación de resistencia al avance

La resistencia al avance es la fuerza de oposición que el fluido ejerce sobre el movimiento del barco. A partir del cálculo de esta resistencia, se puede deducir la cantidad de fuerza necesaria para propulsar y mover el buque.

2.1.1 Componentes de la resistencia al avance

La resistencia al avance se puede dividir en 2 ramas principales.

Resistencia friccional:

Se puede definir como la sumatoria de fuerzas de corte tangenciales τ a cada elemento de la superficie del casco (ver Figura N° 2.1). Esta resistencia se debe puramente a la viscosidad y está relacionada con el rozamiento del agua con el casco (superficie mojada) y la velocidad del buque. Es considerada la parte principal de la resistencia total del buque (Bonilla, 1979).

Resistencia de presión:

Es la suma de las fuerzas de presión P que actúan en cada elemento de la superficie del casco, tal como se muestra en la Figura N° 2.1. Mientras que la resistencia friccional está enteramente ligada a la viscosidad, la resistencia de presión está relacionada en parte con la viscosidad y en parte con la ondulación del casco provocada por las olas (Molland et al., 2011).



FIGURA N° 2.1: Fuerza friccional y de presión. Adaptado de Molland et al. (2011)

Resistencia viscosa:

La resistencia viscosa está relacionada con el teorema de Bernoulli, el cual establece la relación entre la presión y la velocidad de un fluido en movimiento.

$$\frac{P}{g} + \frac{V^2}{2g} + h = H \quad (2.1)$$

Donde:

H : Altura total o energía total

h : Carga de posición o potencia debida a la gravedad (energía potencial)

$\frac{V^2}{2g}$: Carga de velocidad (energía cinética)

$\frac{P}{g}$: Altura de presión

La pérdida total de altura H en el casco se debe a las fuerzas viscosas y puede ser determinada teóricamente utilizando un tubo de Pitot para medir la pérdida de altura en la estela detrás del casco (ver Figura N° 2.2). De esta manera, se puede obtener la resistencia viscosa total (Molland et al., 2011).

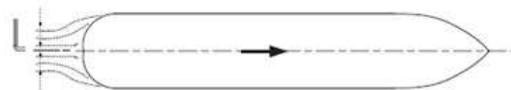


FIGURA N° 2.2: Medición de la resistencia viscosa total. Adaptado de Molland et al. (2011)

Las pérdidas totales de fuerza viscosa incluyen la pérdida por fricción en la capa límite del casco, así como las pérdidas de presión en la popa del casco debido a las pérdidas de carga causadas por las fuerzas viscosas. Esto se expresa en la siguiente ecuación:

$$R_v = R_f + R_{pv} \quad (2.2)$$

Donde: R_f representa la resistencia de fricción y R_{pv} representa la resistencia de presión viscosa.

Resistencia por formación de olas:

Se produce debido a la generación de ondas en la superficie del agua que son causadas por el movimiento del casco del barco a través del agua. La energía necesaria para generar estas ondas se toma del movimiento del barco, lo que resulta en una resistencia adicional.

Resistencia total:

En los ensayos de autopropulsión es posible medir físicamente la resistencia al avance del modelo de las siguientes maneras:

- Resistencia de presión + Resistencia friccional

- Resistencia viscosa + restos
- Resistencia por olas + restos

Estas tres formas pueden combinarse y dar como resultado final lo siguiente:

Resistencia total = Resistencia friccional + Resistencia de presión viscosa + Resistencia por formación de olas

De esta forma, se puede organizar la estructura básica de la resistencia al avance de la siguiente manera:

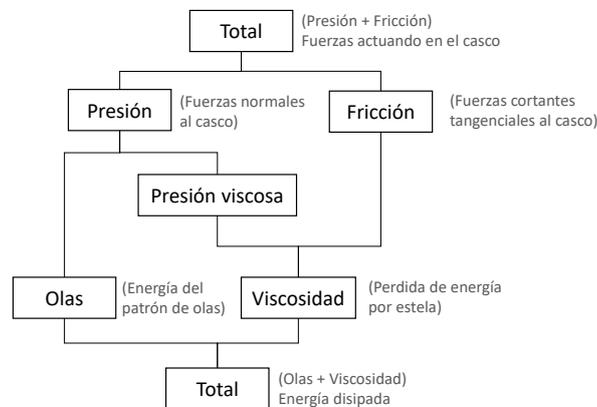


FIGURA N° 2.3: Componentes básicos de la resistencia. Adaptado de Molland et al. (2011)

2.1.1.1 Resistencia por apéndices

Se debe expresar una consideración acerca de los apéndices que influyen en la resistencia total del barco.

Método de Holtrop y Mennen:

Método de calculo descrito en descrito en Molland et al. (2011). Utiliza las siguientes ecuaciones para el cálculo:

$$R_{APP} = \frac{1}{2} \rho V_b^2 C_F (1 + k_2)_E \sum S_{APP} \quad (2.3)$$

y

$$(1 + k_2)_E = \frac{\sum (1 + k_2) S_{APP}}{\sum S_{APP}} \quad (2.4)$$

Donde: V_b es la velocidad del barco, C_F es el coeficiente friccional del barco, S_{APP} representa el área superficial de cada apéndice y $(1 + k_2)$ es el factor de forma de los apéndices.

A continuación se muestra los factores de forma $(1+k_2)$ mas utilizados.

TABLA N° 2.1: Factor de forma en apéndices $(1+k_2)$.

| Tipos de apéndice | Factor de forma $(1+k_2)$ |
|-------------------|------------------------------|
| Pala de gobierno | 1.5 |
| Bocina de codaste | 3 |
| Eje colero | 2 |
| keel cooler | 1.4 |

2.1.2 Métodos de cálculo de resistencia al avance

La resistencia al avance o resistencia total del barco (R_{Tb}) se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$C_{Tb} = \frac{R_{Tb}}{\frac{1}{2}\rho S_w V^2} \quad (2.5)$$

En donde: ρ representa la densidad del fluido, S_w representa a la superficie mojada, y V representa a la velocidad del barco.

Es una magnitud de fuerza difícilmente medible a escala real debido al gran tamaño de los buques y a las condiciones caóticas del flujo real en el mar o en ríos. Por esta razón, el método más factible para calcular estos valores es mediante modelos a escala y una extrapolación a escala real.

Se pueden distinguir tres métodos a seguir para obtener valores aceptables de resistencia al avance:

Pruebas de remolque:

Para medir la resistencia al avance mediante el método de pruebas de remolque, se utiliza un modelo a escala que recorre un canal hidrodinámico en un ambiente controlado. El modelo del barco se sujeta a través de un carro móvil y se desplaza a lo largo del canal. La fuerza que ejerce el agua sobre el modelo se mide mediante un dinamómetro. Luego, utilizando teorías de extrapolación, se aproxima la resistencia total que se ejercerá en el buque real. El modelo tiene completa libertad de movimiento, lo que permite medir las con-

diciones de trimado.

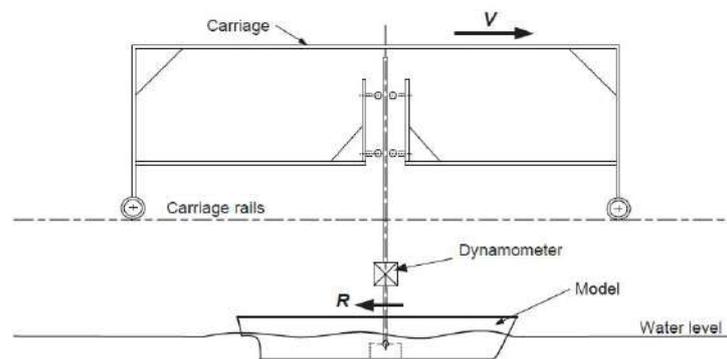


FIGURA N° 2.4: Esquema de ensayo de remolque de modelos. Adaptado de Molland et al. (2011)

Análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD):

Según Fernández (2012), el CFD es un método que utiliza computadoras y técnicas numéricas para analizar y resolver problemas físicos relacionados con los fluidos. Es un método que ha ganado importancia en la última década debido a los avances tecnológicos que han permitido una mayor capacidad de procesamiento por parte de las computadoras.

Al igual que en los ensayos de remolque, un código CFD puede simular un modelo de buque a través de un flujo de agua y luego extrapolarse a escala real. En teoría, es posible simular un buque a escala real, pero el costo computacional sería excesivamente alto.

Cada vez se utiliza más el estudio mediante CFD, e incluso la ITTC (2017) proporciona recomendaciones sobre los parámetros a tener en cuenta para una buena simulación.

Series sistemáticas:

Se denominan series sistemáticas o métodos estadísticos a la recopilación de información realizada por algunos autores, basada en los datos obtenidos a partir de una gran cantidad de ensayos hidrodinámicos en modelos a escala de barcos. Estos datos se recopilan para ciertos tipos de barcos estudiados, y se varían sus coeficientes de forma, como el coeficiente de bloque C_b , la relación eslora-desplazamiento $L/\nabla^{1/3}$, la relación manga-calado B/T y el centro de flotación longitudinal LCB . Generalmente, estas series sistemáticas se utilizan en la fase preliminar de un proyecto, cuando aún no se disponen de los planos del barco.

Existen una gran variedad de series sistemáticas que se utilizan en la industria naval. Según Molland et al. (2011), estas series se pueden clasificar de la siguiente manera:

Barcos de desplazamiento:

- Serie BSRA: Para buques mercantes de una sola hélice y trawlers.
- Serie 60: Para buques mercantes de una sola hélice.
- Holtrop y Mennen: Para gran variedad de buques comerciales y de uso militar, de una sola hélice o dos.

Barcos de semi-desplazamiento:

- Serie 64: Para barcos de semi-desplazamiento de pantoque redondeado (fr: 0.06-1.5).
- Serie NPL: Para barcos de semi-desplazamiento de pantoque redondeado (fr: 0.3-1.1).
- Serie NTUA: Para barcos de semi-desplazamiento con doble codillos.

Barcos de planeo:

- Serie 62: Para barcos de planeo con alto ángulo de astilla muerta y codillo simple.
- Savitsky: Para barcos de planeo con ángulo de astilla muerta constante.

2.1.3 Extrapolación de resultados modelo-buque

Se trata de una técnica ampliamente utilizada para predecir el comportamiento de un buque a tamaño real, basada en pruebas realizadas en un modelo a escala menor. El método se fundamenta en la hipótesis de que el flujo de agua que circula alrededor del modelo es similar al que se produce alrededor del barco de tamaño real, y que las relaciones de escala son aplicables considerando un factor de error adicional. Estas relaciones de escala se establecen mediante leyes de semejanza, las cuales se detallarán a continuación.

2.1.3.1 Ley de semejanza modelo-buque

Propuesta de relación de semejanza entre las características geométricas y dinámicas de un modelo a escala y un buque de tamaño real, de modo que los fenómenos de flujo en ambos casos guarden una relación de similitud.

Para analizar esto, recurrimos al análisis dimensional, mediante el cual establecemos las semejanzas correspondientes. Es importante destacar el teorema de Buckingham,

que nos permite relacionar variables con dimensiones mediante variables adimensionales (Baquero, 2011). Las principales conclusiones de este trabajo arrojan las siguientes relaciones:

$$\text{Coeficiente de empuje} \quad : \quad C_t = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho L^2 V^2}$$

$$\text{Número de Reynolds} \quad : \quad R_n = \frac{LV}{\nu}$$

La relación escalar que

$$\text{Número de Froude} \quad : \quad F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

$$\text{Factores de forma} \quad : \quad \frac{L}{T}; \frac{L}{B}; \frac{B}{T}$$

debe existir entre estas constantes adimensionales para ser utilizadas entre el modelo a escala y el buque se representará de la siguiente forma:

$$\lambda = \frac{L_b}{L_m}; F_{n_m} = F_{n_b} \quad (2.6)$$

Donde el subíndice m representa el modelo y el subíndice p representa al prototipo. A partir de esta última relación de semejanza, se desarrolla el número de Froude para obtener una relación escalar para la velocidad.

$$V_m = \frac{V_b}{\sqrt{\lambda}} \quad (2.7)$$

2.1.3.2 Enfoque de Froude

El método de Froude es un método de extrapolación de datos del modelo en escala reducida al buque real. Froude propone que la resistencia al avance total de un buque se puede descomponer en dos ramas, resistencia friccional y resistencia residual. De esta forma se puede expresar en relación con sus coeficientes de la siguiente forma:

$$C_T = C_F + C_R \quad (2.8)$$

Froude considera el coeficiente friccional en relación a una placa plana con la misma longitud del modelo a estudiar, y el coeficiente residual como un derivado del ensayo en el canal de remolque.

Basándonos en la ley de Froude y considerando el mismo número de Froude para

el modelo y el buque, se obtiene:

$$C_{Rm} = C_{Rb} \quad (2.9)$$

Donde C_{Rm} : representa el coeficiente residual del modelo y C_{Rb} representa el coeficiente residual del buque.

Luego se obtiene:

$$C_{Tb} = C_{Fb} + C_{Rb} = C_{Fb} + C_{Rm} = C_{Fb} + [C_{Tm} - C_{Fm}] \quad (2.10)$$

Donde el subíndice b representa los coeficientes del buque y el subíndice m representa los coeficientes del modelo.

2.1.3.3 Enfoque de Hughes

Hughes introduce un nuevo enfoque de descomposición de la resistencia al avance en función de la resistencia viscosa y la resistencia por formación de olas, teniendo en cuenta el efecto de la forma en la extrapolación.

$$C_T = C_V + C_W \quad (2.11)$$

Donde C_V representa el coeficiente viscoso y C_W representa el coeficiente por formación de olas.

Además, el coeficiente viscoso se puede expresar en función de un factor de forma $(1+k)$, que depende de la forma del casco, y del coeficiente de fricción que se basa en estudios de placa plana.

$$C_V = (1+k)C_F \quad (2.12)$$

De las ecuaciones 2.11 y 2.12 se deduce:

$$C_T = (1+k)C_F + C_W \quad (2.13)$$

Ademas, basándonos en la ley de froude se deduce:

$$C_{Wb} = C_{Wm} \quad (2.14)$$

Y de las ecuaciones 2.12, 2.13 y 2.14 se deduce:

$$C_{Tb} = C_{Tm} - (1+k)(C_{Fm} - C_{Fb}) \quad (2.15)$$

2.1.3.4 Método ITTC 1978

La Conferencia Internacional de Tanques de Remolque (ITTC, por sus siglas en inglés) ha llegado a una conclusión unificada para la predicción de la resistencia al avance, basándose en los estudios de diversos autores como Hughes, Froude, entre otros. El método se basa en la premisa principal de considerar los errores de escala derivados de los ensayos de modelos y combinarlos en una sola fórmula. A continuación se presenta el resultado descrito en Molland et al. (2011).

$$C_{Tb} = (1+k)C_{Fb} + C_R + \Delta C_F + C_{AA} \quad (2.16)$$

La ITTC prefiere considerar el valor del coeficiente residual en lugar del valor del coeficiente de formación de olas. El valor del coeficiente residual se basa en la deducción realizada por la ITTC:

$$C_F = \frac{0.075}{[\log_{10} Re - 2]^2} \quad (2.17)$$

Al igual que en el método de Froude, se considera la igualdad entre el modelo y el buque para el coeficiente residual, lo que lleva a la siguiente deducción:

$$C_R = C_{Tm} - (1+k)C_{Fm} \quad (2.18)$$

El valor de la tolerancia de rugosidad ΔC_F viene dada por:

$$\Delta C_F = \left[105 \left(\frac{k_S}{L} \right)^{1/3} - 0.64 \right] x 10^{-3} \quad (2.19)$$

Donde k_S representa la altura de grano en la rugosidad del buque, si se desconoce se recomienda utilizar $k_S = 150x10^{-6}$ (Molland et al., 2011).

El coeficiente de resistencia por el aire C_{AA} viene dada por la siguiente ecuación:

$$C_{AA} = 0.001 \frac{A_T}{S} \quad (2.20)$$

2.1.3.5 Factor de forma(1+k)

El factor de forma es una corrección que se realiza debido a la forma y tamaño del casco del barco. Su uso se sustenta en el error que se produce al extrapolar valores de un modelo a escala a un buque real. Existen varios métodos para calcularlo, a continuación se mencionan algunos:

Método experimental:

El método experimental utiliza modelos a escala en un canal de remolque que se recorre a bajas velocidades para obtener números de Froude bajos. Esto permite encontrar una relación entre el coeficiente total C_T y el coeficiente de fricción C_F , ya que el coeficiente de formación de olas que se encuentra en las fórmulas tiende a cero debido al bajo número de Froude. Prohaska, basándose en esto, propone la siguiente formulación:

$$\frac{C_T}{C_F} = (1+k) + A \frac{Fr^4}{C_F} \quad (2.21)$$

En donde A es una constante que se obtiene experimentalmente a partir de varios puntos encontrados siguiendo las relaciones entre $\frac{C_T}{C_F}$ y $\frac{Fr^4}{C_F}$, como se observa en la ver Figura N° 2.5.

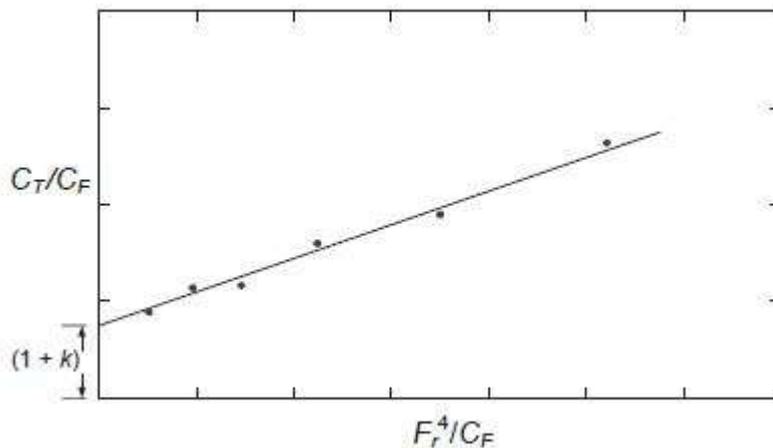


FIGURA N° 2.5: Gráfica de Prohaska. Adaptado de Molland et al. (2011)

Modelos empíricos:

Existen varias formulaciones que se han desarrollado a partir de ensayos experimentales.

A continuación, se mencionan algunos métodos extraídos de Molland et al. (2011):

Watanabe:

$$k = -0.095 + 25.6 \frac{C_B}{\left[\frac{L}{B}\right]^2 \sqrt{\frac{B}{T}}} \quad (2.22)$$

Conn and Ferguson:

$$k = 18.7 \left[C_B \frac{B}{L} \right]^2 \quad (2.23)$$

Grigson(basado en la ITTC):

$$k = 0.028 + 3.30 \left[\frac{S}{L^2} \sqrt{C_B \frac{B}{L}} \right] \quad (2.24)$$

2.2 Estimación de potencia motora

La energía generada por el motor va perdiendo eficiencia a medida que se transmite hacia el propulsor principal, en este caso, la hélice, y debe ser suficiente para desplazar el barco a la velocidad requerida. Durante este proceso, se pueden identificar diferentes etapas de pérdida, como se muestra en la Figura N° 2.6. Cada una de estas etapas forma parte del sistema de propulsión y es importante comprenderlas, ya que esto afectará el cálculo de la potencia necesaria. Es importante comprender los conceptos del sistema propulsivo para seleccionar el motor marino adecuado que alimente eficientemente todo el sistema de propulsión.

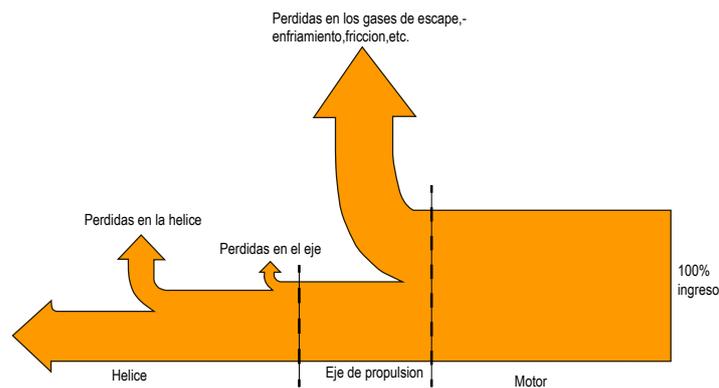


FIGURA N° 2.6: Distribución de energía en el barco. Adaptado de Nguyen et al. (2021)

2.2.1 Distribución de la potencia

Para comprender cómo se distribuye la energía necesaria para desplazar el barco en el sistema propulsivo, es importante realizar un desglose de las etapas que permita

comprender más detalladamente cada fase del proceso. En la Figura N° 2.7 se ilustran las etapas en las que se distribuye la potencia (energía).

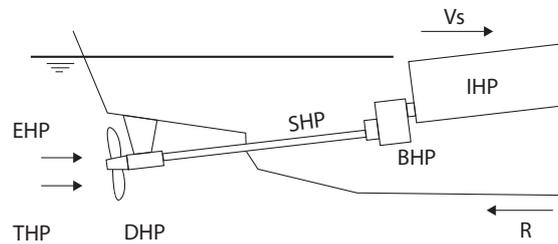


FIGURA N° 2.7: Distribución de potencia en el sistema propulsivo. Adaptado de Putra et al. (2017)

Se puede definir cada etapa en función de la zona en donde actúa:

- EHP: Potencia efectiva
- THP: Potencia de empuje
- DHP: Potencia entregada a la hélice
- SHP: Potencia en el eje propulsor
- BHP: Potencia al freno del motor
- IHP: Potencia indicada del motor

Como se ha mencionado previamente, en el sistema de propulsión se produce una pérdida de energía. Esta pérdida se puede entender como una medida de eficiencia que relaciona cada etapa de potencia, tal como se muestra en la Figura N° 2.8.

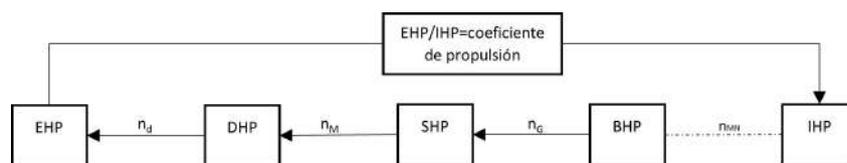


FIGURA N° 2.8: Relación de eficiencia del sistema propulsivo. Fuente propia.

Donde:

- n_d : Eficiencia cuasi-propulsiva
- n_M : Eficiencia mecánica del eje, (0.97-0.98) según Ghose y Gokarn (2004).
- n_G : Eficiencia de transmisión marina, (0.94-0.96) según Ghose y Gokarn (2004).
- n_{MN} : Rendimiento mecánico del motor

La relación que existe entre la potencia indicada (*IHP*) y la potencia efectiva (*EHP*) se conoce como coeficiente de propulsión, y el rango común de valores va de 0.55 a 0.75 (Bonilla, 1979). A continuación, se definen cada uno de los componentes de la potencia propulsora:

Potencia efectiva (EHP): Es la potencia requerida por el barco para desplazarse y vencer la resistencia al avance. Esta potencia se calcula en función de la resistencia al avance y la velocidad de movimiento.

$$EHP = R_t \times V \quad (2.25)$$

Donde R_t es la resistencia total del barco, y V es la velocidad del barco en metros por segundo (m/s).

Potencia de empuje (THP): Es el empuje que la hélice genera para desplazar el barco. En otras palabras, esta potencia representa la fuerza propulsora que la hélice ejerce sobre el agua, lo que permite que el barco se mueva hacia adelante.

$$THP = T \times V_a \quad (2.26)$$

Donde T es el empuje de la hélice y V_a es la velocidad del agua que recorre la hélice (velocidad de avance).

Potencia entregada a la hélice (DHP): Es la potencia requerida por el propulsor y se refiere a la energía necesaria para hacer funcionar el propulsor, como por ejemplo la hélice en el caso de propulsores convencionales. Sin embargo, para calcular esta potencia, es importante considerar varios factores que afectan al rendimiento del propulsor, incluyendo el diseño de la hélice y cómo interactúa con la carena del casco del barco.

Los *DHP* se relacionan con los *EHP* mediante la eficiencia cuasi-propulsiva según la siguiente ecuación:

$$DHP = \frac{EHP}{n_d} \quad (2.27)$$

La eficiencia cuasi-propulsiva está relacionada directamente con la relación hélice-carena, la cual se descompone en n_0 : eficiencia del propulsor, n_h : eficiencia del casco, y n_r : eficiencia rotativa relativa. Estas eficiencias se expresan de la siguiente manera:

$$n_d = n_0 \times n_h \times n_r \quad (2.28)$$

Potencia en el eje (SHP): La potencia en el eje se refiere a la energía que se trans-

mite desde el motor de la embarcación hasta la hélice, a través del eje. Por lo general, esta medida se obtiene a bordo de la embarcación, lo más cerca posible de la hélice, mediante un dispositivo llamado torsiómetro. El torsiómetro mide el ángulo de torsión que se produce entre dos secciones del eje, el cual está directamente relacionado con el par que se transmite. Para un eje circular macizo, la potencia en el eje se puede calcular utilizando la siguiente fórmula (Lewis, 1988):

$$\frac{\pi(d_s)^4 G \theta n}{32 L_s} \quad (2.29)$$

Donde:

d_s : Diámetro del eje, m.

G : Modulo de elasticidad de ruptura del material.

θ : Ángulo de giro, grados.

L_s : Longitud del eje sobre el que se mide θ , m.

n : Revoluciones por segundo.

El número de módulo de elasticidad de ruptura G para ejes de acero se toma usualmente como 8.35×10^7 , kN/m² según Lewis (1988).

Para cálculos teóricos se utiliza la eficiencia del eje (n_M) para relacionar los DHP de la siguiente manera:

$$SHP = \frac{DHP}{n_M} \quad (2.30)$$

Potencia al freno (BHP): La potencia de frenado es la potencia que el motor puede producir y transmitir al sistema de propulsión. Se mide físicamente en el volante del motor mediante un freno mecánico, hidráulico o eléctrico utilizando un dinamómetro. Se determina mediante una prueba en taller y se calcula mediante la fórmula (Lewis, 1988):

$$BHP = 2\pi Q n \quad (2.31)$$

Donde Q es el torque de freno, $kN - m$ y N es el número de revoluciones.

Para cálculos teóricos se utiliza la eficiencia de la transmisión (n_G) para relacionar los SHP de la siguiente manera:

$$BHP = \frac{SHP}{n_G} \quad (2.32)$$

Potencia indicada(IHP): La potencia indicada se mide en los cilindros mediante un

instrumento, conocido como indicador, que registra continuamente la presión del vapor o del gas a lo largo del recorrido del pistón. Esta potencia se refiere a la potencia teórica que se obtendría si no hubiera pérdidas de energía debido a la fricción, la ineficiencia mecánica y otros factores. La fórmula teórica de cálculo, según Lewis (1988), es la siguiente:

$$IHP = p_M L A n \quad (2.33)$$

Donde:

p_M : Presión efectiva. kN/m^2

L : Longitud de la carrera del pistón, m.

A : Área efectiva del pistón, m^2 .

n : Número de carreras de trabajo por segundo.

2.2.2 Proceso de estimación de potencia

En el proceso para estimar la potencia propulsiva, se llevan a cabo varias etapas de análisis que han sido bien explicadas en Molland et al. (2011). A continuación, se detallan estas etapas:

En la primera etapa, se calcula la resistencia total en aguas calmas según lo detallado en la sección 2.1. Posteriormente, se estima la potencia efectiva mediante la ecuación 2.25.

En la segunda etapa, se calcula el coeficiente cuasi-propulsivo (n_d) de la hélice, lo cual es importante para determinar la potencia entregada a la hélice (DHP), que se calcula utilizando la ecuación 2.27. El cálculo de la eficiencia cuasi-propulsiva está relacionado con la interacción entre el casco y la hélice, y se detallará en el siguiente apartado.

En la tercera etapa del proceso de estimación de la potencia propulsiva, se busca obtener un factor de correlación (SCF) entre el modelo y el buque real, debido a la influencia de la escala entre ambos. Esto corrige errores en los ensayos de autopropulsión de la hélice. El valor de SCF ajusta los DHP para una representación más precisa de la situación del buque.

En la cuarta etapa, se consideran las pérdidas en el eje de propulsión y la transmisión marina. Esto se hace para calcular la potencia al freno (BHP) requerida por el motor,

teniendo en cuenta las pérdidas asociadas a estos componentes.

En la quinta y última etapa, se agrega potencia adicional para contemplar factores como la rugosidad del casco, el ensuciamiento y las condiciones climáticas. Esto se hace para asegurar que el motor instalado tenga la potencia de reserva necesaria para afrontar estas situaciones.

El proceso completo se puede observar en la Figura N° 2.9.

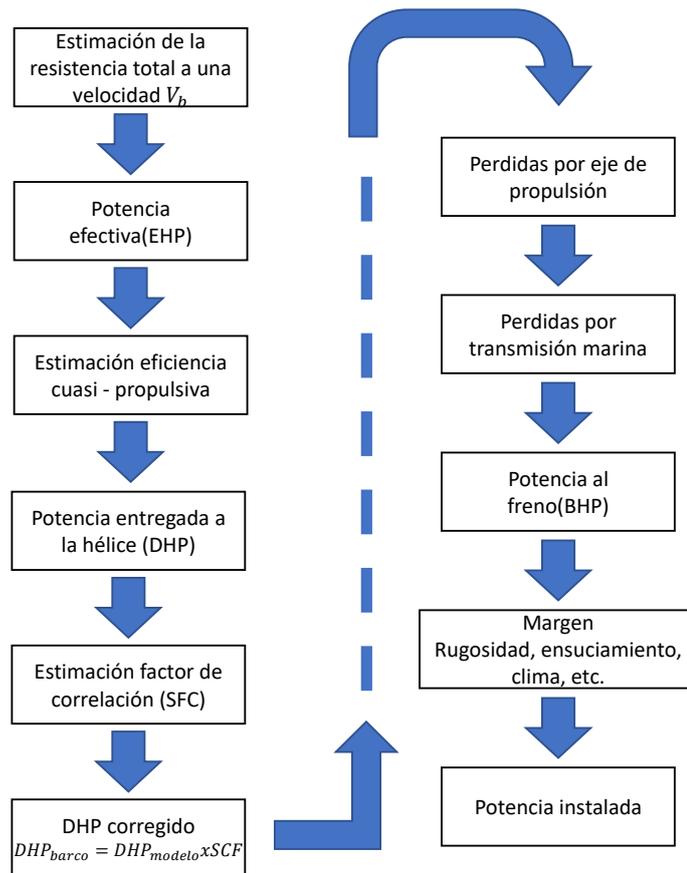


FIGURA N° 2.9: Proceso de estimación de potencia. Adaptado de Molland et al. (2011)

2.2.3 Eficiencia cuasi-propulsiva

Como se mencionó en el apartado anterior, la eficiencia cuasi-propulsiva relaciona la pérdida de energía que existe entre la potencia entregada a la hélice y la potencia efectiva (ecuación 2.27). Esta medida se refiere a la capacidad que tiene la hélice de convertir la energía del sistema propulsivo en empuje para el barco. La eficiencia cuasi-propulsiva, como se observa en la ecuación 2.28, está conformada por la eficiencia del propulsor n_0 , la eficiencia del casco n_h y la eficiencia rotativa relativa n_r . Cada una se describirá a conti-

nuación.

2.2.3.1 Eficiencia del propulsor n_0

La eficiencia de una hélice en aguas abiertas está estrechamente ligada a tres parámetros básicos: el diámetro de la hélice, la relación entre el paso y el diámetro (P/D) y la relación entre el área de las palas proyectadas y el área del disco (BAR). Esto significa que la eficiencia del propulsor dependerá en gran medida del diseño de la hélice.

Para determinar la eficiencia de una hélice, se han llevado a cabo estudios de los efectos de empuje y torque que se generan a ciertas revoluciones n y a distintas velocidades de flujo. Estos ensayos se denominan ensayos de auto-propulsión, y existen varios estudios ya realizados, tales como los ensayos de la serie Wageningen, GAWN, Kaplan y otros.

Los ensayos de auto-propulsión miden varios parámetros que se utilizan para diseñar una hélice y determinar la eficiencia del propulsor. Estos parámetros incluyen el coeficiente de empuje (K_T), el coeficiente de torque o par (K_Q) y la eficiencia del propulsor (n_0). En la Figura N° 2.10 se muestran estos parámetros expresados de manera gráfica.

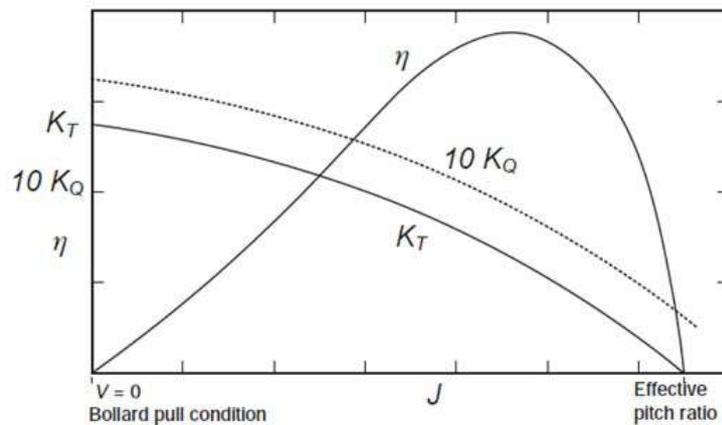


FIGURA N° 2.10: Gráfica de $K_T - K_Q$ en aguas abiertas para un paso determinado. Adaptado de Molland et al. (2011)

Mediante análisis dimensional se llega a los siguientes resultados que relacionan los coeficientes del propulsor:

$$K_T = T / \rho n^2 D^4; \quad K_Q = Q / \rho n^2 D^5; \quad J = V_a / nD \quad (2.34)$$

Y la eficiencia del propulsor se puede escribir en base a sus coeficientes adimensio-

nales de la ecuación 2.32 de la siguiente manera:

$$\eta_0 = \frac{JK_T}{2\pi K_Q} \quad (2.35)$$

Como se mencionó previamente, se han llevado a cabo numerosos estudios sobre diferentes perfiles de hélices. En particular, se utilizará en esta tesis la reconocida serie B de Wageningen, la cual ha demostrado ser altamente efectiva en buques de pesca. Esta serie abarca un amplio rango de estudio que incluye diversas características y parámetros (ver Tabla N° 2.2).

TABLA N° 2.2: Características de todas la familias de la serie B de Wageningen. Adaptado de Baquero (2011)

| Número de palas | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--|-------|------|-------|-------|------|------|
| Relación DAR A_d/A_0 | | | 0.40 | | | |
| | | | 0.35 | 0.45 | | |
| | 0.30 | 0.50 | 0.55 | 0.60 | 0.50 | 0.55 |
| | 0.38 | 0.65 | 0.70 | 0.75 | 0.65 | 0.70 |
| | | 0.80 | 0.85 | 1.05 | 0.80 | 0.85 |
| | | 1.00 | | | | |
| Relación P/D | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| | a | a | a | a | a | a |
| | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 |
| Relación de espesores t/D | 0.055 | 0.05 | 0.045 | 0.4 | - | - |
| Relación $\frac{D_{nucleo}}{D_{helice}}$ | 0.18 | 0.18 | 0.167 | 0.167 | - | - |
| Relación $\frac{H_{0.20}}{P_{0.7}}$ | 1 | 1 | 0.8 | 1 | - | - |
| Ángulo de lanzamiento | 15 | 15 | 15 | 15 | - | - |

Como dato adicional, se han elaborado ecuaciones de polinomios que se ajustan a las curvas K_t - K_q de Wageningen (ecuaciones 2.36 y 2.37). Estas ecuaciones están diseñadas para un número de Reynolds de 2×10^6 . Las constantes se encuentran en el Anexo A.

$$K_T = \sum_{n=1}^{39} C_n(J)^{S_n} (P/D)^{t_n} (A_E/A_0)^{u_n} (z)^{v_n} \quad (2.36)$$

$$K_Q = \sum_{n=1}^{47} C_n(J)^{S_n} (P/D)^{t_n} (A_E/A_0)^{u_n} (z)^{v_n} \quad (2.37)$$

Estas ecuaciones polinomiales, al tener un enfoque matemático, pueden ser adaptadas por software de cálculo, como es el caso de NavCad, como menciona Tadros et al. (2021).

El procedimiento para calcular la eficiencia del propulsor (η_0) está completamente

ligado al diseño de la hélice y se interpreta como sigue:

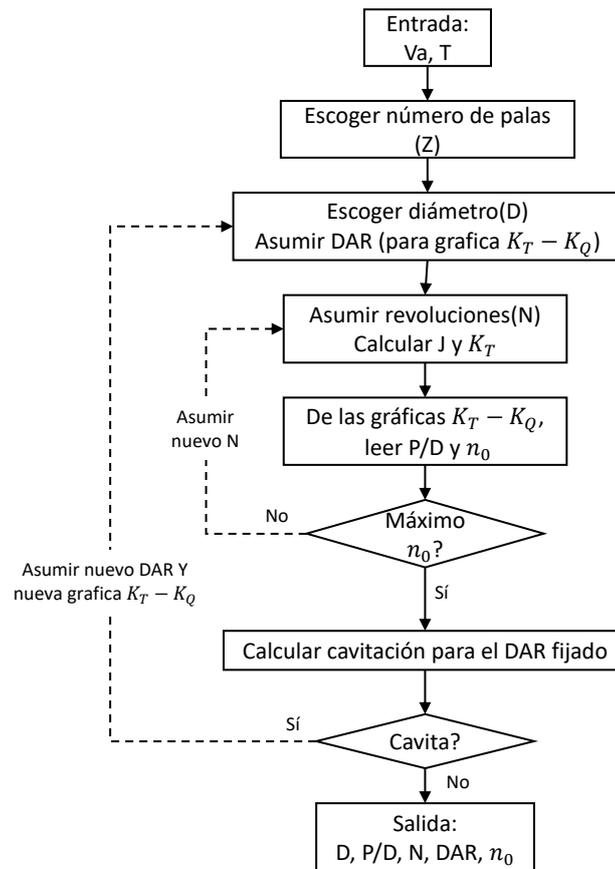


FIGURA N° 2.11: Proceso típico de diseño hélices. Adaptado de Molland et al. (2011)

Este es un proceso iterativo en el cual como datos de entrada se tienen la velocidad de avance (V_a) y el empuje del propulsor (T), los cuales se calculan según las ecuaciones 2.40 y 2.45.

Los datos a seleccionar para seguir con el proceso son el diámetro de la hélice (D), el número de palas (Z), el valor de la relación de áreas (DAR), las revoluciones del propulsor (N), el paso de la hélice y la cavitación, los cuales se resumen a continuación.

Número de palas (Z):

Este valor se elige en relación con la frecuencia de vibración que produce la hélice y su eficiencia. En el caso de barcos de pesca, los valores comunes para el número de palas son 3, 4 o 5 (Baquero, 2011).

Diámetro de la hélice (D):

Se ajusta en base al espacio máximo permitido por el barco, teniendo en cuenta los

espacios entre la hélice y el casco. Esto se debe a las influencias de vibración y a la cantidad de flujo que circula alrededor de la hélice. Según Wilson (2005), la distribución de espacios que se debe tener en consideración es la siguiente:

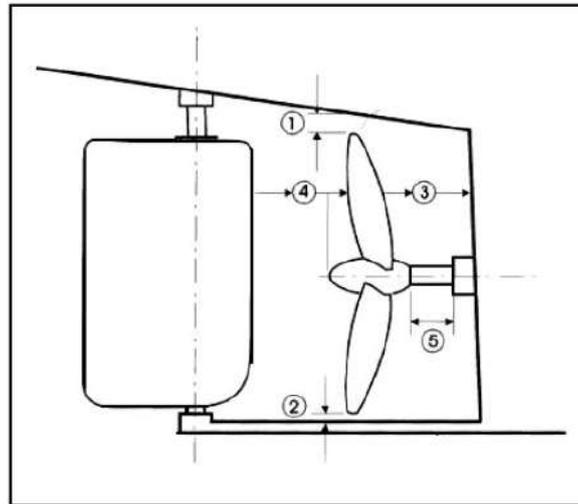


FIGURA N° 2.12: Distancias de protección de la hélice. Adaptado de Wilson (2005)

La Figura N° 2.12 se basa en los márgenes permitidos de la siguiente tabla:

TABLA N° 2.3: Distancias de protección de la hélice. Adaptado de Wilson (2005)

| (% del diámetro de la hélice) | |
|--|----------------------|
| 1. Distancia mínima entre las puntas de las palas y el casco | 17 % |
| 2. Distancia mínima entre las puntas de las palas y la quilla | 4 % |
| 3. Distancia mínima entre el dormido de popa y la hélice a un 35 % del diámetro de la hélice | 27 % |
| 4. Distancia máxima entre la hélice y el timón a un 35 % del diámetro de la hélice | 10 % |
| 5. Distancia máxima al extremo del eje libre | 4 x diámetro del eje |

Paso de la hélice P :

Se puede entender como paso de una hélice al avance que da la misa en un giro de 360° , mientras mayor sea el paso, más avance tendrá la hélice. El método común para medir el paso se vasa en la norma ISO 484-2 (Van et al., 2021), la cual se vasa en la siguiente formula:

$$Paso = \frac{\Delta h * 360^\circ}{\Theta^\circ} \quad (2.38)$$

Donde Δh es la diferencia de alturas entre los puntos de intersección entre un diámetro trazado al 70 % del radio de la hélice y el contorno de una pala, y Θ es el ángulo entre los mismos puntos proyectados.

Relación de área desarrollada-disco(DAR):

La proporción existente entre el área desarrollada de todas las caras de las palas de la hélice y el área del disco que encierra a la totalidad de la misma (A_d/A_0) es conocida como *DAR*. Además, existe otra relación denominada *EAR* que relaciona el área expandida de las palas con el área del disco. En el uso práctico, el valor de *DAR* es muy similar al valor de *EAR*, por lo que a menudo se consideran iguales. También existe la relación área proyectada-área disco (*BAR*). Las tres denominaciones sirven para identificar la relación de áreas de las palas y se pueden seleccionar inicialmente según la tabla 2.2, aunque es posible que deban corregirse si no cumplen los criterios de cavitación. Al asumir el valor del *DAR*, se podrá escoger la gráfica $K_T - K_Q$ correspondiente dentro de los graficas propuestas por la serie B de Wageningen.

Revoluciones de la hélice(N):

Indica la velocidad de rotación de la hélice, la cual, al igual que el *DAR*, es un parámetro que se debe estimar inicialmente para luego ser ajustado hasta encontrar los valores óptimos de P/D y n_0 .

Cavitación de la hélice:

Para evaluar la cavitación se utilizara el numero de Keller para determinar la relación A_D/A_0 mínima, el cual según Baquero (2011) depende de la siguiente ecuación:

$$\frac{A_D}{A_0} = \frac{(1.3 + 0.3 * Z) * T}{(P_0 - P_V) * D^2} + K \quad (2.39)$$

Donde:

- Z: Número de palas.
- T: Empuje de hélice, definido en ecuación 2.34, kgf
- $P_0 - P_V = 10100 + 1026 * h$, kg/m²
- h: inmersión de la hélice, m
- D: Diámetro de la hélice, m
- K: 0.2 para 1 hélice en material bronce (más comunes en fabricación).

2.2.3.2 Eficiencia del casco(n_h)

La eficiencia del casco de un barco depende de la relación entre el casco y la hélice, debido a que el flujo de agua que fluye alrededor del casco sufre perturbaciones debido a la viscosidad del fluido y a la capa límite. Esto significa que la velocidad del agua disminuye cuando se acerca al área de la hélice. Este fenómeno de perturbación del flujo de agua producto de la influencia del casco se llama estela, y su estudio radica en el coeficiente de estela (w_t). Además, determinar adecuadamente la cantidad de empuje proporcionado por la hélice es importante para entender cómo afecta el flujo de agua a la velocidad que llega a la hélice. Se puede resumir la relación de eficiencia entre el empuje y el flujo circulante por la hélice en la siguiente relación:

$$n_h = \frac{(1-t)}{(1-w_t)} \quad (2.40)$$

Donde t es el coeficiente de deducción de empuje y w_t es el coeficiente de estela efectiva.

Coeficiente de estela efectiva:

Como se mencionó anteriormente, la estela es una perturbación del agua producida por la influencia del casco en el fluido. Este fenómeno conlleva a una disminución de la velocidad del agua en zonas cercanas al casco del barco, especialmente en la popa del barco, cerca de la hélice.

Existe una relación entre la velocidad del avance (V_a) que fluye alrededor de la hélice y la velocidad del barco (V_b), que se conoce como el coeficiente de estela efectiva (w_t).

$$w_t = \frac{V_b - V_a}{V_b} \quad (2.41)$$

De donde se puede deducir la relación entre la velocidad de avance (V_a) y la velocidad del barco (V_b).

$$V_a = V_b \times (1 - w_t) \quad (2.42)$$

El método clásico para estudiar el coeficiente de estela efectiva es a partir de ensayos autopropulsivos, en los cuales se mide la velocidad del agua que fluye a través de la zona cercana a la hélice. El método más común para realizarlo es mediante tubos de Pitot.

Este proceso consiste en la colocación de tubos en diferentes zonas del modelo a escala, uno en la zona de proa del casco y otro en diferentes partes de la zona de la hélice. Así, mediante la diferencia de alturas, se puede determinar la velocidad del fluido, tal como se aprecia en la Figura N° 2.13.

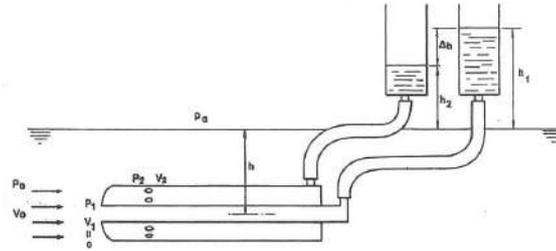


FIGURA N° 2.13: Medición de velocidad de hélice por tubos de Pitot. Adaptado de Baquero (2011)

Otro método menos común para el estudio del coeficiente de estela efectiva es utilizando simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD). Según Molland et al. (2011), es posible realizar un estudio CFD mediante simulaciones RANS enfocándose en estudiar las velocidades del fluido en la zona de la hélice.

Por otra parte, existen métodos estadísticos experimentales basados en estudios de diferentes autores. A continuación, se detallan algunos métodos mencionados en (Molland et al., 2011):

Harvald - Barcos de una sola hélice:

Este método depende del coeficiente de bloque (C_b) y de la relación de L/B . Además, se señala que es adecuado para el rango de C_b de 0.525 a 0.75 y de L/B de 5.0 a 8.0.

$$w_T = [1.095 - 3.4C_B + 3.3C_B^2] + \left[\frac{0.5C_B^2(6.5 - L/B)}{L/B} \right] \quad (2.43)$$

Taylor:

$$W_T = 0.50C_B - 0.05 \quad (2.44)$$

G. van Oortmerssen:

Oortmerssen (1971) propone un método aplicable a la programación por medio de polinomios dependientes del número de Froude y de la forma del casco. Este método se estudia principalmente para embarcaciones pequeñas, siendo ideal para el caso de la presente tesis. La ecuación se plantea de la siguiente forma:

$$W_T = e_{2.0} + e_{2.1}C_P + e_{2.2}C_P^2 + e_{2.3}C_P F_n + e_{2.4}C_P F_n^2 + e_{2.5}C_P \cdot lcb + e_{2.6} \frac{L_D}{B} + e_{2.7} \frac{L_D}{D} \quad (2.45)$$

Donde:

- lcb : Centro de flotación longitudinal respecto a la eslora de desplazamiento en proa (en porcentaje).
- L_D : Eslora de desplazamiento, representada por:
($L_{PP} + L_{WL}$)/2.
- F_n : Representa al número de Froude en base a L_D .
- C_P : Representa al coeficiente prismático en base a L_D .

Las constantes $e_{i,0}, e_{i,1}, e_{i,2}, etc$ se obtienen en base a la Tabla N° 2.4

TABLA N° 2.4: Valores $e_{i,j}$ para los polinomios de los coeficientes de propulsión. Adaptado de Oortmerssen (1971)

| i= | 1 | 2 | 3 |
|-----------|----------|----------|----------|
| $e_{i,0}$ | -0.93290 | 0.72681 | 0.03814 |
| $e_{i,1}$ | 3.94349 | -1.74379 | 3.69241 |
| $e_{i,2}$ | -2.98757 | 1.37241 | -2.86213 |
| $e_{i,3}$ | -0.98059 | 0.26229 | -0.33299 |
| $e_{i,4}$ | 1.04860 | -0.22019 | -0.70954 |
| $e_{i,5}$ | 0.00490 | 0.01379 | -0.00204 |
| $e_{i,6}$ | 0.00228 | -0.00786 | -0.00336 |
| $e_{i,7}$ | -0.00152 | 0.00216 | -0.35000 |

Coefficiente de deducción de empuje:

Según Baquero (2011), la hélice ejerce una acción sobre el casco de un barco a la que se le denomina succión. Esta succión provoca que la resistencia aumente cuando se monta la hélice en el barco, haciendo necesario que la hélice genere un empuje T mayor que la resistencia R del barco para provocar el desplazamiento del mismo. Todo esto se refleja en el coeficiente de empuje t de la siguiente manera:

$$t = \frac{(T - R)}{T} \quad (2.46)$$

Al igual que el coeficiente de estela efectiva, el coeficiente de deducción de empuje puede medirse en los ensayos de autopropulsión. Además, existen fórmulas empíricas basadas en ensayos en modelos a escala. A continuación, se presentan algunas de ellas:

Taylor:

Taylor propuso una fórmula que está en relación directa con el coeficiente de estela efectiva. Esta relación se obtiene tanto para barcos con una hélice como para barcos con dos hélices (Baquero, 2011).

Para barcos de 1 hélice

$$t = 0.6w_T \quad (2.47)$$

Para barcos de 2 hélices

$$t = 0.7w_T + 0.06 \quad (2.48)$$

G. van Oortmerssen:

Oortmerssen (1971) propone una ecuación polinómica de la siguiente manera:

$$t = e_{1.0} + e_{1.1}C_P + e_{1.2}C_P^2 + e_{1.3}C_P F_n + e_{1.4}C_P F_n^2 + e_{1.5}C_P.lcb + e_{1.6}\frac{L_D}{B} + e_{1.7}\frac{L_D}{D} \quad (2.49)$$

Donde los valores de $e_{i,j}$ se mencionan en la Tabla N° 2.4.

2.2.3.3 Coeficiente rotativo relativo(n_r)

El coeficiente relativo rotativo relaciona la eficiencia propulsiva (n_0) del estudio de hélices en aguas libres, donde no hay influencia de un casco, y una hélice detrás de la carena de un barco. La principal diferencia entre una hélice en aguas abiertas y una hélice detrás de la carena es el par absorbido (Q), el cual varía debido a la influencia del campo de velocidades en ambos casos y el flujo turbulento (Baquero, 2011).

$$n_r = \frac{Q_0}{Q} \quad (2.50)$$

Donde Q_0 representa el par absorbido para la hélice en aguas libres y Q representa el par absorbido para la hélice detrás de la carena.

Oortmerssen (1971) hizo una relación polinómica para barcos pequeños, la cual se presenta a continuación:

$$n_r = e_{3.0} + e_{3.1}C_P + e_{3.2}C_P^2 + e_{3.3}C_P F_n + e_{3.4}C_P F_n^2 + e_{3.5}C_P.lcb + e_{3.6}\frac{L_D}{B} + e_{3.7}\frac{L_D}{D} \quad (2.51)$$

Donde los valores de $e_{i,j}$ se mencionan en la Tabla N° 2.4.

2.2.4 Factor de correlación SCF

El factor de correlación toma en consideración el error que se obtiene al escalar valores del modelo al barco real. Estos valores tienen mucha más importancia en barcos de gran tamaño, baja velocidad y alto C_B (Molland et al., 2011). Aunque es necesario mencionarlo debido a la influencia que puede tener en los resultados. Cabe destacar que el factor de correlación estudia los valores resultantes de una extrapolación y los compara con valores reales de otros barcos para llegar a un análisis correcto.

Dentro de los factores de correlación a tener en cuenta, se encuentra la corrección de la potencia entregada a la hélice (DHP), que difiere entre los valores obtenidos en las pruebas de remolque y los valores reales de la siguiente manera:

$$DHP_N = (1 + x)DHP \quad (2.52)$$

En la ecuación (2.52), el valor de $(1 + x)$ representa el factor de correlación del barco, también conocido como SCF en inglés, y depende en gran medida de la forma del barco, especialmente de su longitud (Molland et al., 2011).

La forma de determinar el factor de correlación se basa originalmente en la comparación de una gran cantidad de ensayos de remolque en barcos similares al estudiado. Sin embargo, gracias a los estudios realizados, se han formulado ecuaciones matemáticas que, mediante análisis estadísticos, predicen el error de escala. En 1978, durante una conferencia de la ITTC, se adoptó una fórmula que engloba el factor de correlación mediante la ecuación 2.16. Esta fórmula incluye un factor de forma $(1 + k)$ y tiene en cuenta la tolerancia por variación de rugosidad entre el modelo y el buque.

2.2.5 Curvas de desempeño del propulsor y motor

Las curvas de desempeño reflejan los resultados experimentales o teóricos del comportamiento del propulsor, en este caso una hélice, y del motor marino. Es importante conocer el funcionamiento de estas curvas, ya que a partir de ellas se realizará el análisis para determinar la propulsión óptima de nuestro barco.

Curva del motor:

La curva del motor representa el comportamiento del motor para distintas revoluciones del mismo. Cada fabricante de motores suele proporcionar las especificaciones técnicas de estas curvas, que incluyen las curvas de potencia, torque y consumo. Estas curvas son fundamentales para determinar qué motor es el más adecuado para un proyecto específico.

Las curvas de potencia nos ayudan a definir la potencia máxima de trabajo y a diseñar la hélice de manera adecuada. El fabricante las proporciona basándose en ensayos experimentales en los cuales se determina la potencia al freno del motor (*BHP*, por sus siglas en inglés).

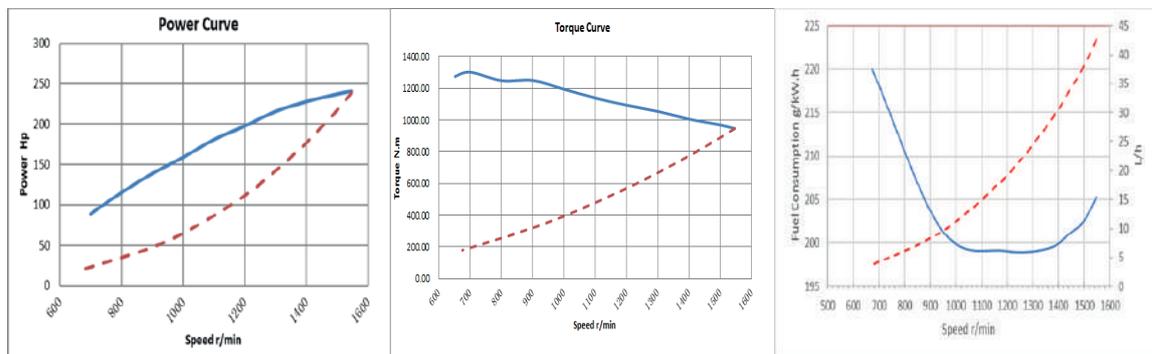


FIGURA N° 2.14: Curvas de motor Weichai. Fuente: Olivos Maquinarias S.A.C

Curva de hélice:

La curva de la hélice representa la potencia que demanda la hélice al motor. Es indispensable analizar esta curva con el fin de determinar si el diseño de nuestra hélice puede trabajar en óptimas condiciones con el motor. Un diseño erróneo de la hélice puede provocar sobrecargas en el motor, las cuales se pueden ver reflejadas en la curva de la hélice.

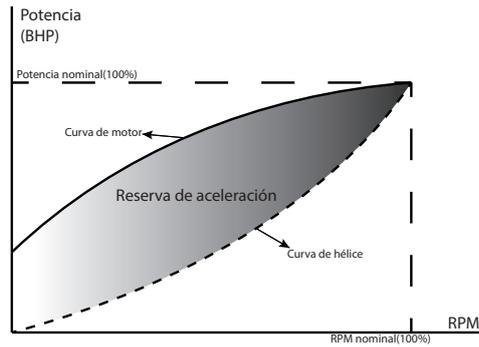


FIGURA N° 2.15: Curva de hélice marina. Fuente propia.

La Figura N° 2.15 muestra en un mismo gráfico la curva de la hélice y la curva de potencia del motor. Como se puede observar, la curva de la hélice interseca en el punto más alto con la curva del motor. Idealmente, esta intersección representa la potencia máxima que puede desarrollar la hélice y coincide con la potencia máxima del motor. La diferencia entre la curva de la hélice y la curva del motor se denomina reserva de aceleración y se utiliza en casos dinámicos donde la maniobrabilidad del barco requiere aceleraciones y desaceleraciones del motor (Gotz et al., 2005).

2.2.6 Margen de proyecto

El margen de proyecto es una forma de tener en cuenta las posibles condiciones adversas que puedan afectar al barco y hacer que exija una mayor potencia de la estimada inicialmente.

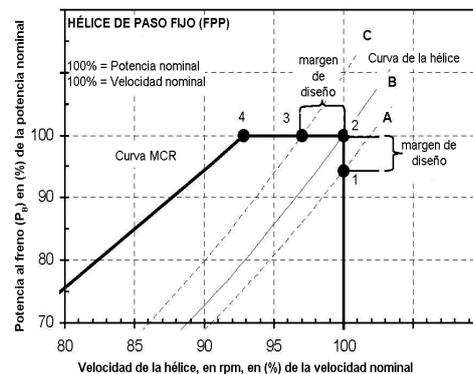


FIGURA N° 2.16: Elección del punto de proyecto para una hélice de paso fijo. Adaptado de Gotz et al. (2005).

Gotz et al. (2005) propone un procedimiento estándar para la delimitación del margen de proyecto y, por ende, la selección del motor y la hélice. Según el autor, como se sugiere

en la Figura N° 2.16, la hélice debe ser diseñada en el punto 1, lo cual permite que en condiciones de mala mar, incrustaciones en el casco o desgaste del motor, la curva de la hélice se desplace hacia la izquierda y llegue al punto 2, que representa la curva ideal de la hélice. La diferencia entre la potencia nominal y la potencia de proyecto se llama margen de proyecto y normalmente se encuentra en el rango del 6 – 10%.

2.3 Pesos y densidades a considerar dentro de un barco de pesca artesanal

Los pesos y densidades a tener en cuenta en un barco de pesca artesanal son los siguientes:

Pesos de la tripulación:

Dentro de un barco, el peso de cada tripulante aporta un valor a tener en cuenta, según Wilson (2005), el peso de cada tripulante es 80 kg.

Densidad de combustible:

Todo barco requiere de una fuente de combustible para poder hacer funcionar el motor del mismo. Un factor importante a tener en cuenta es su peso. El peso del combustible esta relacionado a su densidad y volumen ocupado. La densidad promedio del combustible dentro de un barco de pesca artesanal según Wilson (2005) es de 0.8 ton/m³.

Densidad de agua dulce:

El abastecimiento de agua dulce dentro de un barco es muy importante para diversos sistemas dentro del barco y para el consumo humano. La densidad de agua dulce considerada para un estudio de pesos dentro de un barco de pesca artesanal según Wilson (2005) es de 1 ton/m³, .

Densidad de aceites hidráulicos:

Los aceites hidráulicos son empleados en los sistemas hidráulicos a bordo de un barco; se encargan de dirigir y transferir energía mediante fluidos. Conocer su densidad es importante para un estudio de estabilidad o de pesos. La densidad considerada para la tesis es de 0.924 ton/m³.

Densidad de pesca con hielo:

Dentro de un barco de pesca artesanal, el peso de la pesca viene acompañado de hielo, utilizado para conservar fresco el pescado durante la faena de pesca. La densidad de

la mezcla de pesca más hielo, utilizando los métodos de Wilson (2005), tendrá un valor de 0.7 ton/m³.

Densidad de agua de mar:

Según (ITTC, 2011), para una temperatura de 20 grados, tiene un valor exacto de 1.0248 kg/m³.

2.4 Dinámica de fluidos computacional

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una disciplina que utiliza métodos numéricos y computadoras para abordar problemas relacionados con el movimiento de los fluidos. Existen programas comerciales y de código abierto, como OpenFOAM, que permiten simular fluidos complejos. Estos programas están disponibles para el público en general y pueden ser mejorados gracias a la contribución de los usuarios.

2.4.1 Estructura de análisis CFD

Los software de CFD constituyen un sistema complejo que involucra múltiples procesos interrelacionados. Sin embargo, se puede identificar una estructura de trabajo general que se sigue en la mayoría de los casos.

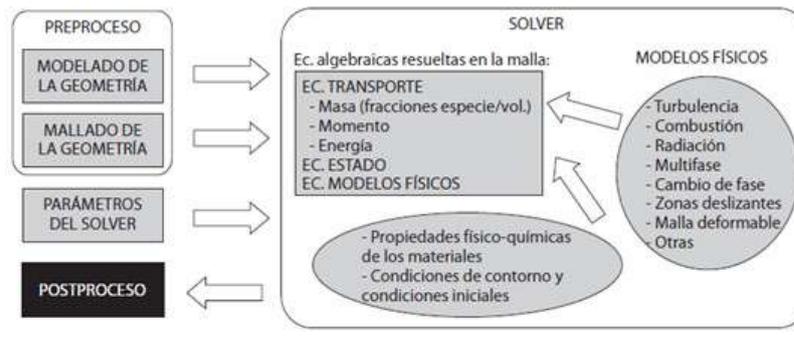


FIGURA N° 2.17: Estructura de un código CFD. Adaptado de Fernández (2012).

Como se puede apreciar en la Figura N° 2.17, existen tres etapas generales en las que se puede dividir un estudio CFD: preprocesado, solucionador y postprocesado. Todo modelo de simulación debe pasar por estas tres etapas para poder llegar a una solución numérica. Es importante destacar que después de estas tres etapas se debe llevar a cabo un proceso de validación para corroborar que la simulación cumpla con los requisitos de la realidad.

Preprocesado:

Esta fase tiene como objetivo convertir los datos de entrada de nuestro problema en información que pueda ser entendida por el solucionador. Esta fase incluye los siguientes puntos:

- Modelado de la geometría.
- Generación de una malla alrededor de la geometría.
- Identificación de los fenómenos físicos involucrados.
- Definición de las propiedades físicas de los fluidos.
- Definición de las condiciones iniciales y de contorno de la simulación.

Solucionador:

En esta fase se llevan a cabo los cálculos numéricos mediante iteraciones realizadas por el ordenador. Es la parte central del proceso, donde el computador realiza la mayor parte del trabajo. La duración de esta fase depende de la finura del mallado y puede oscilar entre minutos, semanas o incluso meses de solución.

Postprocesado:

Esta etapa se considera visual y de análisis. En esta fase se incluyen las gráficas necesarias para analizar los resultados. Se pueden distinguir los siguientes elementos:

- Representación gráfica del dominio y de la malla.
- Mapas de contorno de las variables y ploteado de vectores y líneas de corriente.
- Gráficas y distribuciones.
- Animaciones y exportaciones de resultados.

2.4.2 Modelado 3D

La etapa de modelado implica la generación de un modelo tridimensional del caso a estudiar. Este proceso puede llevarse a cabo de varias maneras, siempre acompañado de

un software de diseño como Rhinoceros, AutoCAD, Solidworks, entre otros. Incluso existen software de simulación computacional, como ANSYS, que cuentan con un sistema de modelado 3D para facilitar la importación de archivos.

La ITTC (2017) ha establecido algunas recomendaciones que deben seguir los modelos 3D de los buques para obtener resultados favorables en la simulación.

- La ITTC recomienda el formato de archivo IGES para la superficie del modelo, ya que es muy útil. Sin embargo, también se pueden utilizar otros formatos siempre y cuando se respeten las tolerancias de la superficie. En el caso de OpenFOAM, uno de los formatos más utilizados para la importación al programa es STL, el cual tiene una gran precisión. Los resultados de este formato se han utilizado en muchos estudios de distintas ramas, incluidas las aplicaciones navales.
- Se requiere una geometría adicional que delimite el dominio de trabajo de la malla en la etapa de preproceso. Esta geometría envuelve la geometría principal en un dominio y se recomienda definirla en el paquete de trabajo del generador de mallas, según la recomendación de la ITTC. En el caso de OpenFOAM, el mallador utilizado para generar el dominio de trabajo se llama blockMesh, el cual es un paquete incluido en OpenFOAM y de fácil uso.
- Otro detalle importante a tener en cuenta en la etapa de modelado es la posición del modelo respecto al sistema de coordenadas, ya que la fuerza y el momento se calcularán respecto al sistema de coordenadas. Además, las variables de velocidad y presión se definen con la misma orientación que el modelo respecto al sistema de coordenadas.

2.4.3 Generación de la malla

Para la generación de la malla, es importante tener claros los conceptos sobre los tipos de malla que se pueden generar.

2.4.3.1 Tipos de mallado

Malla estructurada:

La malla estructurada se considera la más organizada y adecuada para realizar si-

mulaciones, ya que las líneas de flujo se ajustan a la estructura de la malla. Esta malla se compone de nodos ordenados en un sistema cartesiano (i, j, k) que cubre todo el dominio. Aunque lograr este orden puede ser difícil, existen métodos para sistematizarlo y automatizar su generación, como los comandos `blockMesh` y `snappyHexMesh` en OpenFOAM, que destacan por producir una malla estructurada.

La ventaja de esta malla es su eficiencia computacional y menor tiempo de simulación para converger, siendo ideal para el método de volúmenes finitos. Sin embargo, tiene limitaciones en su adaptabilidad a formas complejas y requiere más tiempo de generación que el mallado no estructurado.

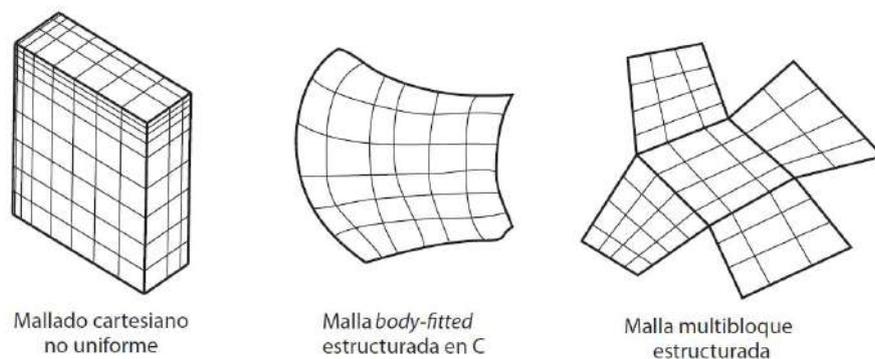


FIGURA N° 2.18: Ejemplos de mallado estructurado. Adaptado de Fernández (2012).

Malla no estructurada:

El mallado no estructurado se trata de una malla generada de manera desordenada que se utiliza en simulaciones debido a su simplicidad de implementación. Se utiliza principalmente en geometrías complejas donde el mallado estructurado resulta imposible.

Una ventaja del mallado no estructurado es la posibilidad de refinar zonas específicas, algo difícil de lograr en el mallado estructurado. Sin embargo, requiere más recursos computacionales debido a su desorganización, aunque las computadoras de alta capacidad en la industria ayudan a compensar este costo.

Malla híbrida:

Se desarrolló la malla híbrida para abordar eficientemente los fenómenos de capa límite en fluidos, los cuales representan una gran desventaja para una malla no estructurada. Esta técnica implica la introducción de un mallado estructurado en la capa límite para obtener resultados más precisos, mientras que el resto de la malla que cubre el dominio se genera

como un mallado no estructurado.

2.4.3.2 Calidad de la malla

Es importante tener en cuenta que la calidad de la malla desempeña un papel fundamental en la simulación, ya que una malla de baja calidad puede generar soluciones inestables, divergentes o resultados que no se corresponden con la realidad. Por lo tanto, es fundamental seguir los principales estándares de calidad que se detallan a continuación:

No ortogonalidad: Observando la Figura N° 2.19, la no ortogonalidad se produce cuando la línea que conecta los centroides de las celdas P y N no es perpendicular a la cara común entre ellas. Esto puede afectar la precisión de la interpolación de las ecuaciones diferenciales. La medida de la no ortogonalidad se define como el ángulo entre la línea d y el vector S , que es normal a la cara que se está analizando (Jouanny et al., 2014). En figuras complejas, se busca obtener la mejor calidad posible de celdas no ortogonales, con un ángulo promedio de al menos 45 grados.

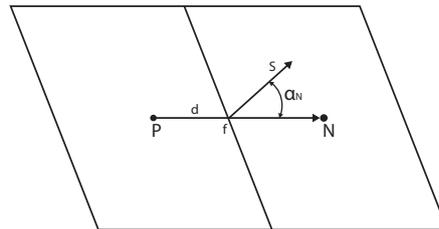


FIGURA N° 2.19: Esquema de medición de ortogonalidad. Adaptado de Jouanny et al. (2014).

Asimetría:

La asimetría o distorsión angular es un concepto utilizado para evaluar la calidad de la malla. La asimetría se refiere a la falta de simetría y puede reducir la precisión del cálculo de la integral de superficie.

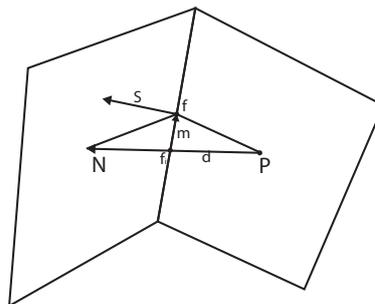


FIGURA N° 2.20: Esquema de medición de asimetría. Adaptado de Jouanny et al. (2014).

En una malla simétrica, el flujo puede recorrer toda la malla de manera continua, mientras que en una malla asimétrica, la interpolación lineal de las variables de flujo en las celdas hacia las caras puede generar un error debido a la distancia entre el centro de la línea d y el punto central de la cara f (Jouanny et al., 2014). Esto puede dificultar el análisis de las variables de flujo en una malla asimétrica. La Figura N° 2.20 muestra una ilustración de lo explicado.

Relación de aspecto:

La relación de aspecto es la proporción entre la longitud y el ancho de una celda en una malla. Se busca una relación de aspecto cercana a 1 para obtener resultados precisos y estables. Si la relación de aspecto se aleja mucho de 1, puede causar inestabilidad numérica y errores en la solución. Es importante prestar atención a la relación de aspecto de las celdas al crear una malla para asegurar una solución precisa y estable del problema.

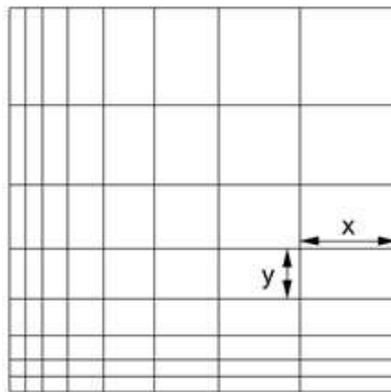


FIGURA N° 2.21: Esquema de relación de aspecto. Adaptado de Jouanny et al. (2014).

2.4.4 Dominio computacional y condiciones de contorno

Un parámetro de diseño indispensable en el planteamiento de la simulación es definir correctamente el entorno físico en el cual se va a desarrollar. Por lo tanto, se debe tener en cuenta las definiciones y criterios que lo limitan.

2.4.4.1 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno son condiciones espaciales donde se aplican las ecuaciones discretizadas. Es importante implementarlas de manera adecuada para garantizar la convergencia.

Las condiciones de contorno más comunes que se manipulan y que se utilizarán en la tesis son las siguientes:

Condiciones de flujo entrante:

Para el flujo entrante, es necesario especificar la distribución de las variables de flujo en la frontera de entrada. En nuestro caso, al ser un problema turbulento, también se deben considerar las variables turbulentas. Es recomendable establecer el contorno de entrada a una distancia prudente de la geometría para evitar que se vea afectado por el efecto del fluido en la geometría.

Condiciones de flujo saliente:

Las condiciones de flujo saliente, a diferencia del flujo entrante, no se les asigna un valor de variable específico, sino que las variables toman el valor de las celdas adyacentes. Es importante, al igual que en la condición de entrada, que exista una distancia adecuada entre la geometría y la frontera de contorno para evitar posibles perturbaciones causadas por la geometría en el flujo.

Condiciones de pared:

Las condiciones de pared se aplican en la interfaz entre el fluido y una superficie sólida. Se utilizan para simular el comportamiento de un fluido en contacto con una pared, y son fundamentales para obtener simulaciones precisas y realistas en diversas aplicaciones.

Estas condiciones se utilizan principalmente para modelar la fricción y la transferencia de calor entre el fluido y la superficie sólida. Para lograrlo, se emplean distintas técnicas y modelos matemáticos, que van desde aproximaciones empíricas simples hasta modelos complejos basados en las ecuaciones de Navier-Stokes.

Rugosidad:

La rugosidad de la superficie es importante en la simulación de la capa límite. En la capa límite, la presencia de rugosidades puede alterar la distribución de velocidad y la presión en el fluido, lo que puede afectar significativamente el flujo a través de la superficie.

En OpenFOAM, los parámetros de rugosidad se establecen en la definición de la geometría y en las condiciones de contorno mediante los parámetros altura de grano en la superficie de pared (K_s) y constante de rugosidad (C_s).

Parámetro Y^+ en el fenómeno de la capa límite:

Y^+ es la distancia adimensional entre la pared y la primera celda del mallado que está por encima de la capa límite laminar, donde el flujo se vuelve turbulento. La precisión de Y^+ es importante para una simulación precisa de la capa límite, ya que una mala elección de la ubicación de la primera celda respecto a la pared puede conducir a una subestimación o sobreestimación de los efectos de la capa límite en el flujo.

El valor de Y^+ se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$y^+ = \frac{(\rho u_\tau y)}{\mu} \quad (2.53)$$

Donde:

- ρ : Densidad del fluido.
- u_τ : Velocidad de fricción o velocidad de corte en la pared.
- y : Distancia desde la pared hasta la primera celda del mallado.
- μ : Viscosidad dinámica del fluido.

El valor de Y^+ se utiliza para evaluar la calidad de la simulación de flujos turbulentos cerca de la pared. Un Y^+ bajo indica resolución excesiva y mayor costo computacional, mientras que un Y^+ alto indica resolución insuficiente y falta de captura de fenómenos turbulentos.

En la industria CFD, se recomienda utilizar una gran cantidad de celdas cercanas a la pared para capturar correctamente la capa límite. Además, se aconseja utilizar valores de Y^+ en el rango de 30 a 300 (Fernández, 2012).

Condición de simetría:

La condición de simetría se aplica ampliamente a geometrías simétricas para reducir la carga computacional. Esta condición se cumple cuando no hay flujos a través del contorno de simetría y no hay valores escalares en la superficie de simetría.

2.4.4.2 Dominio computacional

El dominio computacional se refiere a la región espacial en la que se resuelve el problema de flujo utilizando las ecuaciones de Navier-Stokes.

Es importante tener en cuenta que la elección de un dominio inapropiado puede resultar en soluciones incorrectas o inestables. Por lo tanto, es necesario prestar especial atención a la definición del dominio en la simulación de flujos.

Según las recomendaciones de ITTC (2017), la extensión del dominio computacional debe estar relacionada con la longitud del modelo de la siguiente manera:

- Plano de entrada: $1-2L_{pp}$ de distancia respecto al casco.
- Plano de salida: $3-5L_{pp}$ de distancia respecto al casco.
- Plano exterior: $1-2L_{pp}$ de distancia respecto al casco.
- Plano de fondo: $3-5L_{pp}$ de distancia respecto al casco.
- Plano de simetría: Ubicado en la crujía del barco.

2.4.5 Modelos de turbulencia

Según Fernández (2012), la turbulencia es un estado caótico e impredecible del movimiento de un fluido, causado por irregularidades en las condiciones iniciales o de contorno. Estas irregularidades se amplifican y generan vórtices turbulentos. Para comprenderla, se emplean modelos matemáticos basados en las ecuaciones de Navier-Stokes, que describen el movimiento y transferencia de calor en los fluidos.

El modelo más utilizado en CFD para simular la turbulencia es el RANS (Ecuaciones de Navier-Stokes en estado estacionario). Este modelo promedia las variables del flujo en el espacio y supone fluctuaciones rápidas en el tiempo. Aunque es ampliamente aplicado en ingeniería, el RANS tiene limitaciones para representar la turbulencia en flujos complejos, como la separación de capa límite o flujos altamente turbulentos.

Para superar estas limitaciones, se han desarrollado modelos de turbulencia más avanzados, como LES (Simulación de Grandes Remolinos) y DNS (Simulación Numérica Directa), que son más precisos pero requieren mayor capacidad computacional y recursos.

2.4.6 Modelos RANS

Los modelos RANS se utilizan comúnmente en CFD para simular flujos turbulentos. Se dividen en modelos de una ecuación y modelos de dos ecuaciones.

Los modelos de una ecuación, como el Spalart-Allmaras y el modelo de energía cinética turbulenta, emplean una única ecuación para la energía cinética turbulenta (k) o la tasa de disipación (epsilon). Son simples y eficientes computacionalmente, pero su precisión para predecir la turbulencia es limitada.

Por otro lado, los modelos de dos ecuaciones, como el modelo k -epsilon y el modelo k -omega, son más complejos. Utilizan dos ecuaciones para describir la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación. Son más precisos pero también más costosos computacionalmente.

En la industria naval, es común utilizar los modelos k -epsilon y k -omega. En este trabajo, se ha optado por el modelo k -omega, específicamente su adaptación SST k -omega, debido a su capacidad para manejar flujos de alta velocidad y predecir de manera precisa la separación de flujos en la estela del barco.

Modelo K-Omega($k-\omega$):

Este modelo se basa en dos ecuaciones diferenciales que describen la evolución de la turbulencia en un flujo. La primera ecuación describe la tasa de producción de turbulencia, mientras que la segunda ecuación describe la tasa de disipación de turbulencia.

En términos generales, el modelo k -omega es una adaptación del modelo k -epsilon con el objetivo de realizar simulaciones para números de Reynolds bajos. La ecuación que describe el modelo k -omega es la siguiente (Fernández, 2012):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{v}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t S_{ij} S_{ij} - \rho \beta^* f_{\beta^*} k \omega \quad (2.54)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega \bar{v}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} G_k - \rho \beta f_{\beta} \omega^2 \quad (2.55)$$

La ecuación 2.54 representa la ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta, mientras que la ecuación 2.55 representa la ecuación de transporte para la tasa de disipación específica.

La formulación se completa con la siguiente relación:

$$\mu_t = \alpha^* \rho \frac{k}{\omega} \quad (2.56)$$

Donde α^* es una formulación matemática de corrección que se basa en el número de Reynolds y que es responsable de suprimir la viscosidad turbulenta en condiciones de bajo número de Reynolds.

Modelo SST k-omega:

El modelo de turbulencia SST k-omega es una variante del modelo k-omega que utiliza una transición Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) a un modelo de turbulencia de escala de pared (Wall-Modeled Large Eddy Simulation) para mejorar la precisión en la predicción de flujos en la capa límite. El modelo SST k-omega combina las ecuaciones del modelo k-omega con un modelo de turbulencia de escala de pared y tiene en cuenta la influencia de la turbulencia en la capa límite.

El modelo SST k-omega es conocido por su capacidad para predecir con precisión la separación del flujo, así como por su buen desempeño en la simulación de flujos transitorios. Además, este modelo es eficiente computacionalmente y se ha utilizado con éxito en la simulación de flujos complejos.

2.5 Fotogrametría

Según la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS), la fotogrametría se define como el arte, la ciencia y la tecnología de obtener medidas precisas de objetos físicos y su entorno mediante la grabación, medición e interpretación de imágenes y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos.

Si bien la fotogrametría se utiliza principalmente en el campo topográfico para representar áreas extensas de terreno con precisión, su aplicación no se limita a eso. También se utiliza para la representación digital de objetos en 3D, como se muestra en Martelli et al. (2015), e incluso para el estudio del posicionamiento dinámico de objetos, como se presenta en Romero et al. (2022).

Mediante la fotogrametría se pueden obtener 4 posibles resultados dependiendo del análisis que se realice (Kraus, 2004):

- Números: coordenadas de puntos separados en un sistema de coordenadas tridimensional (Nube de puntos).
- Planos: Mapas, planos, curvas de nivel
- Modelos geométricos: Modelos geométricos representados digitalmente.
- Imágenes: Fotografías rectificadas (orto-fotos), modelos CAD texturizados.

2.5.1 Base teórica

En la fotogrametría tradicional, se utiliza un método llamado *ajuste de bloques*, que consiste en combinar fotografías para formar un sistema de ecuaciones sobredeterminado.

La base del sistema consiste en la proyección en perspectiva central, en la cual la relación entre las coordenadas de un punto del objeto, X_A , y las coordenadas del punto de la imagen, x_a , se describe mediante una ecuación vectorial. Dicha ecuación incluye el centro de perspectiva O , que coincide con la posición del foco de la lente de la cámara, las coordenadas X_0 del centro de perspectiva y la matriz R , una matriz de rotación 3×3 que contiene las funciones de elementos de los ángulos de rotación de la cámara, junto con su transpuesta R^t . Suponiendo que se conocen los ángulos de rotación y la posición X_0 de la cámara, para una sola foto hay cuatro incógnitas, incluyendo μ y las tres componentes de X_A , mientras que hay tres ecuaciones (Koelman, 2010).

Si se utilizan varias cámaras, el sistema puede ser resuelto mediante la intersección de las ecuaciones, lo que implica cinco incógnitas (dos μ y X_A) y seis ecuaciones. Cada foto o punto de la foto agrega una incógnita y tres ecuaciones, mientras que cada punto desconocido del objeto añade tres incógnitas. Si N es el número de puntos en la foto y M es el número de puntos desconocidos en el objeto, el número de incógnitas es $N + 3M$ y el número de ecuaciones es $3N$. Para que el sistema pueda ser resuelto, el número de incógnitas debe ser menor que el número de ecuaciones, o $N > 1\frac{1}{2}M$. Esto permite que el sistema sea resuelto de manera única. La Figura N° 2.22 muestra un ejemplo de cómo este proceso funciona (Koelman, 2010).

En la práctica, no se dispone de información precisa sobre la posición y orientación exactas de la cámara al tomar las fotografías. Sin embargo, es posible abordar este desafío mediante la adición de más fotografías o puntos de referencia, lo que permite que el sistema

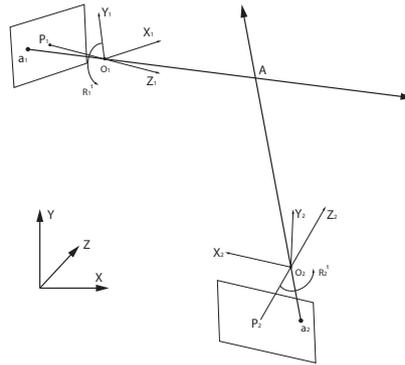


FIGURA N° 2.22: Intersección de dos rayos de luz. Adaptado de Koelman (2010).

de ecuaciones esté sobredeterminado.

Cuando se cuenta con un número suficientemente grande de fotografías (N) en relación con el número de incógnitas (M), se pueden considerar los parámetros desconocidos, como los μ y los parámetros de posición y orientación de la cámara, y resolver el sistema conjuntamente mediante mínimos cuadrados. En este enfoque, se utiliza un método iterativo de mínimos cuadrados no lineales, como el algoritmo de Levenberg-Marquardt (LMA), debido a que la matriz R no es lineal.

De esta manera, es posible obtener una estimación de la forma del objeto, aunque no se pueda determinar su tamaño exacto. Para obtener las coordenadas reales de puntos de referencia, se requiere utilizar métodos que no sean fotogramétricos (Koelman, 2010).

La estimación inicial de las posiciones y orientaciones de la cámara es importante para el éxito del algoritmo de ajuste de bloques utilizando el método de Levenberg-Marquardt. Se utiliza un método llamado resección espacial para obtener estos valores iniciales. Este método involucra la aplicación de la ley de los cosenos de manera iterativa, como se muestra en la Figura N° 2.23. Asegurar una buena estimación inicial es importante para evitar mínimos locales y lograr una solución satisfactoria (Koelman, 2010).

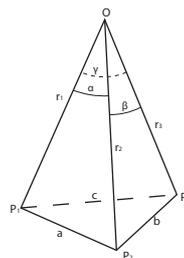


FIGURA N° 2.23: Resección espacial. Adaptado de Koelman (2010).

$$\begin{aligned}
 c^2 &= r_1^2 + r_3^2 - 2r_1r_3 \cos(\gamma) \\
 a^2 &= r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos(\alpha) \\
 b^2 &= r_2^2 + r_3^2 - 2r_2r_3 \cos(\beta)
 \end{aligned}
 \tag{2.57}$$

Si se tienen los puntos de referencia P_1, P_2 y P_3 con sus coordenadas conocidas, junto con las distancias a, b y c , se puede reorganizar la ecuación 2.57 y agregar una segunda ecuación similar utilizando dos de los puntos P_1, P_2 o P_3 , junto con un punto adicional de referencia P_4 . De esta manera, es posible resolver el sistema de ecuaciones para obtener los valores de r_1, r_2 y r_3 (Koelman, 2010).

La precisión de la fotogrametría depende de tres factores: La precisión de la medición de los puntos de referencia, la resolución fotográfica y el número de fotos.

2.5.2 Cámaras fotográficas

En cuanto a la fotogrametría, el uso de cámaras se ve enfocado en las cámaras digitales, capaces de transformar directamente las imágenes en datos computarizados.

2.5.2.1 Características de una cámara fotográfica

Tamaño de sensor: La función del sensor es convertir la imagen visual generada por el lente en una secuencia de señales eléctricas que se convertirán en la imagen digital correspondiente (Koelman, 2010). Usualmente se utiliza la medida en milímetros (a veces en pulgadas) para determinar el tamaño del sensor. Por ejemplo, los sensores de formato completo tienen una dimensión cercana a los 35.00×24.00 mm, tamaño que solía ser estándar en la película de 35 mm utilizada en cámaras analógicas. En ocasiones, es posible encontrar algunas variaciones de 1-2 mm entre distintos tipos de formato (Zafra, 2020).

| | FORMATO MEDIO | FORMATO COMPLETO (FULL FRAME) | APS-C | MICRO 4/3 | 1" | 1/2.55" |
|-------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|-------------------|
| IMAGEN | | | | | | |
| TAMAÑO | 53.0 X 40.20 MM | 35.00 X 24.00 MM | 23.5 X 15.60 MM | 17.00 X 13.00 MM | 12.80 X 9.60 MM | 6.17 X 4.55 MM |
| FACTOR DE REDORTE | 0.64 | 1 | 1.52 | 2 | 2.7 | 5.52 |
| CÁMARA | | | | | | |

FIGURA N° 2.24: Tamaño de sensor en camera digital. Adaptado de Zafra (2020).

Longitud focal: La distancia focal se refiere a la separación entre el centro óptico de la lente y el sensor de la cámara, y está estrechamente vinculada al campo de visión (también conocido como ángulo de visión). Debido a que la distancia focal influye en el campo de visión, al variar la distancia focal se produce una modificación en la amplitud de la perspectiva capturada (Zafra, 2020).

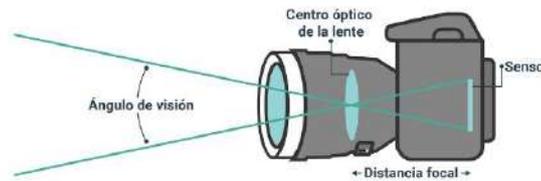


FIGURA N° 2.25: Longitud focal. Adaptado de Zafra (2020).

2.5.3 Software ContextCapture

El software ContextCapture, desarrollado por Bentley Systems, permite recrear automáticamente objetos, edificios y otros elementos a partir de imágenes. Con esta herramienta se pueden generar modelos 3D de alta resolución, modelos digitales de superficie (DSM) y ortofotos. Lo mejor es que no se necesita intervención manual, ya que el programa genera una malla triangular texturada de alta calidad en minutos u horas, según la cantidad de datos. El resultado final es una malla 3D precisa y visualmente realista que representa las partes del objeto capturadas correctamente por las fotografías de entrada (ContextCapture, 2022).

2.5.3.1 Procesamiento de datos

El método de procesamiento de datos de ContextCapture se describe a continuación:

1. Configuración de fotos: En esta etapa se selecciona la cantidad de imágenes que se procesarán, además de configurar el tamaño del sensor y la distancia focal de la cámara con la que se tomó la fotografía. Es importante destacar que la fotografía tomada puede estar georreferenciada mediante GPS, lo cual ayuda en el proceso de fotogrametría. Si no se cuenta con una referencia mediante GPS, el programa puede localizar la ubicación de la foto en relación al objeto analizado mediante aerotriangulación.
2. Inspección de fotos: En esta etapa se pueden añadir puntos de referencia que ayuden

al software a identificar similitudes entre las distintas fotografías. Esto se logra mediante los llamados *puntos de amarre*. Adicionalmente, se pueden indicar las distancias entre distintos puntos de amarre, lo que permite una escala de objeto resultante más cercana a la realidad. También es posible definir ejes de posicionamiento y el grado de rotación del objeto analizado.

3. Aerotriangulación de fotos: En la etapa de aerotriangulación, ContextCapture establece la posición de la cámara en relación al objeto fotografiado. Para ello, se recomienda contar con un conjunto de fotos superpuestas que permitan analizar la similitud.
4. Reconstrucción 3D: Gestiona la región de interés a ser producida
5. Producción 3D: En esta etapa se gestiona la producción del modelo 3D, permitiendo escoger el formato deseado. Es posible generar una nube de puntos, así como una malla tridimensional.

2.5.4 Recomendaciones de aplicación

ContextCapture proporciona una serie de recomendaciones básicas para un buen procesamiento fotogramétrico. A continuación, se mencionan algunas recomendaciones mencionadas en la guía de usuario de ContextCapture (2022):

Solapamiento de imágenes:

ContextCapture recomienda tomar al menos tres fotografías por objeto, teniendo en cuenta el perfil del objeto que se desea representar. Además, se sugiere que exista un solapamiento mínimo del 2/3 de la imagen o una separación de 15 grados entre cada posición de toma de fotografías (Figura N° 2.26).

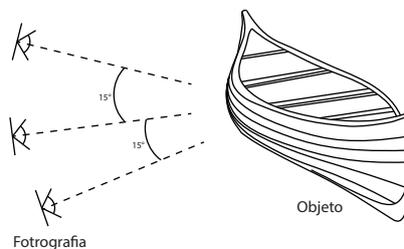


FIGURA N° 2.26: Solapamiento de fotografías. Fuente propia.

Distancia focal:

ContextCapture recomienda utilizar una distancia focal fija para obtener mejores resultados en la toma fotográfica. Es decir, se sugiere trabajar con el mismo lente fotográfico sin variar el zoom o intercambiar lentes durante la captura de imágenes.

Iluminación:

Para lograr buenas tomas fotográficas, se recomienda utilizar iluminación natural y, preferiblemente, aprovechar un cielo nublado, ya que esto ayuda a evitar sombras excesivas. En caso de trabajar en un entorno con cielo despejado, se sugiere realizar las tomas al mediodía. Si no es posible trabajar en un entorno natural, es importante establecer una iluminación artificial uniforme en todo el objeto para obtener mejores resultados en las fotografías.

2.6 Marco conceptual

2.6.1 Representaciones tridimensionales

2.6.1.1 Formato de malla STL

El formato STL, por sus siglas en inglés, Stereolithography, es una representación geométrica mediante triángulos vinculados que ayuda en la interpretación de una superficie u objeto en 3D.

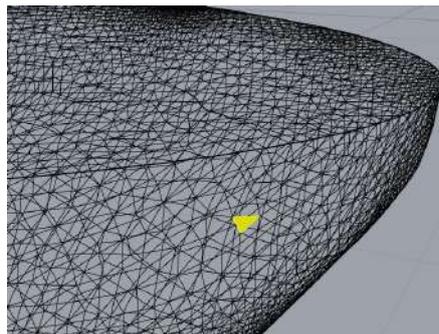


FIGURA N° 2.27: Representación 3D mediante archivo STL. Fuente propia.

2.6.1.2 Superficies NURBS

NURBS o, por su traducción, B-splines racionales no uniformes, son representaciones matemáticas de geometrías 3D. Tienen una alta precisión en lo relacionado con medidas, por lo que son ideales para representar objetos 3D orientados a la fabricación o diseño. Generar superficies utilizando el concepto NURBS es posible con distintos softwares, como

es el caso de Rhinoceros.

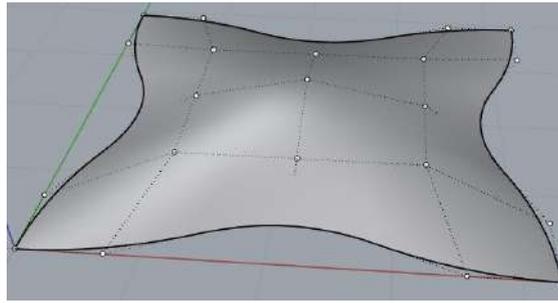


FIGURA N° 2.28: Representación 3D de superficies NURBS. Fuente propia.

2.6.2 Dimensiones principales de un barco

2.6.2.1 Eslora entre perpendiculares L_{PP}

Distancia longitudinal de la línea de flotación a una carga máxima del barco. Considerando esto, se debe tener en cuenta que los modelos probados en estudios antiguos coincidían en proa respecto a L_{PP} y L_{WL} , por lo que se opta por considerar que en cualquier condición de carga el punto delantero se ubica en la proa de la línea de flotación (Hydro-Comp, 2004). Este planteamiento asegura la compatibilidad con Oortmerssen (1971) y otros métodos considerados antiguos.

2.6.2.2 Francobordo

Para el caso de la presente tesis, representa la distancia vertical medida entre el canto alto de la amurada y la línea de flotación.

2.6.3 Apéndices

Se pueden considerar apéndices a todas las protuberancias externas al casco del barco. Tienen diferentes funcionalidades en el barco dependiendo de cada uno, y a su vez, añaden un porcentaje de resistencia al avance extra. Entre los apéndices más comunes y que se utilizarán en la presente tesis se encuentran:

2.6.3.1 Eje de cola

Eje conectado a la hélice propulsora (ver Figura N° 2.29), su función es transmitir la potencia del motor. Visto como apéndice, tiene una pequeña zona expuesta externa al

2.6.3.4 Keel cooler

Sistema utilizado para el enfriamiento del motor, el enfriamiento se realiza por contacto con agua de mar por lo que el sistema se ubica externo a la carena del barco. Su área expuesta fuera del casco hace que se considere como un apéndice.



FIGURA N° 2.31: Keel cooler de un barco. Fuente propia.

2.6.4 Dinámica de fluidos computacional (CFD)

Derivado de sus siglas en inglés *Computational Fluid Dynamics* (CFD), la técnica consiste en emplear computadoras y métodos numéricos para resolver todo problema físico que está directamente relacionado con los fluidos, o con otros fenómenos como transferencia de calor, reacciones químicas, movimiento de cuerpos rígidos, entre otros (Fernández, 2012).

2.6.4.1 Capa de inflación

Término relativo al proceso de mallado de un modelo para su posterior simulación CFD. Se refiere a la zona cercana a las paredes del cuerpo rígido, en este caso el casco de un barco, el cual debe ser recubierto por una capa fina de celdas de malla para poder simular correctamente la turbulencia de los fluidos en tránsito.

2.6.4.2 Gráfica de residuos

Gráfica que representa el proceso de iteraciones en una simulación. En el eje Y de esta gráfica se representa la diferencia entre los valores obtenidos en una iteración anterior y una iteración actual. El objetivo es analizar si la diferencia existente tiende a cero conforme avanzan las iteraciones en el tiempo.

2.6.5 Pesos dentro de un barco de pesca artesanal

2.6.5.1 Pesos fijos

Los pesos fijos son aquellos que se mantienen constantes y no sufren desgaste o pérdida de peso en todas las condiciones de operación. Estos pesos puede ser: Tripulación, red de pesca, equipos de pesca, peso en rosca y entre otros (Kim y Yeo, 2019).

2.6.5.2 Pesos variables

Los pesos variables son aquellos que van perdiendo capacidad durante la faena de pesca, como los tanques de combustible, tanques de agua, hidrocarburos, pesca entre otros (Kim y Yeo, 2019).

2.6.6 Condiciones de operación para un barco de pesca

2.6.6.1 Condición de Prueba de mar

La condición de prueba de mar representa el momento en que el barco sale a evaluar la velocidad, maniobrabilidad, comportamiento de motor, entre otros. El peso dentro del barco es variable en cada prueba de mar, por lo que se debe hacer un registro de calados y pesos variables presentes al momento de la prueba.

2.6.6.2 Condición de servicio

La condición de servicio, según Wilson (2005), se define como una condición intermedia entre una condición buena, con un mar calmo y un casco limpio de incrustaciones, y una condición mala, con un mal tiempo y otras deficiencias. Se calcula como la suma de los pesos en rosca más el 50% de la carga, que incluye agua dulce, combustibles, pesca y otros elementos. Esta condición se utiliza para estimar la potencia adecuada con la que trabajará el barco.

2.6.7 Barco de pesca artesanal

Según PRODUCE (2017), un barco de pesca artesanal se define como tal si no supera los 15 metros de eslora y no excede los 32.6 m³ de espacio en bodega. También se le conoce como embarcación de cerco artesanal o de menor escala.

Capítulo III: Metodología de la investigación

3.1 Tipo de investigación

Según Alfaro (2012), la investigación planteada en la presente tesis se puede clasificar como una investigación aplicada, ya que los conceptos estudiados se aplican para la optimización del problema y también pueden aplicarse a la solución de otros problemas similares. Además, es una investigación mixta, de campo y documental, ya que se recolectan datos de campo para evaluar los fenómenos hidrodinámicos del barco estudiado y se utilizan datos documentales referenciados de libros, papers, revistas, etc. para evaluar los datos de campo.

3.2 Alcance de la investigación

La metodología de la tesis consiste en validar el proceso de medición y generación de modelos 3D mediante fotogrametría, así como la simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD), utilizando un barco de estudio. Los resultados obtenidos de la simulación CFD serán utilizados para determinar la configuración de propulsión óptima para el barco en cuestión. Para lograr esto, se llevará a cabo una optimización comparando las curvas de motor y hélice, con el objetivo de encontrar la mejor combinación posible para las condiciones de operación específicas del barco bajo análisis.

3.3 Objeto de investigación

En esta tesis, se obtuvieron datos experimentales utilizando una embarcación pesquera artesanal de 30 toneladas de capacidad de pesca, la cual está diseñada para la pesca de consumo y equipada con una red de cerco. El estudio de la embarcación se llevó a cabo desde su fase de construcción hasta la realización de las pruebas de mar una vez que fue botada al agua. Todas las mediciones y análisis se realizaron en la localidad de Parachique-Piura, una zona costera ubicada al norte de Perú. A continuación se presentan los datos técnicos de la embarcación:

- Nombre del barco: DELIA I
- Matricula: CE-22114-CM

- Eslora total: 14.8 m
- Manga moldeada: 6.3 m
- Puntal trazado: 2.5 m
- Capacidad de bodega: 30 Ton
- Material de construcción: Madera
- Motor principal: Weichai 278hp@1500rpm
- Transmision: Advance red. 4.61:1

Se seleccionó cuidadosamente al barco *DELIA I* debido a que cumple con los objetivos de estudio y representa una embarcación típica de pesca artesanal. Además, se pudo acceder a información técnica detallada relacionada con su propulsión, incluyendo la ficha técnica del motor, la ficha técnica de la transmisión marina y los datos de diseño de la hélice marina.

La participación en las pruebas de mar y la recopilación de los datos necesarios fue posible gracias a la estrecha relación de confianza establecida con la empresa supervisora y el armador dueño del barco. Esta colaboración permitió obtener una perspectiva completa y precisa de la operación de la embarcación en condiciones de mar reales.

3.4 Etapas de la investigación

3.4.1 Recolección de información

3.4.1.1 Obtención de datos geométricos del barco

El proceso de recolección de datos se inició con una primera etapa enfocada en la obtención de datos geométricos de la forma del casco mediante el método fotogramétrico. Para ello, se utilizó una cámara fotográfica (ver Figura N° 3.1) para capturar imágenes detalladas de la forma del barco.

Los datos obtenidos de la cámara, como la resolución de imagen, la distancia focal, la apertura del diafragma, entre otros, son importantes para evaluar la precisión y la calidad de los datos recolectados. A continuación se presentan los datos de la cámara:

- Marca: Canon
- Modelo: PowerShot Sx60HS
- Resolución: 16.1 Mp
- Zoom óptico: 65x
- Longitud focal: 3.8-247 mm
- Tipo de sensor de imagen: CMOS retroiluminado tipo 1/2,3



FIGURA N° 3.1: Cámara fotográfica utilizada en la recolección de datos. Fuente propia

El procedimiento de toma de datos se basó en el estudio de Martelli et al. (2015), que utiliza la técnica de fotogrametría para realizar un muestreo completo de la superficie del casco del barco. Se tomaron fotografías a una distancia constante de 3 a 4 metros del casco, como se muestra en la Figura N° 3.2.

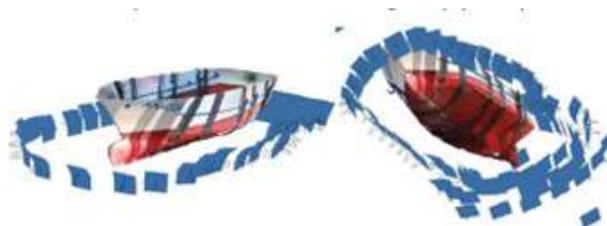


FIGURA N° 3.2: Procedimiento de toma de fotos. Adaptado de Martelli et al. (2015)

Se tomó como referencia el estudio de Kanun y Yakar (2021), el cual recomienda ubicar puntos de referencia en el casco del barco para medir físicamente la distancia entre ellos y realizar comparaciones. Durante la medición, se colocaron 120 puntos en toda la obra viva del casco, distribuidos en estaciones separadas por una distancia constante de 1 metro. Se realizaron un total de 30 mediciones para determinar las distancias entre los puntos de referencia.



FIGURA N° 3.3: Ubicación de puntos en la obra viva del casco *DELIA I*. Fuente propia.

3.4.1.2 Obtención de datos de prueba de mar

La segunda etapa del proceso de recolección de datos consistió en la realización de una prueba de mar, durante la cual se registraron una serie de datos clave para el estudio. Entre estos, se obtuvieron las condiciones de carga del barco y los resultados de velocidad en función de las RPM del motor. Ambos documentos se encuentran en el Anexo B y el Anexo C.

El procedimiento utilizado en la prueba de mar se basó en las especificaciones descritas por Molland et al. (2011) en el libro *Ship Resistance and Propulsion*. Este procedimiento se caracteriza por medir la velocidad a partir del tiempo registrado al recorrer una distancia fija de 1 milla náutica, efectuando los recorridos tanto en sentido a favor como en contra de la corriente para anular los efectos de la corriente en las mediciones. Tal como se muestra en la Figura N° 3.4.

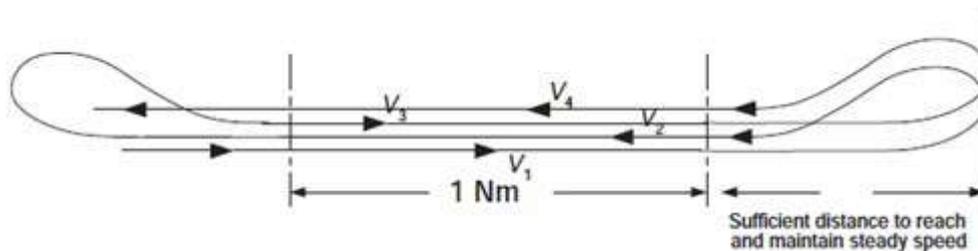


FIGURA N° 3.4: Procedimiento de recorrido en prueba de mar. Adaptado de Molland et al. (2011)

3.4.2 Análisis de datos obtenidos

Para el análisis de los datos recolectados, se emplearon diferentes programas de procesamiento de datos. A continuación, se presentan y describen brevemente los softwares utilizados en el análisis:

- ContextCapture: Es un software de fotogrametría que permite crear nubes de puntos y modelos 3D de alta resolución a partir de fotografías aéreas o terrestres.
- Rhinoceros: Es un software de modelado 3D que permite crear y modificar modelos de forma libre además de permitir generar planos de ingeniería.
- OpenFOAM: Es un software de simulación numérica de dinámica de fluidos computacional (CFD) de código abierto. Se utilizara en la tesis para realizar simulaciones de la hidrodinámica del barco y analizar su resistencia al avance.
- Smath Studio: Software que permite la realización de cálculos matemáticos y gráficas, ideal para relacionar variables independientes y dependientes. Se utiliza en la tesis para calcular los métodos de extrapolación y algunos otros cálculos.

3.4.3 Validación de datos

El proceso de validación se centra en los métodos de fotogrametría y CFD utilizados. En la fotogrametría, se lleva a cabo una validación en campo comparando las medidas reales del barco estudiado con las medidas virtuales obtenidas del modelo 3D. El método CFD, el cual utiliza el software OpenFOAM, es validado con datos experimentales del modelo DTChull proporcionados por Moctar et al. (2012).

Además, se utilizaron los resultados de la prueba de mar realizada en el barco *DELIA* / para validar la simulación de la presente tesis.

3.4.4 Análisis de resultados y optimización de motor, transmisión y hélice

El enfoque de análisis se centra en el estudio de las curvas de rendimiento de la hélice y el motor, con el objetivo de encontrar la combinación de equipos de propulsión más eficiente para cumplir con las condiciones de carga de trabajo del barco de pesca estudiado. Se busca identificar la relación óptima entre el motor, la transmisión y la hélice, garantizando

un rendimiento máximo sin problemas de sobrecarga ni falta de velocidad. Este enfoque permitirá determinar la configuración más adecuada que asegure un funcionamiento óptimo y eficiente del barco en su labor de pesca.

3.5 Flujograma de investigación

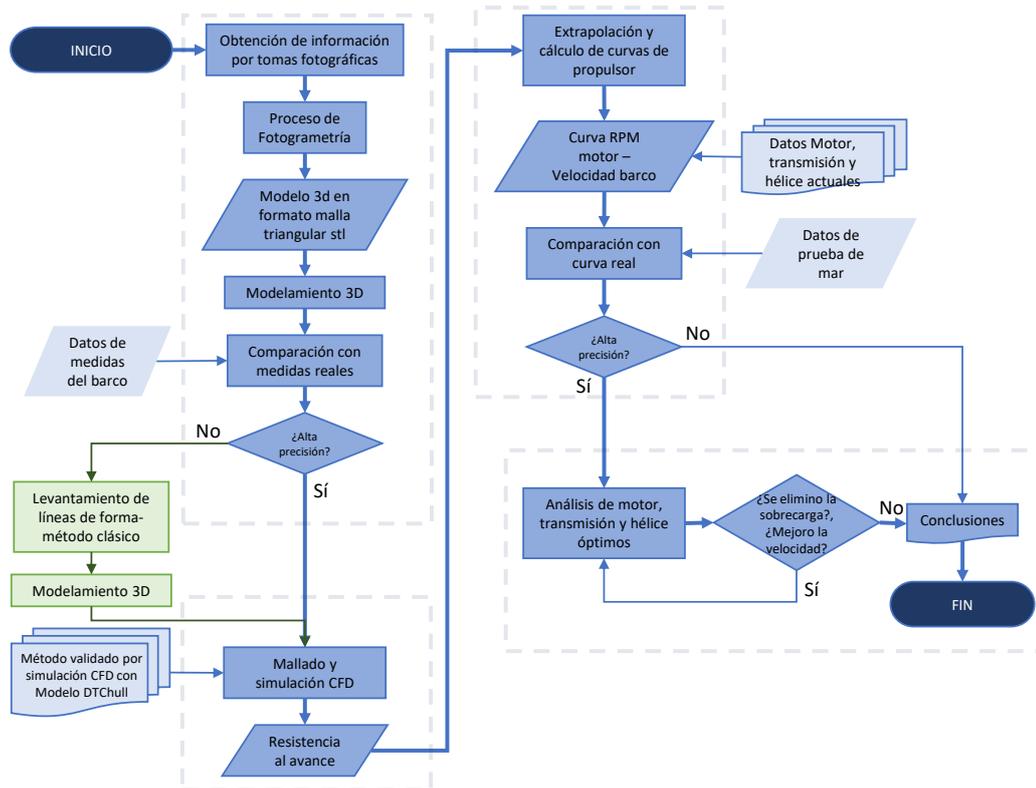


FIGURA N° 3.5: Flujograma de investigación. Fuente propia

Capítulo IV: Procesamiento fotogramétrico y generación del modelo 3D

4.1 Proceso fotogramétrico

4.1.1 Obtención de datos

Para recolectar la información, se seleccionó el barco de pesca artesanal *E/P DELIA I*, el cual se encontraba en la etapa final de construcción. Las características de este barco se describieron en la sección 3.3 de metodología.

El barco fue identificado con un total de 120 puntos de referencia distribuidos en toda la carena del mismo, dividido en 14 secciones con una distancia de 1 metro entre secciones, tal como se muestra en la Figura N° 4.1.



(a) Sección longitudinal. Fuente propia.



(b) Sección de proa. Fuente propia.



(c) Indicación de mediciones. Fuente propia.

FIGURA N° 4.1: Puntos de referencia-Barco DELIA I. Fuente propia.

Además, se midió la distancia entre varios de los puntos seleccionados para su posterior verificación, así como las dimensiones principales del barco.

TABLA N° 4.1: Distancia entre puntos de referencia

| N° | Puntos | Distancia | N° | Puntos | Distancia |
|----|--------|-----------|----|---------|-----------|
| 1 | 1A-1B | 975 mm | 19 | 6C-7C | 605 mm |
| 2 | 1E-1F | 980 mm | 20 | 6E-6F | 963 mm |
| 3 | 1H-1I | 1065 mm | 21 | 6G-6H | 952 mm |
| 4 | 2B-2C | 1005 mm | 22 | 6J-6K | 1013 mm |
| 5 | 2C-2D | 1093 mm | 23 | 7A-6B | 910 mm |
| 6 | 2D-2E | 1015 mm | 24 | 7D-7E | 1020 mm |
| 7 | 3G-3H | 1028 mm | 25 | 8C-8D | 1045 mm |
| 8 | 3H-4H | 355 mm | 26 | 9F-9G | 790 mm |
| 9 | 3J-3K | 1063 mm | 27 | 9H-9I | 1032 mm |
| 10 | 3L-4L | 338 mm | 28 | 9J-9K | 998 mm |
| 11 | 4A-4B | 1020 mm | 29 | 10H-10I | 1038 mm |
| 12 | 4A-5A | 444 mm | - | - | - |
| 13 | 4B-5B | 595 mm | - | - | - |
| 14 | 5C-6C | 455 mm | - | - | - |
| 15 | 5D-6D | 471 mm | - | - | - |
| 16 | 5F-6F | 618 mm | - | - | - |
| 17 | 5H-6H | 597 mm | - | - | - |
| 18 | 5L-4M | 1075 mm | - | - | - |

TABLA N° 4.2: Dimensiones principales medidas en campo

| Dimensiones | Medida(m) |
|-------------------------|-----------|
| Eslora Maxima | 14.8 m |
| Manga moldeada | 6.3 m |
| Puntal trazado | 2.5 m |
| Altura de quilla centro | 0.388 m |
| Amurada centro | 0.605 m |

Además, se tomaron medidas de los espacios en la zona de la hélice y se verificaron las medidas de la hélice para asegurar su precisión. Toda la información pertinente acerca de la hélice, incluyendo sus medidas, se detalla en el Anexo K.

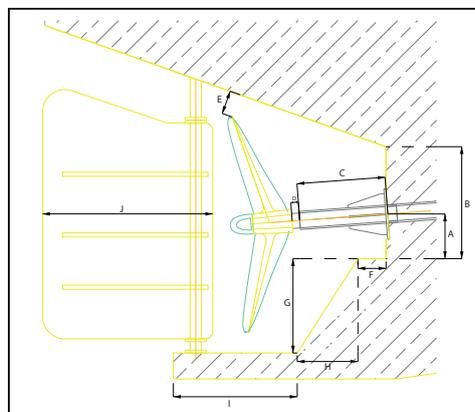


FIGURA N° 4.2: Zona de hélice. Fuente propia.

TABLA N° 4.3: Tabla de datos espacios de hélice. Fuente propia.

| | | | |
|------|------------|------|------------|
| Item | Medida(mm) | Item | Medida(mm) |
| A | 250 mm | F | 350 mm |
| B | 740 mm | G | 660 mm |
| C | 635 mm | H | 145 mm |
| D | 60 mm | I | 690 mm |
| E | 80 mm | J | 780 mm |

TABLA N° 4.4: Características de hélice

| Características | Medidas | Unidad |
|------------------------------|---------|--------|
| N° Palas | 5 | - |
| Diametro | 1524 | mm |
| Paso | 1117.6 | mm |
| DAR | 0.6 | - |
| Angulo de lanzamiento (Rake) | 10° | grados |
| Divergencia (Skew) | 15.5° | grados |

Para la obtención de los datos fotográficos se utilizó una cámara Canon PowerShot Sx60 HS con la cual se tomaron un total de 253 fotografías distribuidos de la siguiente manera:

- 143 fotografías en perfil de estribor.
- 35 fotografías en el perfil de babor.
- 8 fotografías en el perfil de popa-espejo.
- 67 fotografías en el perfil de la hélice.

4.1.2 Procesamiento de datos

Para el procesamiento de datos se utilizó el software ContextCapture, el cual procesó las fotos para obtener un modelo 3D generado por mallas o por nube de puntos.

4.1.2.1 Importación de fotografías

La importación de fotografías se realizó en 4 grupos: Estribor, Babor, Popa-espejo y Popa-hélice. El software ContextCapture requiere conocer, como mínimo, el tamaño del sensor de imagen de la cámara con la que se está trabajando. En el caso de la cámara Canon PowerShot SX60 HS, el tamaño del sensor, como dato del fabricante, es de 6,17 mm. La cámara utilizada no contaba con posicionamiento GPS, por lo que el software no

puede referenciarse al sistema GPS, por lo cual solo dispone de la aerotriangulación para referenciarse en el espacio 3D.

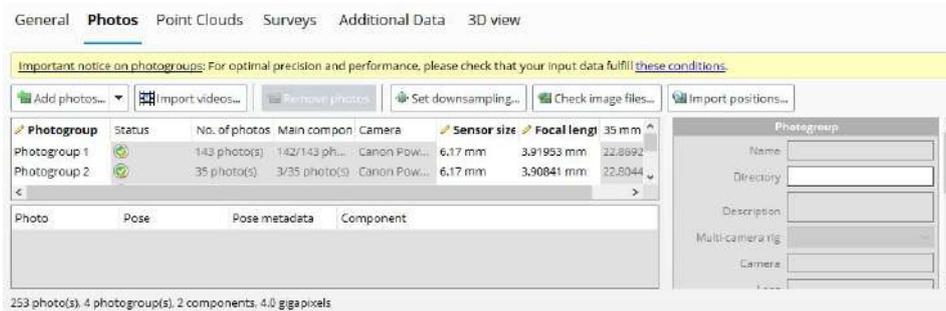


FIGURA N° 4.3: Importación de fotografías. Fuente propia.

4.1.2.2 Puntos de referencia

Se ubicó un total de 120 puntos de referencia físicamente en el barco y la hélice, de los cuales se identificaron 53 puntos en forma virtual en las imágenes del barco y hélice, siendo posible identificar muchos más puntos si fuese necesario.

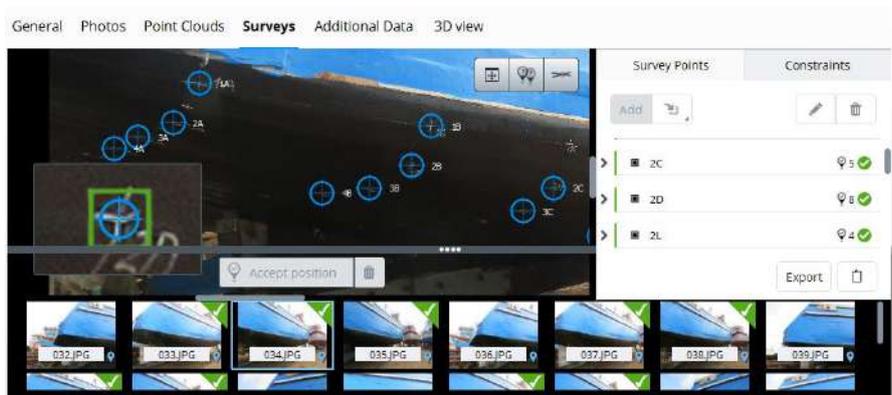


FIGURA N° 4.4: Puntos de referencia en el barco DELIA I. Fuente propia.

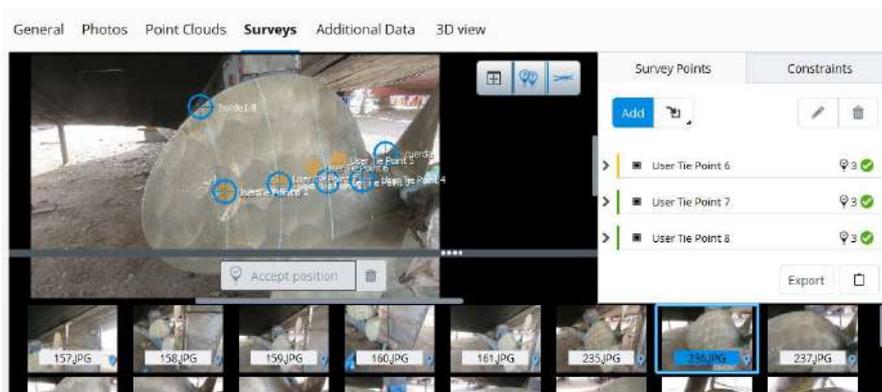


FIGURA N° 4.5: Puntos de referencia en la hélice de DELIA I. Fuente propia.

Para producir un objeto 3D a escala real del barco, se añadieron seis medidas en torno a los puntos de referencia. Estas medidas fueron tomadas de la Tabla N° 4.1.

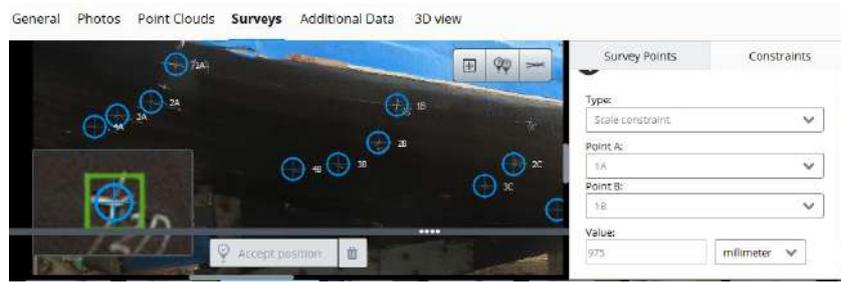


FIGURA N° 4.6: Distancia de referencia 1A-1B. Fuente propia.

Las mediciones entre los puntos de referencia utilizados en este proceso se encuentran en la siguiente tabla:

TABLA N° 4.5: Puntos de referencia tomados

| N | Puntos | Distancia |
|---|--------|-----------|
| 1 | 1A-1B | 975 mm |
| 2 | 4A-5A | 444 mm |
| 3 | 6B-7A | 910 mm |
| 4 | 4B-5B | 595 mm |
| 5 | 2B-2C | 1005 mm |
| 6 | 5D-6D | 471 mm |

4.1.2.3 Aerotriangulación

La aerotriangulación es un proceso automático que realiza el software ContextCapture para orientar todas las fotografías y puntos de referencia en torno a un plano cartesiano, y así poder reconstruir posteriormente el modelo 3D. En la Figura N° 4.7 se aprecia el ordenamiento de imágenes respecto al plano cartesiano, y además se puede observar cómo el software va dándose una idea inicial de cómo se representa el objeto de estudio.

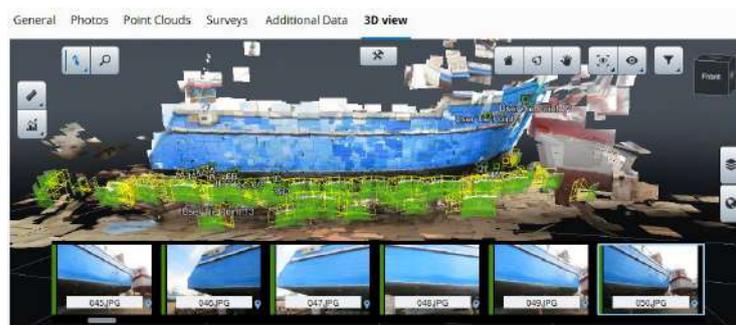


FIGURA N° 4.7: Aerotriangulación del modelo-ContextCapture. Fuente propia.

Posterior a la aerotrinagulación, el software selecciona las fotográficas necesarias y descarta las que no pudo procesar. En el caso de la presente tesis, la cantidad de fotografías utilizadas fueron 171 fotos de un total de 253.

4.1.2.4 Reconstrucción del modelo

Para generar la reconstrucción del modelo, primero se selecciona el espacio específico que se quiere reconstruir. En nuestro caso, nos enfocamos en el barco DELIA I y en la hélice, tratando de dejar de lado los barcos que se encuentran a su alrededor. La reconstrucción se realizó con una precisión extra alta, con una tolerancia de 0.5 píxeles.

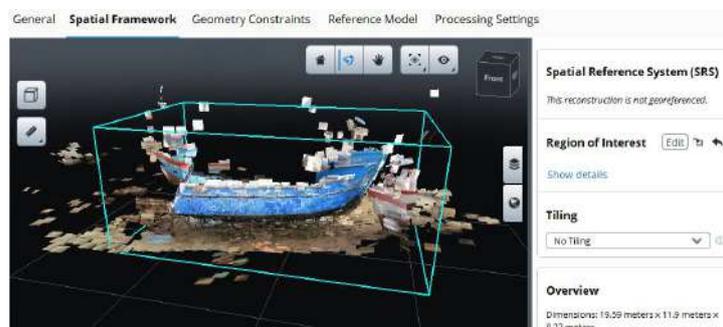


FIGURA N° 4.8: Reconstrucción del modelo-ContextCapture Fuente propia.

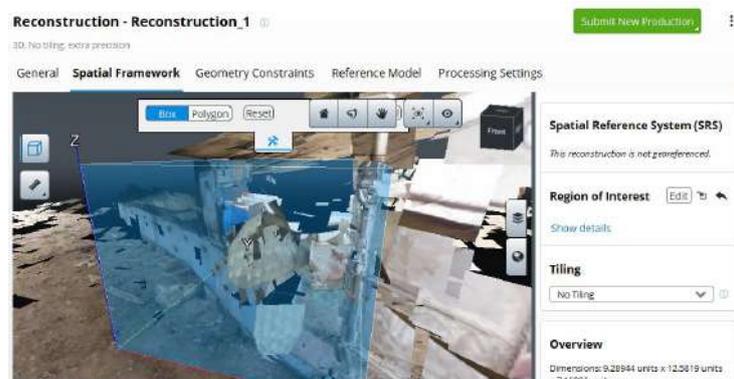


FIGURA N° 4.9: Reconstrucción de la hélice-ContextCapture. Fuente propia.

4.1.2.5 Producción del modelo y verificación

Una vez concluida la reconstrucción, se procedió a la producción de dos formatos previamente analizados: una representación en forma de nube de puntos y un modelo 3D en formato STL. La producción se llevó a cabo con un nivel de detalle mediano de 35kb/nodo, ya que un nivel de refinamiento más alto implicaba un mayor consumo computacional, lo cual se consideró innecesario para el tipo de estudio realizado. Ambos formatos conservaron la

textura y el color originales del barco, lo cual facilitó su verificación visual.

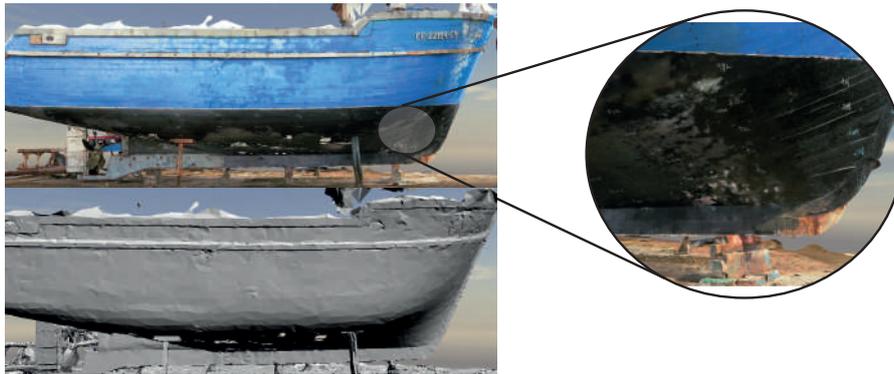


FIGURA N° 4.10: Representación 3D del barco DELIA I. Fuente propia.

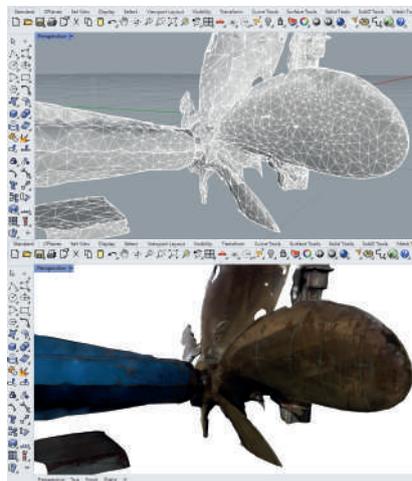


FIGURA N° 4.11: Representación 3D de la pala de hélice. Fuente propia.

El modelo en formato de malla del barco DELIA 1 y la hélice fueron verificados en base a sus medidas reales descritas en la Tabla N° 4.1, Tabla N° 4.2, Tabla N° 4.3 y la Tabla N° 4.4.

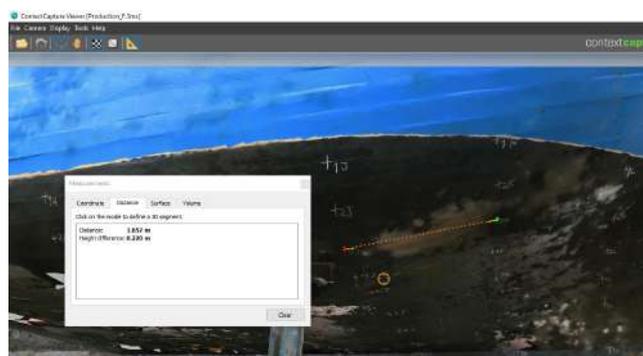


FIGURA N° 4.12: Medición entre puntos 3H-4H. Fuente propia.

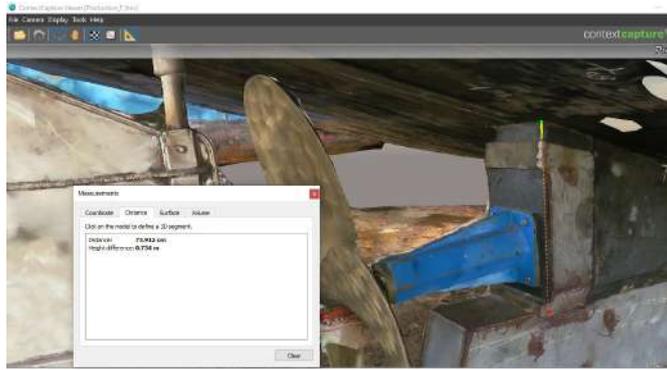


FIGURA N° 4.13: Medición de distancia B. Fuente propia.

En las figuras 4.12 y 4.13 se aprecia la ubicación de los puntos de referencia tomados en campo y como se miden las distancias entre puntos.

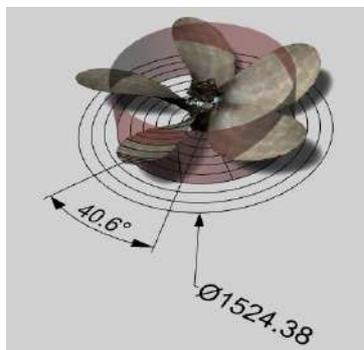


FIGURA N° 4.14: Verificación de diámetro y paso de hélice. Fuente propia.

Para la verificación del diámetro y paso de la hélice se utilizó el software Rhinoceros, donde se plasmó una pala de hélice en formato STL. La Figura N° 4.14 muestra la medición del diámetro, y un cilindro semitransparente de color rojo delimita la distancia radial al 70% del radio ($0.7R$), donde se miden las diferencias de alturas y el ángulo proyectado entre los bordes para aproximar un cálculo del paso de la hélice, tal como se describe en Van et al. (2021), el cálculo se ve en el Anexo D.

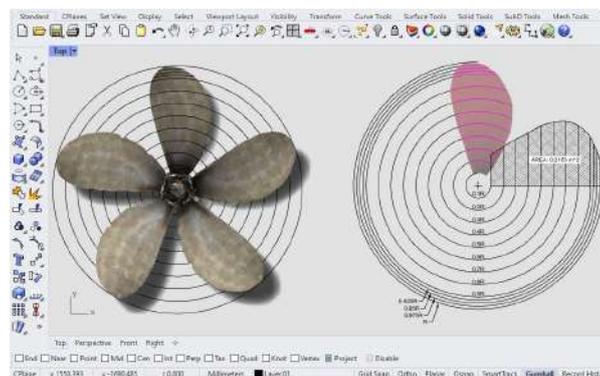


FIGURA N° 4.15: Verificación de área expandida de pala. Fuente propia.

En la figura 4.15 se representa la medición del área de la pala en su forma expandida para posteriormente calcular el DAR. La figura muestra cómo cada sección de la pala a distintos radios se desarrolla en una gráfica en la que se puede medir el área de la pala bajo la curva.

La validación de error se aprecia en la siguientes tablas:

TABLA N° 4.6: Validación de puntos de referencia del barco DELIA I

| Puntos | Distancia virtual | Distancia real | % Error | Diferencia |
|----------|-------------------|----------------|---------|------------|
| 1A-1B | 970.1 mm | 975 mm | 0.50% | 4.9 mm |
| 1E-1F | 973.9 mm | 980 mm | 0.62% | 6.1 mm |
| 1H-1I | 1061 mm | 1065 mm | 0.38% | 4.0 mm |
| 2B-2C | 1001 mm | 1005 mm | 0.40% | 4.0 mm |
| 2C-2D | 1090 mm | 1093 mm | 0.27% | 3.0 mm |
| 2D-2E | 1015 mm | 1015 mm | 0.00% | 0.0 mm |
| 3G-3H | 1025 mm | 1028 mm | 0.29% | 3.0 mm |
| 3H-4H | 355.47 mm | 355 mm | 0.13% | 0.47 mm |
| 3J-3K | 1056 mm | 1063 mm | 0.66% | 7.0 mm |
| 3L-4L | 339.83 mm | 338 mm | 0.54% | 1.83 mm |
| 4A-4B | 1020 mm | 1020 mm | 0.00% | 0.0 mm |
| 4A-5A | 443 mm | 444 mm | 0.23% | 1.0 mm |
| 5F-6F | 618.07 mm | 618 mm | 0.01% | 0.07 mm |
| 5H-6H | 589.87 mm | 597 mm | 1.19% | 7.13 mm |
| 5L-4M | 1070 mm | 1075 mm | 0.47% | 5.0 mm |
| 6E-6F | 933.21 mm | 963 mm | 3.09% | 29.79 mm |
| 6G-6H | 953.56 mm | 952 mm | 0.16% | 1.56 mm |
| 6J-6K | 1010 mm | 1013 mm | 0.30% | 3.0 mm |
| 7A-6B | 908.56 mm | 910 mm | 0.16% | 1.44 mm |
| 7D-7E | 1026 mm | 1020 mm | 0.59% | 6.0 mm |
| 8C-8D | 1040 mm | 1045 mm | 0.48% | 5.0 mm |
| 9F-9G | 788.35 mm | 790 mm | 0.21% | 1.65 mm |
| 9H-9I | 1030 mm | 1032 mm | 0.19% | 2.0 mm |
| 9J-9K | 996.5 mm | 998 mm | 0.15% | 1.5 mm |
| 10H-10I | 1035 mm | 1038 mm | 0.29% | 3.0 mm |
| Promedio | | | 0.45% | 4.10 mm |

TABLA N° 4.7: Validación de dimensiones principales del barco DELIA I

| Dimensiones | Medida virtual | Medida real | % Error |
|-------------------------|----------------|-------------|---------|
| Eslora maxima | 14.853 m | 14.8 m | 0.36% |
| Manga moldeada | 6.376 m | 6.4 m | 0.38% |
| Puntal moldeado | 2.512 m | 2.5 m | 0.49% |
| Altura de quilla centro | 0.392 m | 0.388 m | 1.03% |
| Amurada centro | 0.595 m | 0.605 m | 1.65% |
| Promedio | | | 0.78% |

TABLA N° 4.8: Validación de espacios de hélice

| Puntos | Distancia virtual | Distancia real | % Error | Diferencia |
|----------|-------------------|----------------|---------|------------|
| A | 243 | 250 | 2.80 % | 7.0 |
| B | 739 | 740 | 0.14 % | 1.0 |
| C | 628.58 | 635 | 1.01 % | 6.4 |
| D | 60.26 | 60 | 0.43 % | 0.3 |
| E | 79.2 | 80 | 1.00 % | 0.8 |
| F | 355.76 | 350 | 1.65 % | 5.8 |
| G | 644.99 | 660 | 2.27 % | 15.0 |
| H | 144 | 145 | 0.69 % | 1.0 |
| I | 695 | 690 | 0.72 % | 5.0 |
| J | 781 | 780 | 0.13 % | 1.0 |
| Promedio | | | 1.08 % | 4.32 mm |

TABLA N° 4.9: Validación de características de la hélice

| Características | Medida virtual | Medida real | % Error |
|-----------------|----------------|-------------|---------|
| Diametro | 1524.380 mm | 1524.000 mm | 0.025 % |
| Paso | 1122.712 mm | 1117.600 mm | 0.457 % |
| DAR | 0.596 | 0.600 | 0.700 % |
| Promedio | | | 0.394 % |

4.2 Modelado 3D y generación de líneas de forma

4.2.1 Modelado 3D

El modelado 3D se realizó en base a la geometría 3D en formato malla (STL). Si bien el modelo obtenido por el proceso de fotogrametría es óptimo y se adapta a las medidas del barco real, este modelo cuenta con irregularidades propias del ruido ambiental y no es apto para un análisis directo en CFD.

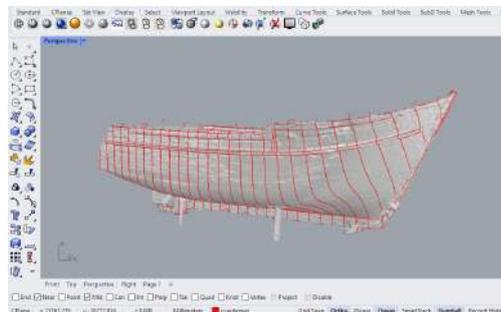


FIGURA N° 4.16: Contorneado y delimitación del modelo STL. Fuente propia.

La Figura N° 4.16 muestra cómo el modelo de malla triangular en formato STL se convierte a superficies NURBS. Como primer paso, se muestra el contorneado de la forma

del casco utilizando el comando *Contour* en el software Rhinoceros.

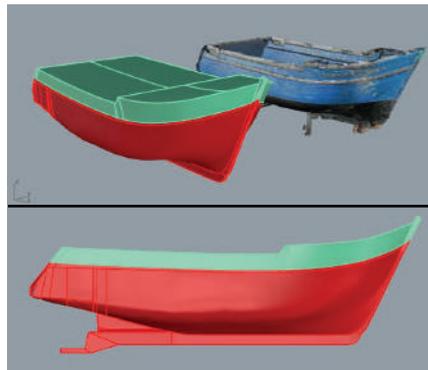


FIGURA N° 4.17: Casco del barco DELIA I modelado en superficies NURBS. Fuente propia.

En la Figura N° 4.17 se puede apreciar el modelado terminado. Una vez finalizada la etapa de modelado, se obtienen las dimensiones generales del barco DELIA I.

TABLA N° 4.10: Dimensiones principales barco 3D DELIA I

| Características principales | |
|-----------------------------|----------|
| Eslora total | 14.853 m |
| Manga moldeada | 6.376 m |
| Puntal trazado | 2.519 m |

Con el modelo finalizado y siendo lo suficientemente similar al modelo real, es posible exportarlo nuevamente en formato STL para poder realizar la simulación CFD en OpenFOAM.

4.2.2 Generación de líneas de forma

Para obtener las líneas de forma del casco, se realiza un seccionamiento del modelo 3D, lo cual permite ordenar las cuadernas, finos y líneas de flotación para generar el plano. Con este proceso de ingeniería inversa, se obtiene un plano importante para el historial de construcción del barco.

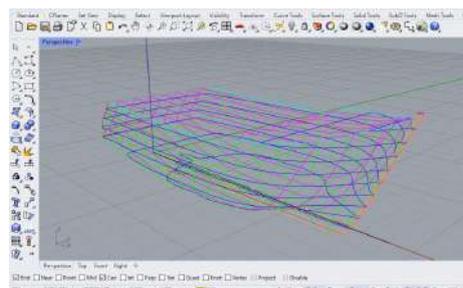


FIGURA N° 4.18: Seccionamiento del modelo 3D. Fuente propia.

Posterior al seccionamiento, se generan las líneas de forma del casco en cualquier software CAD. El plano final se encuentra en la sección de anexos (Anexo J).

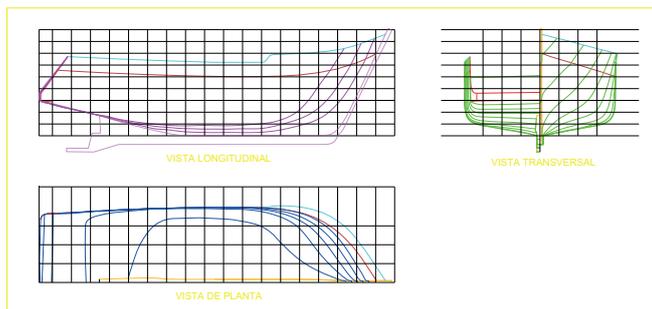


FIGURA N° 4.19: Elaboración de plano de líneas de forma barco DELIA I. Fuente propia.

4.3 Cálculo de pesos y datos hidrostáticos

Calcular el peso de un barco de pesca artesanal puede ser complicado debido a la falta de información logística sobre los pesos exactos y ubicaciones de los equipos de pesca, así como la ausencia de estudios de estabilidad en gran parte de la flota pesquera que opera de manera ilegal. Por lo que se recomienda realizar un estudio de campo a cada barco al cual se requiera estudiar.

Las condiciones de operación que se consideraron para el análisis de la presente tesis son la prueba de mar y la condición de servicio.

TABLA N° 4.11: Condiciones de operación

| Condicion de operación | Detalles |
|------------------------|---|
| Prueba de mar | Barco en condiciones para navegar durante un tramo corto y demostrar el correcto funcionamiento de los sistemas de propulsion |
| Condicion de servicio | Barco listo para operar pero con un 50% de peso variable a bordo |

La condición de prueba de mar fue estudiada de manera precisa gracias al trabajo de recolección de datos tomado y del cual se detalla en la tesis. Evaluar la condición de prueba de mar permitirá estimar de manera más precisa el peso del barco durante su operación. Por otro lado, la condición de servicio se utiliza para poder estimar la potencia adecuada con la que trabajará el barco.

4.3.1 Determinación del calado en condición de prueba de mar

Como punto inicial, se considera las medidas de calado experimentales que se tomaron en el barco DELIA I. Las pruebas de mar se realizaron considerando los siguientes pesos a bordo:

TABLA N° 4.12: Pesos prueba de mar

| Prueba de mar | |
|--------------------------------|--------------|
| Peso en rosca: | Por definir |
| Tripulación: | 6 personas |
| Tanque de combustible: | 250 gal U.S. |
| Tanque de agua dulce: | 198 gal U.S. |
| Tanque de aceites hidráulicos: | 120 gal U.S. |

Momentos previos a realizar la prueba de mar se midieron las alturas de francobordo en distintos puntos del barco para poder aproximar un calado medio posteriormente.



FIGURA N° 4.20: Medición de francobordo barco DELIA I. Fuente propia.

En la Figura N° 4.21 se aprecian los puntos a medir. Las medidas A y D fueron realizadas en crujía, mientras que las medidas B y C fueron hechas en ambas bandas (babor y estribor). Además, es importante resaltar que el punto C fue medido a 6.221m horizontales respecto a B.

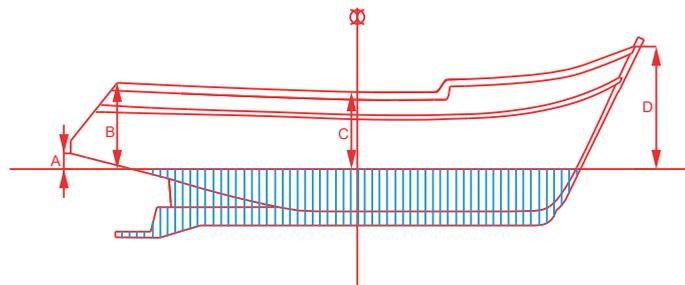


FIGURA N° 4.21: Esquema de medición de francobordo barco DELIA I. Fuente propia.

Los resultados de las medidas se muestran a continuación:

TABLA N° 4.13: Medidas de francobordo barco DELIA I

| Puntos | Babor | Estribor | Crujía |
|--------|---------|----------|---------|
| A | - | - | 286 mm |
| B | 2250 mm | 2200 mm | - |
| C | 1900 mm | 1950 mm | - |
| D | - | - | 3100 mm |

Obtenidas las medidas de francobordo se utiliza el casco modelado en 3D para posicionar el francobordo y poder obtener el calado medio, todo esto se realiza en el software Rhinoceros.

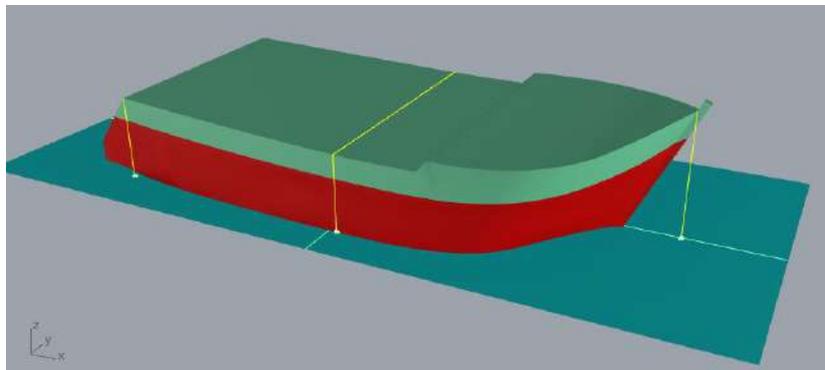


FIGURA N° 4.22: Generación del plano de flotación en condición de prueba de mar. Fuente propia.

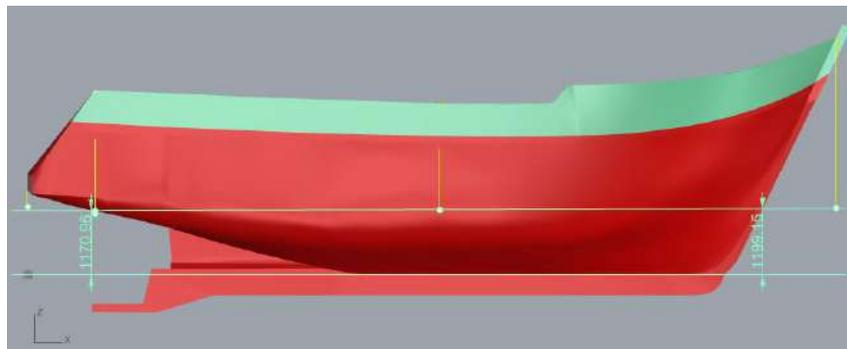


FIGURA N° 4.23: Determinación de calado de proa y popa en la línea de flotación. Fuente propia.

TABLA N° 4.14: Determinación de calado medio

| | Medida |
|---------------|---------|
| Calado a proa | 1199 mm |
| Calado a popa | 1171 mm |
| Calado medio | 1185 mm |

De los resultados de este pequeño análisis, se obtiene el calado medio del barco. Además, se evidenció un trimado de 0.13 a popa y un escorado de 0.43 grados a estribor.

Sin embargo, debido a su magnitud menor, estos valores pueden ser despreciados y se pueden considerar en condiciones de trimado y escorado cero por simplicidad.

4.3.2 Cálculo del desplazamiento en condición de pruebas de mar

En la condición cero de trimado y escorado, se calcula el volumen sumergido del casco al calado medio, obtenido de la Tabla N° 4.14. Para esto se utiliza el modelo 3D en el software Rhinoceros.

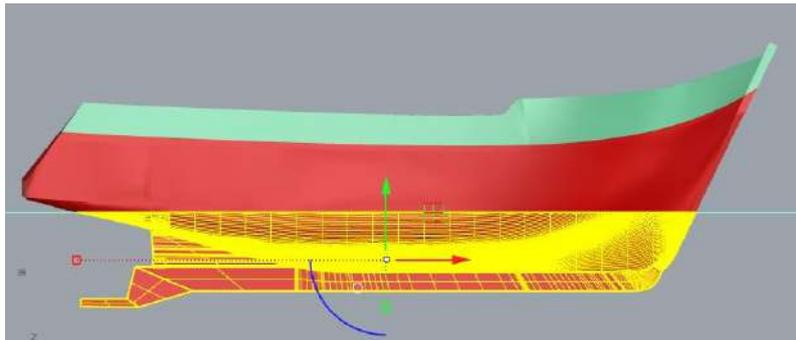


FIGURA N° 4.24: Cálculo del volumen sumergido del barco DELIA I. Fuente propia.

Del cálculo de Rhinoceros se obtiene un volumen sumergido de $44.797, m^3$, considerando que la prueba de mar se realizó en el mar, y la densidad del agua de mar es $1.0248, kg/m^3$ (ITTC, 2011), se obtiene un desplazamiento de $45.9088 ton$.

Con el desplazamiento total del barco obtenido se puede deducir el peso en rosca que se encontraba como incógnita en la Tabla N° 4.12. Esto se aprecia en la tabla Tabla N° 4.15 como sigue:

TABLA N° 4.15: Pesos condición de pruebas de mar

| Prueba de mar | Cantidad | Densidad | Peso |
|--------------------------------|------------|--------------|--------|
| Peso en rosca: | - | - | 43.504 |
| Tripulación: | 6 personas | 80kg/persona | 0.480 |
| Tanque de combustible: | 0.946 m3 | 0.80 Ton/m3 | 0.757 |
| Tanque de agua dulce: | 0.749 m3 | 1.00 Ton/m3 | 0.749 |
| Tanque de aceites hidráulicos: | 0.454 m3 | 0.924 Ton/m3 | 0.419 |
| Peso total | | | 45.909 |

4.3.3 Cálculo del desplazamiento en condición de servicio

Para calcular los pesos de la condición de servicio, se debe conocer previamente las capacidades de peso de la carga variable del barco de pesca Delia I. Estos datos han sido

obtenidos de la fuente del armador del barco y la ficha de matrícula del barco (ver Anexo B y Anexo E). Las capacidades se aprecian en la Tabla N° 4.16

4.3.4 Datos hidrostáticos

Obtenidos los datos de desplazamiento en las condiciones de trabajo estudiadas y el modelo tridimensional gracias al proceso de fotogrametría se puede obtener los datos hidrostáticos, estos datos son calculados mediante el software Rhinoceros y el plugin Grasshopper para automatizar el proceso. Los resultados se muestran en la Tabla N° 4.17 y Tabla N° 4.18.

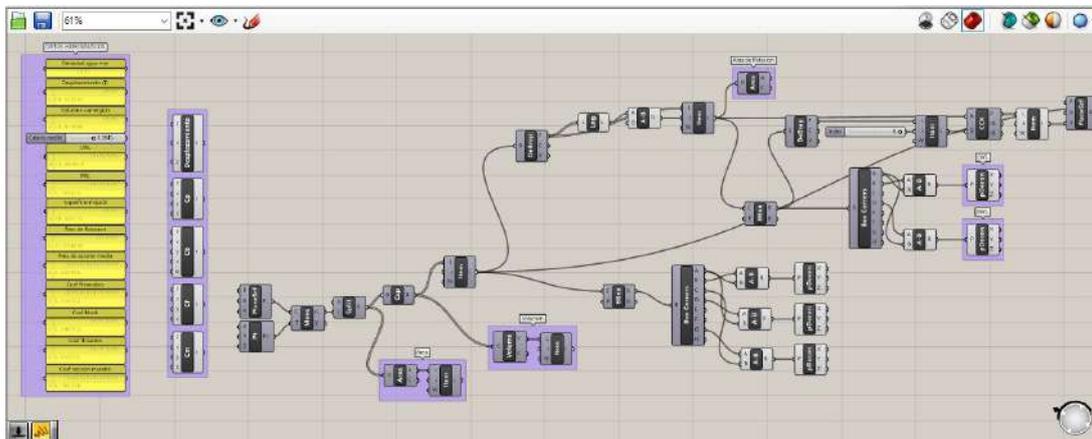


FIGURA N° 4.25: Datos hidrostáticos en Grasshopper. Fuente propia.

TABLA N° 4.16: Pesos condición de servicio

| Condición de servicio | Cantidad | Densidad | Peso |
|-------------------------------|------------|---------------|------------|
| Peso en rosca | - | - | 43.504 ton |
| Tripulación | 6 personas | 80 kg/persona | 0.480 ton |
| Artes de pesca | - | - | 2.500 ton |
| Tanque de combustible (50%) | 1.893 m3 | 0.80 ton/m3 | 1.514 ton |
| Tanque de agua dulce (50%) | 1.893 m3 | 1.00 ton/m3 | 1.893 ton |
| Pesca + Hielo (granel) | 14.625 m3 | 0.7 ton/m3 | 10.238 ton |
| Tanque de aceites hidráulicos | 0.454 m3 | 0.924 ton/m3 | 0.419 ton |
| Peso total | | | 60.548 ton |

TABLA N° 4.17: Datos hidrostáticos - Prueba de mar

| DATOS HIDROSTÁTICOS (PRUEBA DE MAR.) | | |
|--|---------|--------|
| Medida | Valor | Unidad |
| Desplazamiento | 45.9088 | ton |
| Volumen desplazado | 44.7974 | m3 |
| Calado medio | 1.1850 | m |
| Eslora de flotación | 12.1699 | m |
| Manga máxima en flotación | 6.3308 | m |
| Superficie mojada | 87.5753 | m2 |
| Área de sección maestra | 5.6356 | m2 |
| Área de flotación | 65.0198 | m2 |
| Coefficiente prismático (Cp) | 0.6532 | - |
| Coefficiente de block (Cb) | 0.4907 | - |
| Coefficiente de sección maestra (Cm) | 0.7512 | - |
| Coefficiente de flotación (Cf) | 0.8439 | - |
| Centro longitudinal de flotación (LCB) | 7.1235 | m |
| Centro vertical de flotación (KB) | 0.7470 | m |
| Centro de flotación (LCF) | 6.5273 | m |

TABLA N° 4.18: Datos hidrostáticos - Condición de servicio

| DATOS HIDROSTÁTICOS (COND. SERVICIO) | | |
|--|---------|--------|
| Medida | Valor | Unidad |
| Desplazamiento | 60.5479 | ton |
| Volumen desplazado | 59.0821 | m3 |
| Calado medio | 1.3945 | m |
| Eslora de flotación | 13.0840 | m |
| Manga máxima en flotación | 6.3646 | m |
| Superficie mojada | 98.390 | m2 |
| Área de sección maestra | 6.9652 | m2 |
| Área de flotación | 71.2203 | m2 |
| Coefficiente prismático (Cp) | 0.6483 | - |
| Coefficiente de block (Cb) | 0.5087 | - |
| Coefficiente de sección maestra (Cm) | 0.7847 | - |
| Coefficiente de flotación (Cf) | 0.8552 | - |
| Centro longitudinal de flotación (LCB) | 6.9422 | m |
| Centro vertical de flotación (KB) | 0.8786 | m |
| Centro de flotación (LCF) | 6.2261 | m |

Capítulo V: Validación del método CFD

5.1 Modelo de validación

Para la validación del procedimiento CFD se utilizará como base el paper publicado por Moctar et al. (2012), en donde se ensaya mediante canal de remolque el modelo DTCHull, un modelo a escala de un barco portacontenedor. A continuación, se detallan las características del modelo.

5.1.1 Características del modelo

DTCHull es un modelo a escala 1:59.407 que representa el casco de un barco portacontenedor. El modelo ha sido digitalizado y el archivo tridimensional se encuentra disponible en distintos sitios web, como es el caso de la página principal de OpenFOAM. A continuación, se detallan las características principales del modelo:

TABLA N° 5.1: Dimensiones principales en condiciones de carga de diseño

| | Modelo | Escala real |
|-------------------------------------|----------|-------------|
| Escala | 1/59.407 | 1 |
| Eslora entre perpendiculares (m) | 5.976 | 355.0 |
| Manga en línea de flotación (m) | 0.859 | 51.0 |
| Calado medio (m) | 0.244 | 14.5 |
| Ángulo de trimado (°) | 0 | 0 |
| Volumen sumergido (m ³) | 0.827 | 173467.0 |
| Coefficiente de block | 0.661 | 0.661 |
| Superficie mojada (m ²) | 6.243 | 22032.0 |
| Velocidad de diseño (nudos) | 3.244 | 25.0 |

El ensayo de remolque se realizó a 6 velocidades de recorrido diferentes, correspondientes al rango de Froude entre 0.174 y 0.218. El fluido (agua) en el cual se realizó la prueba tiene una viscosidad cinemática de $\nu_M = 1.090 \times 10^{-6} m^2/s$ y una densidad de $998.8 kg/m^3$. Los resultados del ensayo de remolque en el modelo arrojaron los siguientes resultados (Moctar et al., 2012):

TABLA N° 5.2: Resultados de ensayo de remolque

| V_m (m/s) | Fr | $Re \times 10^{-6}$ | R_T (N) | R_F (N) | $C_T \times 10^3$ | $C_F \times 10^3$ | $C_W \times 10^4$ |
|-------------|-------|---------------------|-----------|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1.335 | 0.174 | 7.319 | 20.34 | 17.611 | 3.661 | 3.170 | 1.932 |
| 1.401 | 0.183 | 7.681 | 22.06 | 19.229 | 3.605 | 3.142 | 1.672 |
| 1.469 | 0.192 | 8.054 | 24.14 | 20.964 | 3.588 | 3.116 | 1.791 |
| 1.535 | 0.200 | 8.415 | 26.46 | 22.713 | 3.602 | 3.092 | 2.194 |
| 1.602 | 0.209 | 8.783 | 28.99 | 24.554 | 3.623 | 3.069 | 2.660 |
| 1.668 | 0.218 | 9.145 | 31.83 | 26.431 | 3.670 | 3.047 | 3.360 |

5.2 Mallado de la geometría

5.2.1 Modelo 3D

El mallado de la geometría se realiza mediante el software OpenFOAM y sus herramientas de generación de malla, las cuales utilizan un modelo 3D en formato STL. Este modelo se comparte libremente y se puede encontrar como un archivo tutorial dentro de OpenFOAM. Se basa en el trabajo de Moctar et al. (2012), por lo que mantiene la escala 1:59.407.

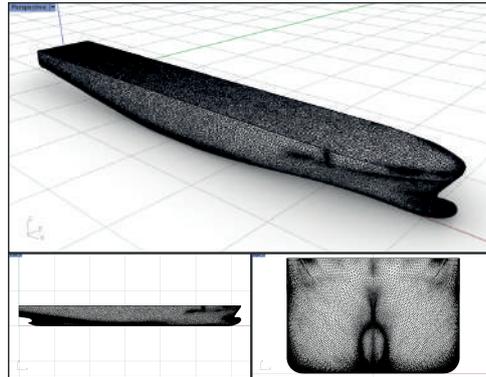


FIGURA N° 5.1: Modelo 3D - DTCHull. Fuente propia.

5.2.2 Limitación del dominio

El dominio computacional se limita siguiendo las recomendaciones dadas por la ITTC, teniendo como limitantes los siguientes parámetros:

- Plano de ingreso: $2L_{OA}$ de distancia respecto al casco.
- Plano de salida: $5L_{OA}$ de distancia respecto al casco.
- Plano de pared: $3L_{OA}$ de distancia respecto al casco.

- Plano de fondo: $3L_{OA}$ de distancia respecto al casco.
- Plano de atmósfera: $1.2L_{OA}$ de distancia respecto al casco.

De esta forma las limitaciones del dominio se ven reflejados en la siguiente imagen.

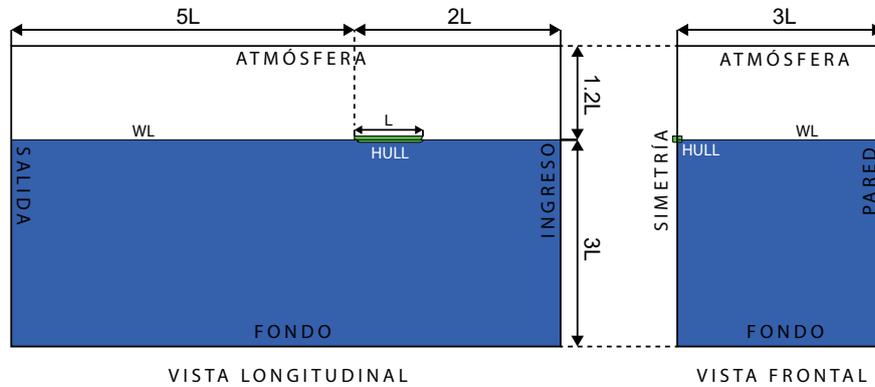


FIGURA N° 5.2: Esquema del dominio computacional. Fuente propia.

5.2.3 Mallado estructurado en OpenFOAM

Se opta por un mallado estructurado debido a los beneficios de una simulación que requiere un menor esfuerzo computacional. Para la realización del mallado estructurado, se genera una zona de refinamiento centralizada en el casco del barco. Esta zona de refinamiento cuenta con 6 niveles ($T_1; T_2; T_3 \dots T_6$), cada uno más refinado que el anterior. Adicionalmente, se añade un refinamiento de superficie libre (W_1), el cual ayuda a simular la zona de cambio de fase (aire-agua) y además un refinamiento (Z_1) en la zona cercana al casco que mejore la precisión de la interacción entre los fluidos (aire-agua) y el casco.

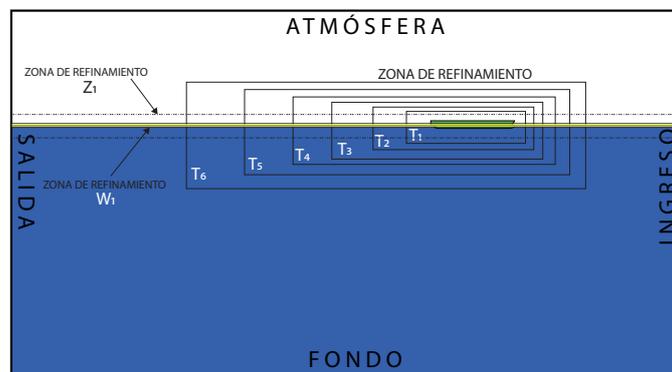


FIGURA N° 5.3: Zonas de refinamiento. Fuente propia.

Posterior a definir el dominio y las zonas de refinamiento, se realiza la generación de malla utilizando las herramientas blockMesh y snappyHexMesh, las cuales son nativas

de OpenFOAM, dando como resultado lo que se aprecia en la siguiente imagen.

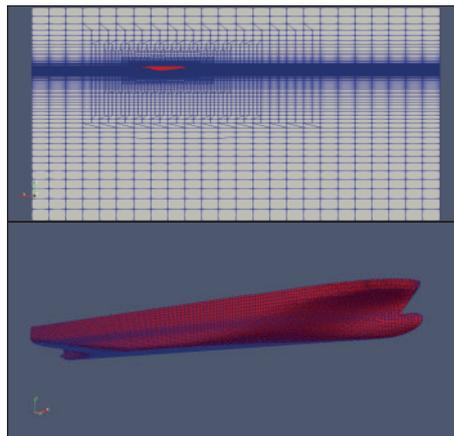


FIGURA N° 5.4: Mallado de la geometría - DTCHull. Fuente propia.

El resultado del mallado cuenta con un total de 693,225 celdas. La calidad de la malla se garantizó cumpliendo con los estándares dados por OpenFOAM y manteniendo la capa de inflación que rodea el barco en un porcentaje mayor al 90 %.

```
1659 patch faces    layers    overall thickness
1660                [m]        [%]
1661 -----
1662 hull 11611      2.94      0.022      97.7
1663
1664 Layer mesh : cells:693225 faces:2123639 points:738847
1665 Cells per refinement level:
1666 0 693225
1667 writing mesh to time constant
1668 wrote mesh in = 15 s.
1669 Layers added in = 15 s.
1670 Checking final mesh ...
1671 Checking faces in error :
1672 non-orthogonality > 70 degrees : 0
1673 faces with face pyramid volume < 1e-13 : 0
1674 faces with face-decomposition tet quality < 1e-30 : 0
1675 faces with concavity > 80 degrees : 0
1676 faces with skewness > 4 (internal) or 20 (boundary) : 0
1677 faces with interpolation weights (0..1) < 0.05 : 0
1678 faces with volume ratio of neighbour cells < 0.01 : 0
1679 faces with face twist < 0.05 : 0
1680 faces on cells with determinant < 0.001 : 0
1681 Finished meshing without any errors
1682 Finished meshing in = 44.054 s.
1683 End
```

FIGURA N° 5.5: Revisión de calidad de la malla - DTCHull. Fuente propia.

5.3 Simulación y validación de resultados

5.3.1 Configuración de la simulación

La simulación se realiza utilizando como modelo de turbulencia el modelo SST K-Omega, ya que es utilizado en las simulaciones de barcos en investigaciones similares. La configuración de la simulación tomó como referencia las propiedades de los fluidos mencionadas en la investigación de Moctar et al. (2012). Estas propiedades se describen a continuación:

TABLA N° 5.3: Propiedades de los fluidos. Fuente propia.

| Propiedades | Valor | Unidad |
|--------------------------------|-----------|-------------------|
| Temperatura | 16.8 | C° |
| Viscosidad cinemática del agua | 1.09E-06 | m ² /s |
| Densidad del agua | 998.8 | kg/m ³ |
| Viscosidad cinemática del aire | 1.486E-05 | m ² /s |
| Densidad del aire | 1.217 | kg/m ³ |

De igual modo, se presentan las propiedades físicas del barco a simular mediante la Tabla N° 5.4:

TABLA N° 5.4: Propiedades del casco DTCHull

| Propiedades | Valor | Unidad |
|----------------------------------|-------------------|------------------|
| Masa | 413 | kg |
| Centro longitudinal de flotación | 3.043 | m |
| Centro transversal de flotación | 0.135 | m |
| Coordenadas de centro de masa | (3.043; 0; 0.135) | m |
| Gravedad | 9.81 | m/s ² |

La masa del casco considerada para la simulación representa la mitad del peso total debido a la propiedad de simetría de la simulación. Esto permite trabajar solo con la mitad del modelo. El centro de masa del modelo se representa mediante el centro de flotación del barco para mantener el equilibrio y que la simulación se realice en condiciones de cero trimado.

5.3.2 Resultados de la simulación

La simulación se desarrolló en 6 puntos de simulación, a las mismas velocidades como se describen en el trabajo de Moctar et al. (2012), los cuales se pueden apreciar en la Tabla N° 5.2. Después de realizar las simulaciones, los resultados se visualizaron en la herramienta paraView, que pertenece a OpenFOAM.

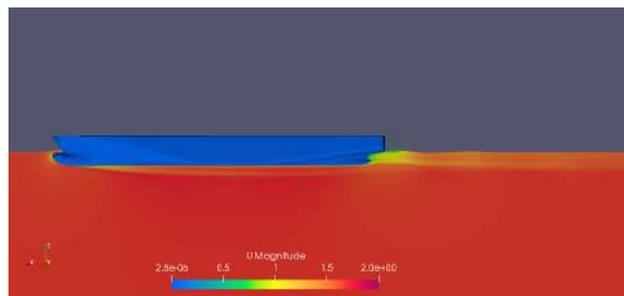


FIGURA N° 5.6: Vel: 1.668 m/s - Campo de velocidades. Fuente propia.

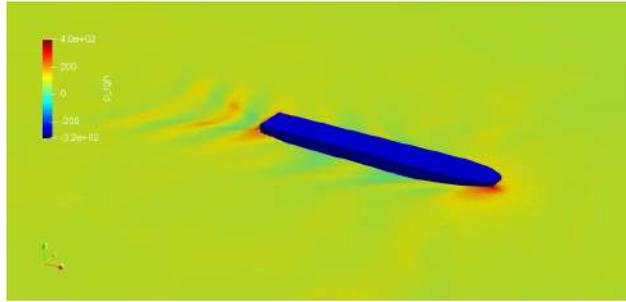


FIGURA N° 5.7: Vel: 1.668 m/s - Campo de presión. Fuente propia.

Para comprobar el correcto desarrollo de la simulación, se ejecuta la evaluación de Y^+ , el cual indica si la capa de inflación desarrollada en el mallado ha sido lo suficientemente fina para poder simular correctamente la capa límite.

El resultado indica un valor promedio de Y^+ de 66.5359. Al encontrarse dentro del rango de 30 a 300, se puede entender que la capa límite ha sido desarrollada adecuadamente. Esto es un indicativo de que la simulación dará resultados adaptados a la realidad física.

Durante el proceso de simulación, se evaluó el parámetro de residuos, el cual indica la diferencia entre los resultados de cada iteración en el tiempo, tendiendo a cero cuando la simulación se vuelve estable.

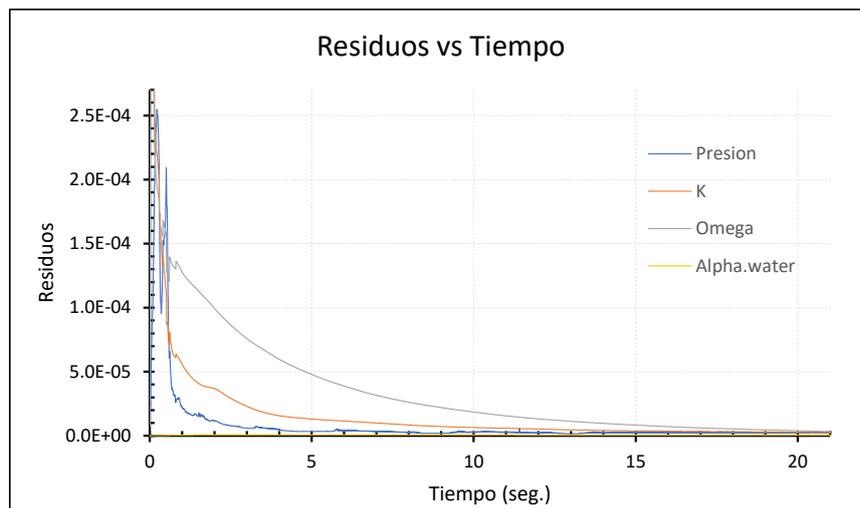


FIGURA N° 5.8: Gráfica de residuos-Vel:1.668. Fuente propia.

De igual forma, se analizan los parámetros de fuerza de arrastre durante todo el tiempo de simulación para poder distinguir cuándo la simulación se vuelve estable y tiende a la convergencia.

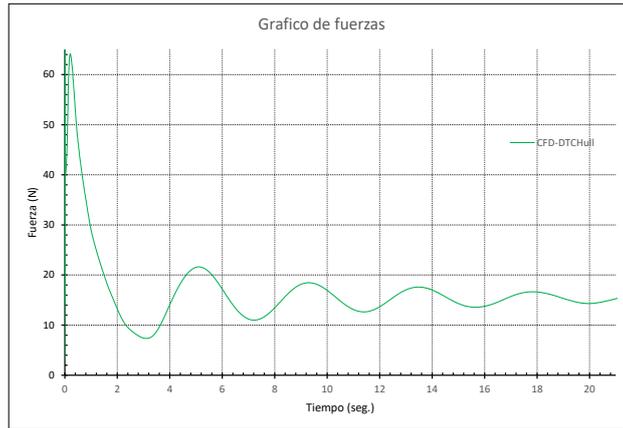


FIGURA N° 5.9: Gráfica de fuerzas de arrastre-Vel:1.668. Fuente propia.

Como parte final del postprocesado, se procesa los datos de las fuerzas de arrastre que interactúan con el casco para poder validar los datos de fuerza con respecto a la prueba de canal.

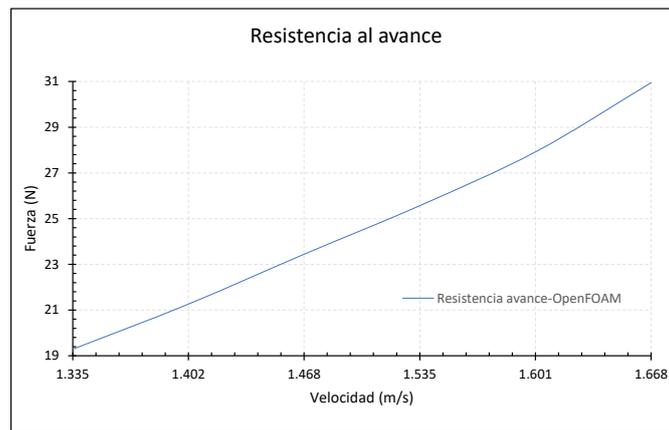


FIGURA N° 5.10: Resistencia al avance-OpenFOAM. Fuente propia.

La Figura N° 5.10 representa la resistencia al avance obtenida de todas las velocidades analizadas. El tiempo total de simulación se puede aproximar a unas 42 horas de esfuerzo físico computacional. En la Tabla N° 5.5 se aprecia los datos resultantes.

TABLA N° 5.5: Tabla de resistencia al avance generada con OpenFOAM

| Resistencia al avance | | |
|-----------------------|-------|-------------|
| Velocidad (m/s) | Fr | Fuerzas (N) |
| 1.335 | 0.174 | 19.287 |
| 1.401 | 0.183 | 21.241 |
| 1.469 | 0.192 | 23.468 |
| 1.535 | 0.200 | 25.573 |
| 1.602 | 0.209 | 27.942 |
| 1.668 | 0.218 | 30.944 |

5.3.3 Validación de resultados

La validación se realiza comparando los valores entre los datos de la simulación de OpenFOAM, los cuales se describen en la Tabla N° 5.5, y los valores obtenidos de las pruebas de remolque descritos en el estudio de Moctar et al. (2012), los cuales se mencionan en la Tabla N° 5.2.

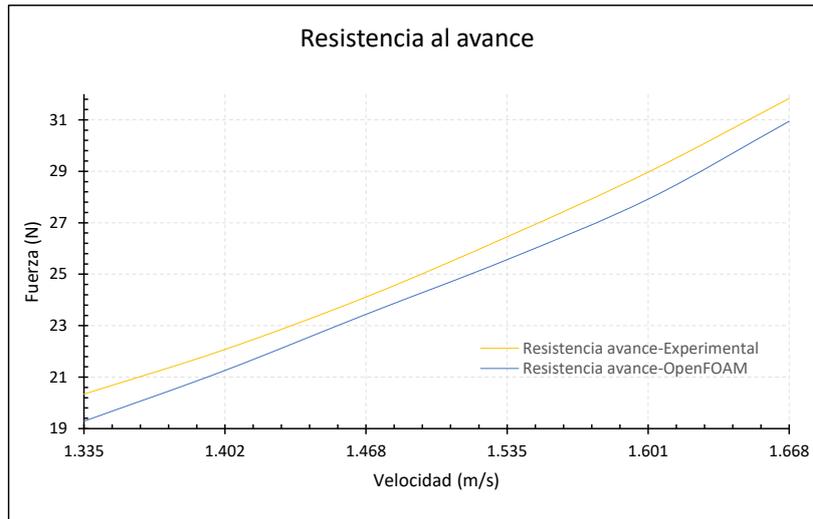


FIGURA N° 5.11: Comparación de resultados-resistencia al avance. Fuente propia.

TABLA N° 5.6: Comparación de resultados y errores-DTCHull

| Resistencia al avance | | | | |
|-----------------------|-------|------------------------|----------------------------|----------|
| Velocidad (m/s) | Fr | Fuerza (N) OpenFOAM | Fuerza (N) Experimental | Error(%) |
| 1.335 | 0.174 | 19.287 | 20.340 | 5.18 % |
| 1.401 | 0.183 | 21.241 | 22.060 | 3.71 % |
| 1.469 | 0.192 | 23.468 | 24.140 | 2.78 % |
| 1.535 | 0.200 | 25.573 | 26.460 | 3.35 % |
| 1.602 | 0.209 | 27.942 | 28.990 | 3.62 % |
| 1.668 | 0.218 | 30.944 | 31.830 | 2.78 % |
| Error promedio | | | | 3.57 % |

Como se puede observar en la Tabla N° 5.6, el error promedio resultante de comparar las pruebas de remolque con la simulación CFD es del 3.57%, este valor se encuentra dentro del margen común de error al compararlo con otras investigaciones similares, tal como se puede apreciar en Bahatmaka y Kim (2019). Este resultado puede ser mejorado con un refinamiento de mayor calidad y una mejor planificación del mallado estructurado.

Capítulo VI: Simulación CFD para el barco DELIA I

6.1 Modelo a escala

El modelo a escala del barco DELIA I representa la geometría tridimensional que será simulada en el software OpenFOAM, y que dará como resultado datos a escala reducida que posteriormente serán extrapolados a la escala real del prototipo del barco. Para la generación del modelo a escala y su posterior simulación, se deben tener en cuenta las características de desplazamiento que influyen en el barco. En este caso, se deben considerar las dos condiciones de trabajo que se están estudiando, ya que la carga de peso varía en cada una de ellas.

6.1.1 Generación del modelo a escala

El modelo a escala se basa en el prototipo del barco DELIA I, creado mediante fotogrametría (ver Figura N° 4.17). Se optó por una escala de 1:5 para mantener una longitud similar a la investigación de Bilec y Obreja (2020), que se centra en el análisis de la resistencia al avance de un barco pesquero arrastrero.

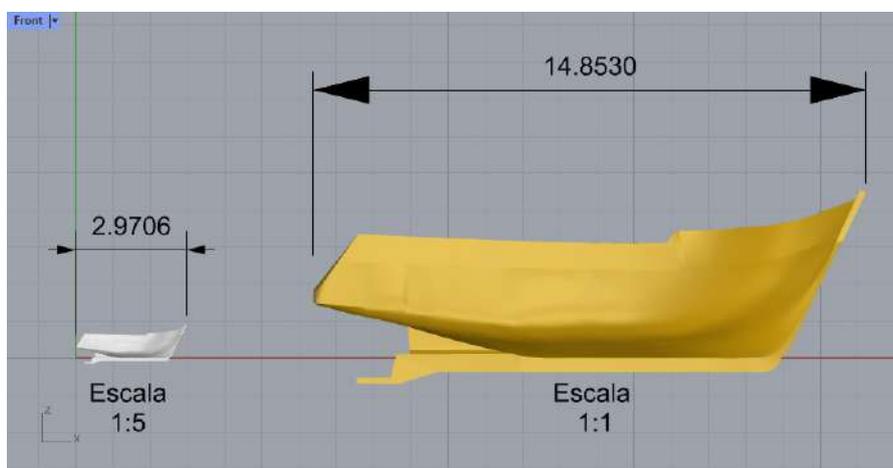


FIGURA N° 6.1: Modelo-Prototipo Barco DELIA I. Fuente propia.

El modelo a escala se procesa mediante Rhinoceros para obtener un modelo en formato de malla (STL), el cual puede ser exportado posteriormente a OpenFOAM para su simulación.

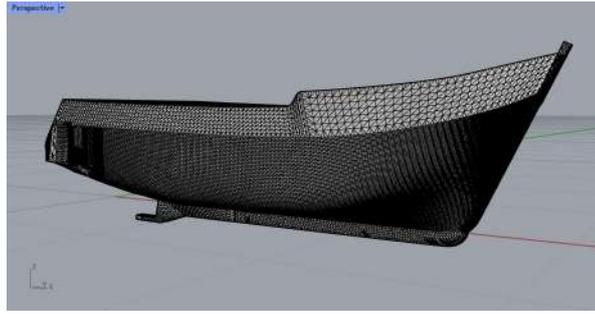


FIGURA N° 6.2: Modelo formato STL - Delia I. Fuente propia.

6.1.2 Características del modelo a escala

A continuación, se describen las características principales del modelo a escala DELIA I. Estas características se dividen en las dos condiciones de trabajo en las cuales el barco DELIA I será simulado.

TABLA N° 6.1: Características principales-modelo escala DELIA I

| Dimensiones | Condición: Prueba de mar | Condición: Servicio |
|---------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Escala | 1:5 | 1:5 |
| Eslora total (m) | 2.971 | 2.971 |
| Eslora de flotación (m) | 2.434 | 2.617 |
| Manga en línea de flotación (m) | 1.266 | 1.273 |
| Calado medio (m) | 0.237 | 0.279 |
| Ángulo de trimado (°) | 0 | 0 |
| Volumen sumergido (m3) | 0.358 | 0.473 |
| Coefficiente de block | 0.491 | 0.509 |
| Superficie mojada (m2) | 3.503 | 3.936 |

6.2 Mallado de la geometría

6.2.1 Delimitación del dominio computacional

De igual modo que en la simulación del modelo DTCHull, el dominio computacional del modelo a escala DELIA I se limitará teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- Plano de ingreso: $2L_{OA}$ de distancia respecto al casco.
- Plano de salida: $5L_{OA}$ de distancia respecto al casco.
- Plano de pared: $3L_{OA}$ de distancia respecto al casco.
- Plano de fondo: $3L_{OA}$ de distancia respecto al casco.

- Plano de atmósfera: $1.2L_{OA}$ de distancia respecto al casco.

Quedando la limitación del dominio de la siguiente forma:

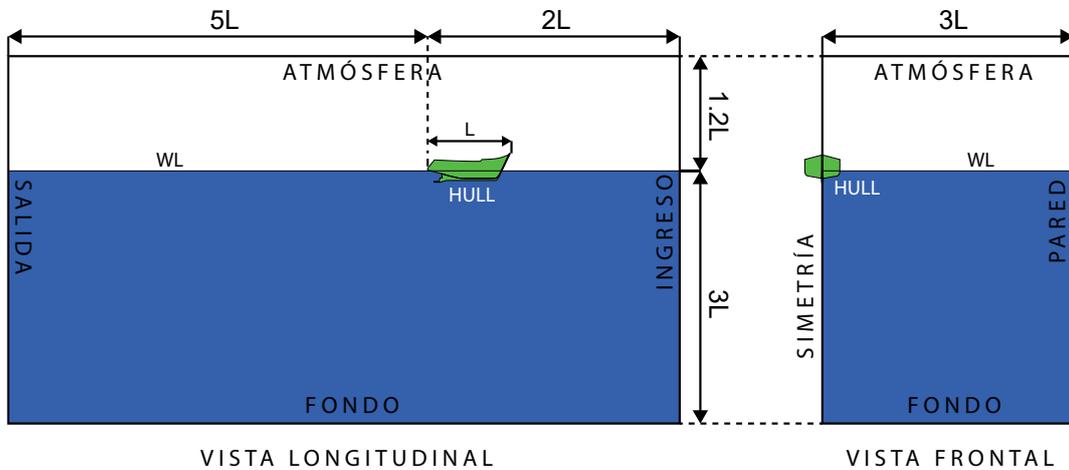


FIGURA N° 6.3: Esquema del dominio computacional. Fuente propia.

6.2.2 Mallado estructurado en OpenFOAM

El mallado del modelo a escala DELIA I fue refinado con 6 zonas de refinamiento respecto al barco ($T_1; T_2 \dots T_6$), una zona de refinamiento para la separación de fases (W_1) y una zona de refinamiento (Z_1) para la interacción de los fluidos y el casco.

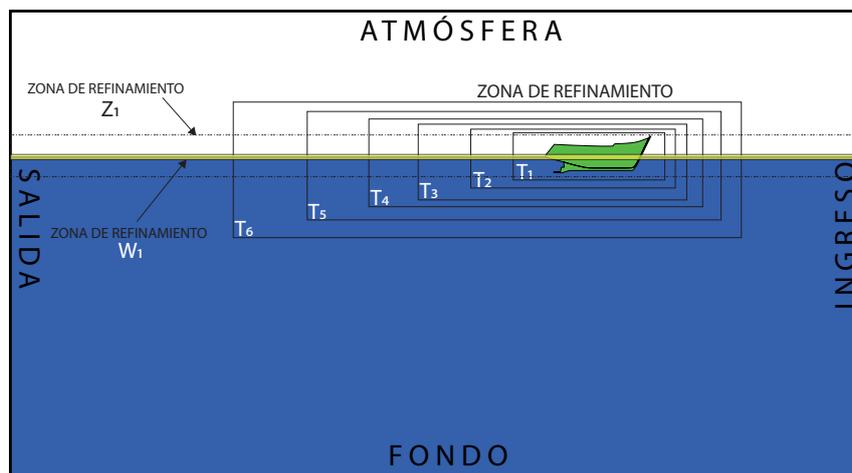


FIGURA N° 6.4: Esquema del dominio computacional. Fuente propia.

El mallado en OpenFOAM se realiza utilizando las herramientas de blockMesh para mallar el dominio y snappyHexMesh para el mallado de la superficie del casco.

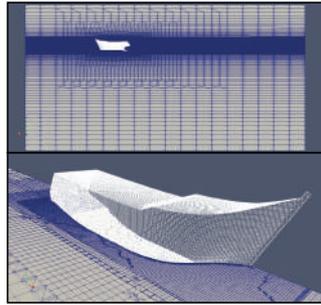


FIGURA N° 6.5: Mallado de la geometría - DELIA I. Fuente propia.

El resultado del mallado tiene un total de 1,095,615 celdas. Una cantidad mucho mayor que en el modelo de validación debido a la complejidad de la geometría. La capa de inflación se desarrollo en un 95.5 %.

```

2105 patch faces   layers   overall thickness
2106             [m]     [%]
2107 -----
2108 hull 18233    2.88    0.0179    95.5
2109
2110 Layer mesh : cells:1095615 faces:3342935 points:1153523
2111 Cells per refinement level:
2112     0 1095615
2113 writing mesh to time constant
2114 wrote mesh in = 42.043 s.
2115 Layers added in = 42.043 s.
2116 Checking final mesh ...
2117 checking faces in error :
2118 non-orthogonality > 70 degrees : 0
2119 faces with face pyramid volume < 1e-13 : 0
2120 faces with face-decomposition tet quality < 1e-20 : 0
2121 faces with concavity > 80 degrees : 0
2122 faces with skewness > 4 (internal) or 20 (boundary) : 0
2123 faces with interpolation weights (0..1) < 0.05 : 0
2124 faces with volume ratio of neighbour cells < 0.01 : 0
2125 faces with face twist < 0.05 : 0
2126 faces on cells with determinant < 0.001 : 0
2127 Finished meshing without any errors
2128 Finished meshing in = 102.825 s.
2129 End
2130
2131 Finalising parallel run
  
```

FIGURA N° 6.6: Revisión de la calidad de la malla - DELIA I. Fuente propia.

6.3 Simulación del modelo

6.3.1 Configuración de la simulación

La simulación se realiza utilizando como modelo de turbulencia el modelo SST K-Omega. La configuración de la simulación tomó como referencia las propiedades de los fluidos mencionadas en la investigación de Moctar et al. (2012). Estas propiedades se describen a continuación:

TABLA N° 6.2: Propiedades de los fluidos. Fuente propia.

| Propiedades | Valor | Unidad |
|--------------------------------|-----------|--------|
| Temperatura | 16.8 | C° |
| Viscosidad cinemática del agua | 1.09E-06 | m2/s |
| Densidad del agua | 998.8 | kg/m3 |
| Viscosidad cinemática del aire | 1.486E-05 | m2/s |
| Densidad del aire | 1.217 | kg/m3 |

De igual modo, se presentan las propiedades físicas del barco a simular en las 2 condiciones de trabajo en las que se desarrollara (prueba de mar y condición de servicio).

TABLA N° 6.3: Propiedades del casco DELIA I

| Propiedades | Condición Prueba de mar | Condición servicio | Unidad |
|----------------------------------|-------------------------|--------------------|------------------|
| Masa | 178.974 | 236.046 | kg |
| Centro longitudinal de flotación | 1.425 | 1.388 | m |
| Centro Vertical de flotación | 0.149 | 0.176 | m |
| Coordenadas del centro de masa | (1.425; 0 ; 0.149) | (1.388; 0; 0.176) | m |
| Gravedad | 9.81 | 9.81 | m/s ² |

La masa del casco considerada para la simulación representa la mitad del peso total debido a la propiedad de simetría de la simulación. Esto permite trabajar solo con la mitad del modelo. El centro de masa del modelo se representa mediante el centro de flotación del barco para mantener el equilibrio y que la simulación se realice en condiciones de cero trimado.

6.3.2 Resultados de la simulación

La simulación se desarrolló en 6 puntos de simulación, los cuales se pueden apreciar en la Tabla N° 6.4.

TABLA N° 6.4: Condiciones de simulación - DELIA I

| Nudos (kn) (Escala real) | V_m (m/s) (Escala 1:5) | Condición (Prueba de mar) | | Condición (Servicio) | |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| | | Fr | $Re \times 10^{-6}$ | Fr | $Re \times 10^{-6}$ |
| 5 | 1.150 | 0.235 | 2.569 | 0.227 | 2.761 |
| 6 | 1.380 | 0.282 | 3.082 | 0.272 | 3.314 |
| 7 | 1.610 | 0.330 | 3.596 | 0.318 | 3.866 |
| 8 | 1.840 | 0.377 | 4.110 | 0.363 | 4.418 |
| 9 | 2.070 | 0.424 | 4.623 | 0.409 | 4.971 |
| 10 | 2.300 | 0.471 | 5.137 | 0.454 | 5.523 |

Después de realizar las simulaciones, los resultados se visualizaron en la herramienta paraView, que pertenece a OpenFOAM.

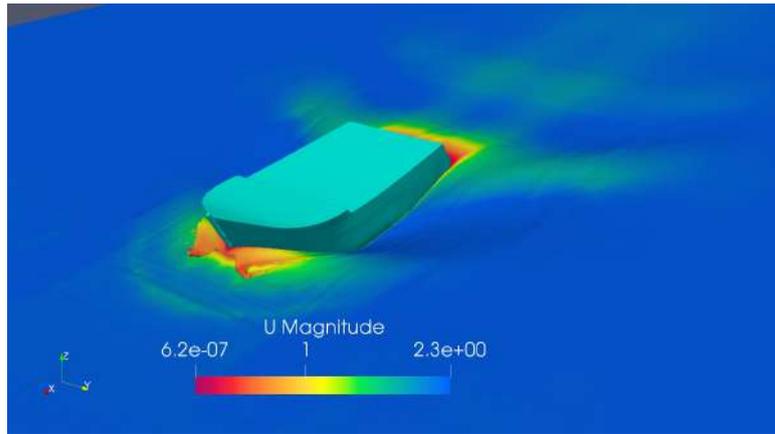


FIGURA N° 6.7: Vel: 2.30 m/s - Campo de velocidades - Condición: Prueba de mar. Fuente propia.

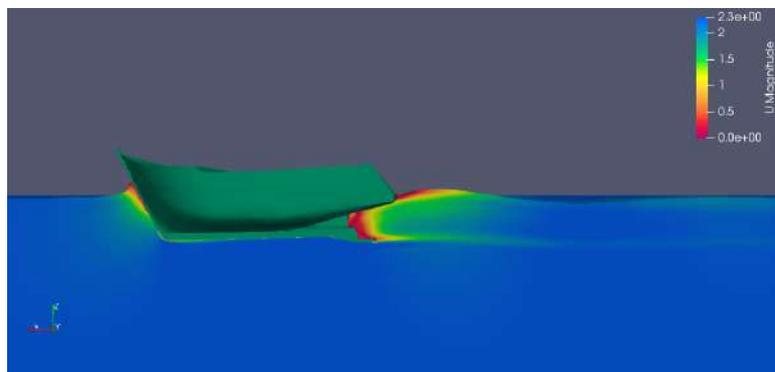


FIGURA N° 6.8: Vel: 2.30 m/s - Campo de velocidades - Condición: Servicio. Fuente propia.

Para comprobar el correcto desarrollo de la simulación, se ejecuta la evaluación de Y^+ , el cual indica si la capa de inflación desarrollada en el mallado ha sido lo suficientemente fina para poder simular correctamente la capa límite.

TABLA N° 6.5: Valores Y^+ - simulación DELIA I

| Condición | Y^+ promedio |
|---------------|----------------|
| Prueba de mar | 82.6479 |
| Servicio | 89.8156 |

Al encontrarse dentro del rango de 30 a 300, se puede entender que la capa límite ha sido desarrollada adecuadamente. Esto es un indicativo de que la simulación dará resultados adaptados a la realidad física.

Durante el proceso de simulación, se evaluó el parámetro de residuos, el cual indica la diferencia entre los resultados de cada iteración en el tiempo, tendiendo a cero cuando la simulación se vuelve convergente.

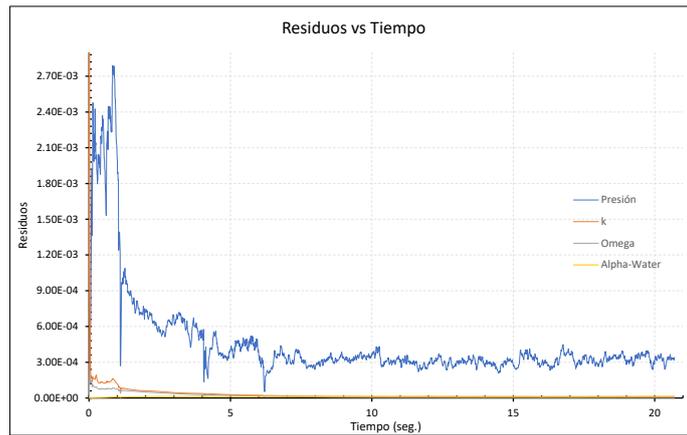


FIGURA N° 6.9: Gráfica de residuos-Vel:2.30 m/s-Condición: Prueba de mar. Fuente propia.

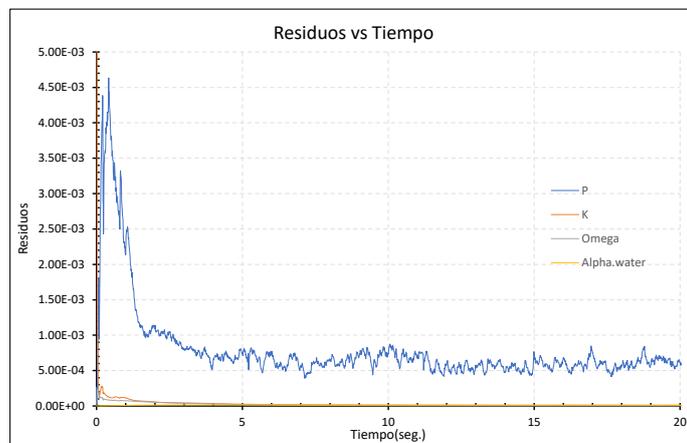


FIGURA N° 6.10: Gráfica de residuos-Vel:2.30 m/s-Condición: Servicio. Fuente propia.

De igual forma, se analizan los parámetros de fuerza de arrastre durante todo el tiempo de simulación para poder distinguir cuándo la simulación se vuelve estable y tiende a la convergencia.

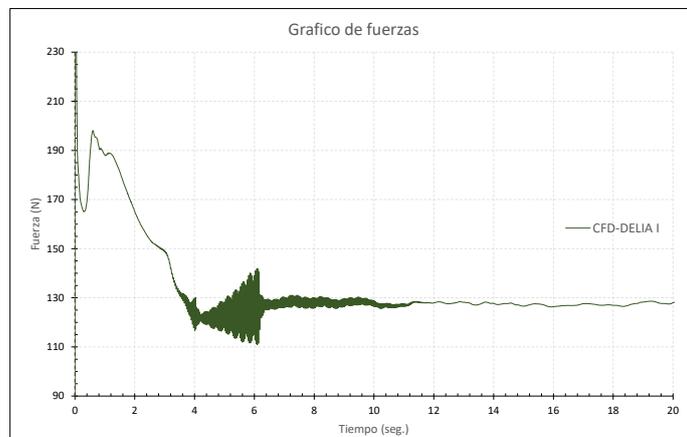


FIGURA N° 6.11: Gráfica de fuerzas de arrastre-Vel:2.30-Condición: Prueba de mar. Fuente propia.

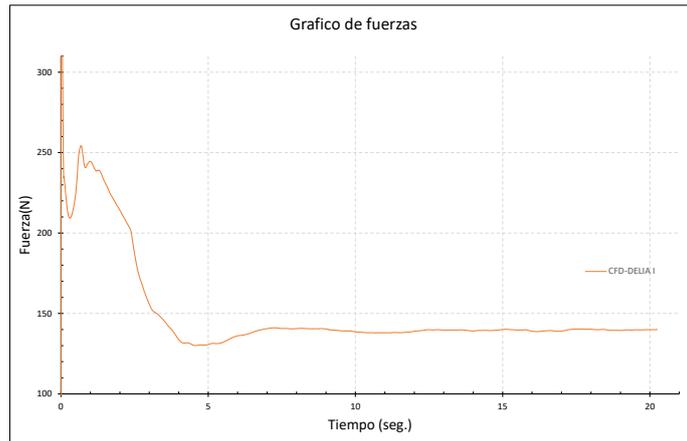


FIGURA N° 6.12: Gráfica de fuerzas de arrastre-Vel:2.30-Condición: Servicio. Fuente propia.

Como parte final del postprocesado, se unifica la data de las fuerzas de arrastre de los 6 puntos simulados para poder analizar la resistencia al avance.

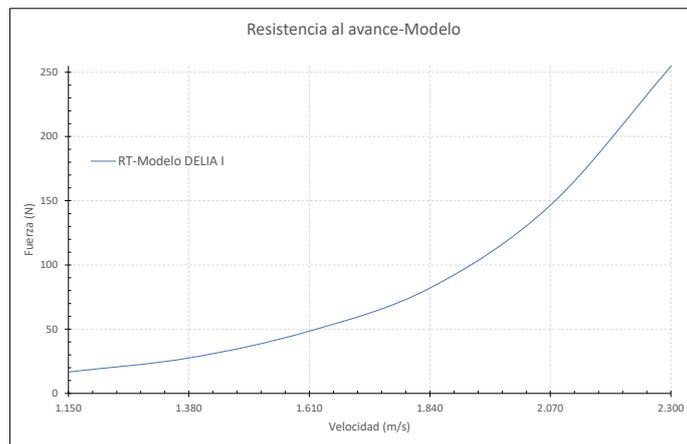


FIGURA N° 6.13: Resistencia al avance(modelo)-Condición: Prueba de mar. Fuente propia.

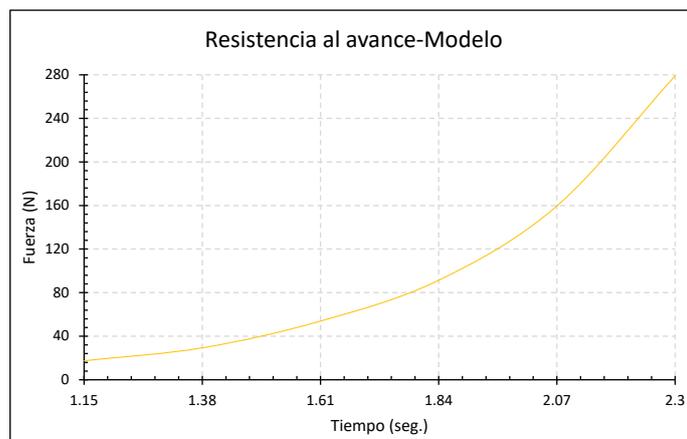


FIGURA N° 6.14: Resistencia al avance(modelo)-Condición: Servicio. Fuente propia.

La gráfica representa la resistencia al avance obtenida de todas las velocidades ana-

lizadas. El tiempo total de simulación se puede aproximar a unas 72 horas de esfuerzo físico computacional por cada condición de prueba.

TABLA N° 6.6: Resultados de modelo-DELIA I

| Resistencia al avance | | | | |
|-----------------------|---------------------------|-------------|----------------------|-------------|
| Velocidad (m/s) | Condición (Prueba de mar) | | Condición (Servicio) | |
| | Fr | Fuerzas (N) | Fr | Fuerzas (N) |
| 1.150 | 0.235 | 16.694 | 0.227 | 17.462 |
| 1.380 | 0.282 | 27.631 | 0.272 | 29.337 |
| 1.610 | 0.330 | 48.544 | 0.318 | 53.954 |
| 1.840 | 0.377 | 82.088 | 0.363 | 91.440 |
| 2.070 | 0.424 | 146.656 | 0.409 | 159.798 |
| 2.300 | 0.471 | 254.863 | 0.454 | 279.377 |

6.4 Extrapolación de resultados

Para la extrapolación de resultados se utilizará como base los métodos planteados por Hughes y el método planteado por la ITTC de 1978, los cuales son mencionados por Molland et al. (2011). Mediante este método se obtiene el coeficiente total de resistencia al avance del barco (C_{Tb}) a partir de los coeficientes de arrastre del modelo a escala. Una vez obtenido el C_{Tb} , se puede desglosar la resistencia total del barco (R_{Tb}) según la ecuación 2.5.

6.4.1 Método ITTC 1978

El método ITTC 1978, tal como se plantea en la ecuación 2.16, dependerá de los coeficientes de arrastre (friccional, residual, aire). Este método requiere una definición del factor de forma ($1+k$), el cual se calcula en la sección 6.4.3. De forma adicional, se considera un valor de resistencia por apéndices (pala de gobierno, bocinas, ejes, keel cooler, etc.), el cual se calcula en la sección 6.4.4. Los cálculos completos son realizados para ambas condiciones de estudio: prueba de mar y servicio, y se encuentran en la sección de anexos (Anexo F). La tabla de resultados finales se muestra a continuación:

TABLA N° 6.7: Método ITTC DELIA I-Condición: prueba de mar

| Velocidad (Kn) | $C_{t_{ITTC}}$ | $R_{t_{ITTC}}$ | R_{app} (N) | Rtotal (N) |
|----------------|----------------|----------------|---------------|------------|
| 5 | 0.0073 | 2180.9094 | 108.7341 | 2289.6435 |
| 6 | 0.0085 | 3640.7344 | 152.1439 | 3792.8783 |
| 7 | 0.011 | 6400.6532 | 202.1806 | 6602.8338 |
| 8 | 0.0142 | 10802.2611 | 258.7062 | 11060.9673 |
| 9 | 0.02 | 19205.4866 | 321.6045 | 19527.0911 |
| 10 | 0.028 | 33228.8797 | 390.7758 | 33619.6555 |

TABLA N° 6.8: Método ITTC DELIA I- Condición: Servicio

| Velocidad (Kn) | $C_{t_{ITTC}}$ | $R_{t_{ITTC}}$ | R_{app} (N) | Rtotal (N) |
|----------------|----------------|----------------|---------------|------------|
| 5 | 0.0068 | 2284.193 | 107.4953 | 2391.6883 |
| 6 | 0.0081 | 3868.5214 | 150.4349 | 4018.9564 |
| 7 | 0.0109 | 7109.1629 | 199.9364 | 7309.0993 |
| 8 | 0.0141 | 12023.5649 | 255.8637 | 12279.4286 |
| 9 | 0.0194 | 20921.5004 | 318.1022 | 21239.6026 |
| 10 | 0.0273 | 36413.5449 | 386.5537 | 36800.0986 |

6.4.2 Método de Hughes

El método de Hughes, tal como se plantea en la ecuación 2.15, dependerá de los coeficientes de arrastre (friccional del barco, friccional del modelo, total del modelo). De forma adicional, se considera el coeficiente por resistencia del aire (C_{AA}) planteado en la ecuación 2.20 y el valor de resistencia por apéndices (R_{APP}) que considera la resistencia de los apéndices (pala de gobierno, bocinas, ejes, keel cooler, etc.), el cual es calculado en la sección 6.4.4. Este método requiere una definición del factor de forma (1+k), el cual se calcula en la sección 6.4.3. Los cálculos completos son realizados para ambas condiciones de estudio: prueba de mar y servicio, y se encuentran en la sección de anexos (Anexo G). La tabla de resultados finales se muestra a continuación.

TABLA N° 6.9: Método Hughes DELIA I- Condición: Prueba de mar

| Velocidad (Kn) | $C_{t_{Hughes}}$ | $R_{t_{Hughes}}$ | R_{app} (N) | Rtotal (N) |
|----------------|------------------|------------------|---------------|------------|
| 5 | 0.0056 | 1650.8108 | 108.7341 | 1759.5449 |
| 6 | 0.0067 | 2877.3923 | 152.1439 | 3029.5362 |
| 7 | 0.0092 | 5361.6598 | 202.1806 | 5563.8404 |
| 8 | 0.0124 | 9445.2084 | 258.7062 | 9703.9146 |
| 9 | 0.0182 | 17487.9669 | 321.6045 | 17809.5714 |
| 10 | 0.0262 | 31108.485 | 390.7758 | 31499.2608 |

TABLA N° 6.10: Método Hughes DELIA I- Condición: Servicio

| Velocidad (Kn) | $C_{t_{Hughes}}$ | $R_{t_{Hughes}}$ | R_{app} (N) | Rtotal (N) |
|----------------|------------------|------------------|---------------|------------|
| 5 | 0.0051 | 1707.9299 | 107.4953 | 1815.4252 |
| 6 | 0.0063 | 3038.7025 | 150.4349 | 3189.1375 |
| 7 | 0.0091 | 5979.6872 | 199.9364 | 6179.6236 |
| 8 | 0.0124 | 10548.3313 | 255.8637 | 10804.195 |
| 9 | 0.0176 | 19054.4079 | 318.1022 | 19372.5101 |
| 10 | 0.0256 | 34108.4924 | 386.5537 | 34495.0461 |

6.4.3 Factor de forma (1+k)

Se utilizará el método de Prohaska descrito en fundamento teórico (sección 2.1.3.5) debido a su facilidad para relacionar los coeficientes friccionales (f_{fm}) y totales (C_{tm}) del modelo con la velocidad del mismo.

Utilizando la ecuación 2.21, se puede generar el factor de forma para ambas condiciones de estudio (prueba de mar y servicio). Los cálculos se encuentran de manera completa en la sección de anexos (Anexo H).

TABLA N° 6.11: Datos resultantes-Método Prohaska-Condición:Prueba de mar

| Velocidad (m/s) | f_n^4/C_{fm} | C_{tm}/C_{fm} |
|-----------------|----------------|-----------------|
| 1.150 | 0.796 | 1.8697 |
| 1.380 | 1.711 | 2.227 |
| 1.610 | 3.265 | 2.9609 |
| 1.840 | 5.713 | 3.9316 |
| 2.070 | 9.355 | 5.6736 |
| 2.300 | 14.540 | 8.1438 |

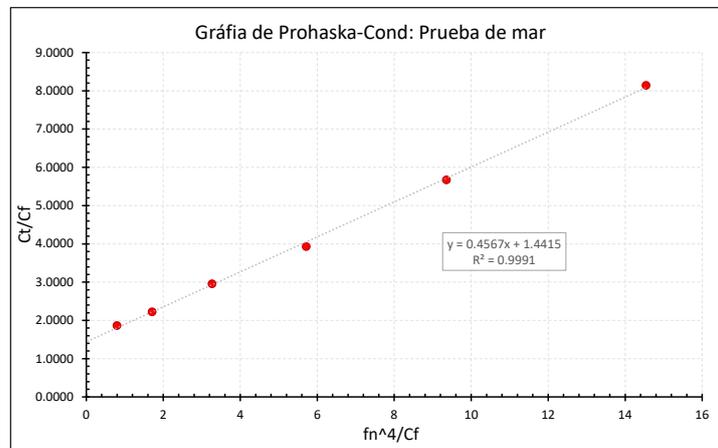


FIGURA N° 6.15: Gráfica de Prohaska-Condición: Prueba de mar. Fuente propia.

TABLA N° 6.12: Datos resultantes-Método Prohaska-Condición:Servicio

| Velocidad (m/s) | f_n^4/C_{fm} | f_n^4/C_{fm} |
|-----------------|----------------|----------------|
| 1.150 | 0.699 | 1.766 |
| 1.380 | 1.501 | 2.134 |
| 1.610 | 2.86 | 2.970 |
| 1.840 | 5.010 | 3.951 |
| 2.070 | 8.203 | 5.577 |
| 2.300 | 12.748 | 8.052 |

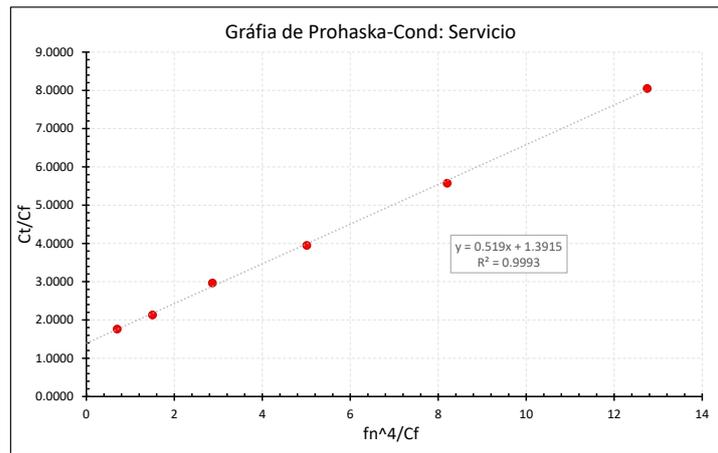


FIGURA N° 6.16: Gráfica de Prohaska-Condición: Servicio. Fuente propia.

Como se puede apreciar en las figuras 6.15 y 6.16, la variable independiente de la función lineal representa el valor del factor de forma, siendo los resultados los siguientes:

TABLA N° 6.13: Factor de forma-Método Prohaska

| Metodo Prohaska | Cond: Prueba de mar | cond: Servicio |
|-----------------|---------------------|----------------|
| (1+k) | 1.4415 | 1.3915 |

6.4.4 Resistencia por apéndices

Para el barco DELIA I, se consideran 5 elementos clave en el análisis: pala de gobierno, bocina de codaste, eje colero (expuesto) y keel cooler. El método empleado para el cálculo será el método de Holtrop y Mennen descrito en fundamento teórico.

En la tabla 6.14 se presenta la relación de áreas utilizadas y factores de forma usados. Como resultados finales se presenta el balance de resistencia por apéndices para cada velocidad y en cada condición estudiada (ver tabla 6.15).

TABLA N° 6.14: Datos de apéndices-DELIA I

| Tipo de apéndice | Área (m ²) | Factor de forma (1+k ₂) |
|-------------------|------------------------|-------------------------------------|
| Pala de gobierno | 2.199 | 1.5 |
| Bocina de codaste | 0.482 | 3 |
| Eje colero | 0.017 | 2 |
| keel cooler | 5.74 | 1.4 |

TABLA N° 6.15: Resistencia por apéndices

| Velocidad (Nudos) | Resistencia (N) (Cond: Prueba de mar) | Resistencia (N) (Cond: Servicio) |
|-------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| 5 | 108.734 | 107.495 |
| 6 | 152.144 | 150.435 |
| 7 | 202.181 | 199.936 |
| 8 | 258.706 | 255.863 |
| 9 | 321.604 | 318.102 |
| 10 | 390.776 | 386.553 |

EL método de cálculo de áreas y de la resistencia por apéndices se detalla en la sección de anexos (anexo I).

6.4.5 Curvas de resistencia al avance barco DELIA I

Realizada la extrapolación de acuerdo a los métodos establecidos, se presentan las curvas de resistencia al avance para las dos condiciones de estudio.

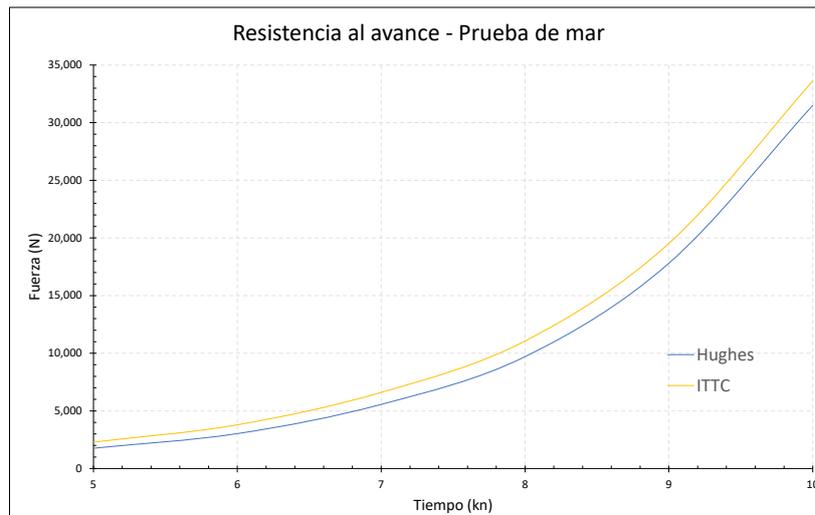


FIGURA N° 6.17: Resistencia al avance barco DELIA I-Condición: Prueba de mar. Fuente propia.

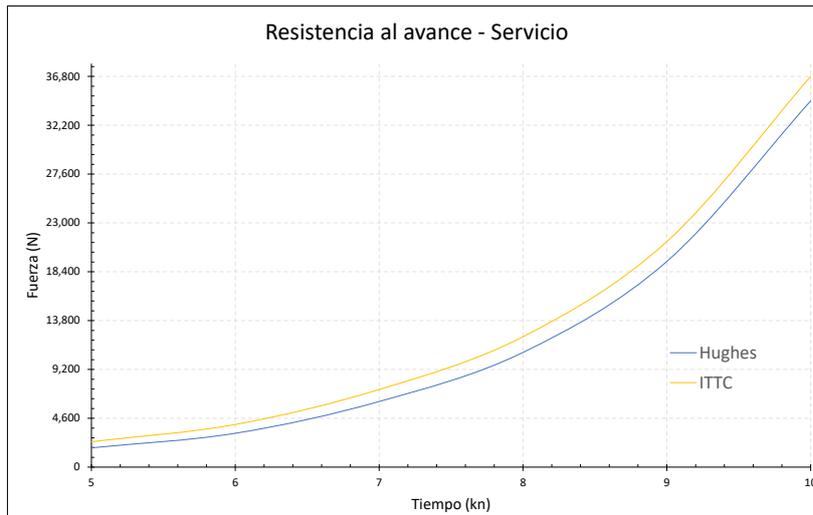


FIGURA N° 6.18: Resistencia al avance barco DELIA I-Condición: Servicio. Fuente propia.

6.5 Cálculo de curva del propulsor

Para generar las curvas de propulsión y, por consiguiente, obtener el rendimiento del barco DELIA I en el mar, se utiliza el siguiente proceso descrito.

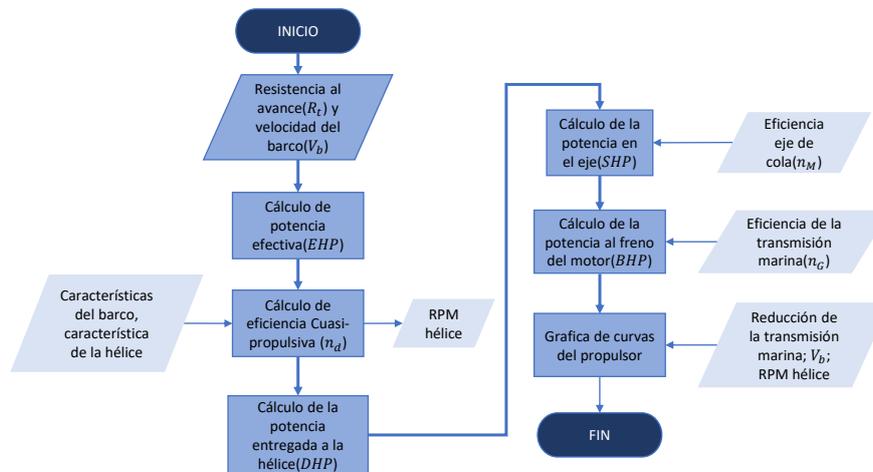


FIGURA N° 6.19: Proceso de obtención de curvas de propulsor. Fuente propia.

El proceso se basa en una adaptación de lo descrito en la Figura N° 2.9. No se considera el factor de correlación SCF para la corrección de DHP, ya que se utilizará el modelo experimental propuesto por Oortmerssen (1971), mencionado en el fundamento teórico. A continuación, se detalla el proceso de cálculos, teniendo en cuenta que solo se evaluará la condición de prueba de mar para su posterior validación en el siguiente capítulo. La condición de servicio se abordará en el capítulo VII, en el que se hace un estudio de optimización.

6.5.1 Cálculo de potencia efectiva (EHP)

El cálculo de la potencia efectiva es simple, se sigue la ecuación 2.25 y se le añade un factor de conversión 0.7457 para convertir a caballos de fuerza (HP).

$$EHP = V_b * R_T * 0.7457$$

El cálculo se aplica teniendo en cuenta que se obtuvo el resultado de resistencia al avance para los métodos de ITTC (Tabla N° 6.7) y Hughes (Tabla N° 6.9), y para la condición de estudio de prueba de mar. A continuación se presentan los resultados.

TABLA N° 6.16: Resultados EHP - Método Hughes

| Velocidad (Nudos) | Resistencia Total (N) | EHP (hp) |
|-------------------|-----------------------|----------|
| 2.57 (5kn) | 1759.5449 | 6.0694 |
| 3.09 (6kn) | 3029.5362 | 12.5401 |
| 3.60 (7kn) | 5563.8404 | 26.8687 |
| 4.12 (8kn) | 9703.9146 | 53.5564 |
| 4.63 (9kn) | 17809.5714 | 110.5783 |
| 5.14 (10kn) | 31499.2608 | 217.3073 |

TABLA N° 6.17: Resultados EHP - Método ITTC

| Velocidad (Nudos) | Resistencia Total (N) | EHP (hp) |
|-------------------|-----------------------|----------|
| 2.57 (5kn) | 2289.6436 | 7.8979 |
| 3.09 (6kn) | 3792.8782 | 15.6998 |
| 3.60 (7kn) | 6602.8338 | 31.8862 |
| 4.12 (8kn) | 11060.9672 | 61.046 |
| 4.63 (9kn) | 19527.0911 | 121.2423 |
| 5.14 (10kn) | 33619.6555 | 231.9355 |

6.5.2 Cálculo de eficiencia cuasi-propulsiva

6.5.2.1 Cálculo eficiencia del casco (n_h)

Para el cálculo de la eficiencia del casco (n_h) tal como se describe en la ecuación 2.40 es necesario conocer los valores de los coeficientes de estela efectiva (w_t) y el coeficiente de deducción de empuje (t), ambos valores se estimaran utilizando el método de Oortmerssen (1971), descrito en fundamento teórico. Los cálculos para w_t y t se hallan

usando las ecuaciones 2.45 y 2.49. Las variables independientes se presentan a continuación.

TABLA N° 6.18: Control de variables-Eficiencia del casco-Condición: Prueba de mar

| Variables independientes | Valor |
|--|---------------|
| L_{PP} | 13.246 m |
| L_{WL} | 12.170 m |
| L_D | 12.708 m |
| B_{WL} | 6.331 m |
| $C_{P(L_D)} = f(L_{WL}, L_D, A_M)$ | 0.621 m |
| $LCB\%$ | 2.178 |
| $Fn_{(L_D)}$ | $f(V_B, L_D)$ |
| Diámetro de hélice (ϕ_{helice}) | 60 pulg |

A continuación se muestra la tabla de resultados:

TABLA N° 6.19: Cálculo eficiencia del casco - Condición: Prueba de mar

| Velocidad (Nudos) | $Fn_{(L_D)}$ | W_t | t | n_h |
|-------------------|--------------|--------|--------|--------|
| 5 | 0.2304 | 0.2215 | 0.2559 | 0.9558 |
| 6 | 0.2765 | 0.2258 | 0.2429 | 0.9779 |
| 7 | 0.3225 | 0.2296 | 0.2328 | 0.9959 |
| 8 | 0.3686 | 0.2327 | 0.2254 | 1.0096 |
| 9 | 0.4147 | 0.2353 | 0.2208 | 1.019 |
| 10 | 0.4608 | 0.2373 | 0.219 | 1.0241 |

6.5.2.2 Cálculo eficiencia del propulsor n_0

Para el cálculo de la eficiencia del propulsor mediante la ecuación 2.35, se utilizarán las ecuaciones polinomiales de Wageningen K_T y K_Q descritas en la ecuación 2.36 y 2.37, así como la ecuación del grado de avance (J) descrito en la ecuación 2.34. Las variables de ingreso se muestran a continuación.

TABLA N° 6.20: Control de variables-Eficiencia del propulsor

| Variables independientes | Valor | Unidad |
|-----------------------------------|---------------|----------|
| Diámetro hélice (D) | 60 | Pulgadas |
| Paso hélice (P) | 44 | Pulgadas |
| Relación área disco (A_E/A_0) | 0.6 | - |
| Número de palas (Z) | 5 | - |
| Velocidad de avance (V_a) | $f(V_b, W_T)$ | Nudos |

Las ecuaciones K_T y K_Q tienen una dependencia del grado de avance (J), el cual

depende a su vez de las revoluciones de la hélice y la velocidad de avance. La relación entre la velocidad de avance y las revoluciones de la hélice se dan mediante el empuje suministrado al barco y el empuje proporcionado por la hélice. El proceso de estimación de las revoluciones de la hélice para un equilibrio con la velocidad del barco es tomado de Molland et al. (2011) y se presentan en la Figura N° 6.20.

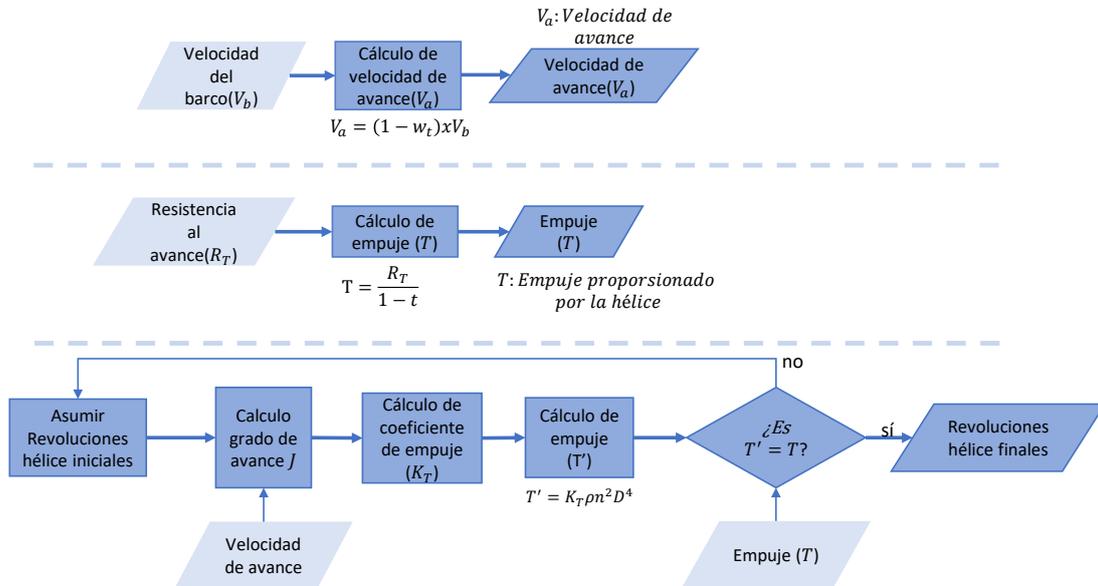


FIGURA N° 6.20: Esquema de identificación de revoluciones del propulsor. Fuente propia.

Se trata de un proceso iterativo para calcular la RPM de la hélice y posteriormente completar los cálculos de n_0 . En este cálculo existe influencia por parte de los métodos de extrapolación de la resistencia al avance de Hughes y ITTC y además habrá influencia de la condición estudiada: prueba de mar. Los resultados del cálculo iterativo se ven en las tablas 6.21 y 6.22.

TABLA N° 6.21: Eficiencia del propulsor - Condición: Prueba de mar - Método: Hughes

| Velocidad (Nudos) | Velocidad de avance (m/s) | RPM (Hélice) | J | K_T | K_Q | n_0 |
|-------------------|---------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| 5 | 2.003 | 128.386 | 0.614 | 0.093 | 0.015 | 0.606 |
| 6 | 2.390 | 158.650 | 0.593 | 0.104 | 0.016 | 0.608 |
| 7 | 2.774 | 196.993 | 0.555 | 0.122 | 0.018 | 0.601 |
| 8 | 3.158 | 241.465 | 0.515 | 0.140 | 0.020 | 0.584 |
| 9 | 3.540 | 301.733 | 0.462 | 0.163 | 0.022 | 0.550 |
| 10 | 3.924 | 376.268 | 0.411 | 0.186 | 0.024 | 0.508 |

TABLA N° 6.22: Eficiencia del propulsor - Condición: Prueba de mar - Método: ITTC

| Velocidad (Nudos) | Velocidad de avance (m/s) | RPM (Hélice) | J | K_T | K_Q | n_0 |
|-------------------|---------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| 5 | 2.003 | 135.582 | 0.582 | 0.109 | 0.017 | 0.607 |
| 6 | 2.390 | 166.811 | 0.564 | 0.117 | 0.017 | 0.604 |
| 7 | 2.774 | 205.662 | 0.531 | 0.132 | 0.019 | 0.592 |
| 8 | 3.158 | 250.450 | 0.496 | 0.148 | 0.020 | 0.574 |
| 9 | 3.540 | 310.567 | 0.449 | 0.169 | 0.022 | 0.540 |
| 10 | 3.924 | 384.801 | 0.401 | 0.189 | 0.024 | 0.499 |

6.5.2.3 Cálculo eficiencia rotativa relativa n_r

El cálculo de la eficiencia rotativa relativa (n_r) es estimada mediante el método de Oortmerssen (1971) descrito en la ecuación 2.51 descrita en fundamento teórico. Las variables independientes de entrada son las mismas de la Tabla N° 6.18. A continuación se muestra la tabla de resultados para la condición estudiada: prueba de mar.

TABLA N° 6.23: Eficiencia rotativa relativa - Condición: Prueba de mar

| Velocidad (Nudos) | $F n_{(L_D)}$ | n_r |
|-------------------|---------------|--------|
| 5 | 0.2304 | 1.1181 |
| 6 | 0.2765 | 1.0982 |
| 7 | 0.3225 | 1.0763 |
| 8 | 0.3686 | 1.0526 |
| 9 | 0.4147 | 1.0270 |
| 10 | 0.4608 | 0.9995 |

6.5.2.4 Cálculo eficiencia cuasi-propulsiva

Para el cálculo de la eficiencia cuasi-propulsiva (n_d) se utilizará la ecuación 2.28, la cual depende de los valores previamente calculados n_0, n_h, n_r . A continuación se presentan los resultados para la condición estudiada: prueba de mar, y para los dos métodos de cálculo de resistencia empleados: Hughes y ITTC.

TABLA N° 6.24: Eficiencia cuasipropulsiva - Condición: Prueba de mar - Método: Hughes

| Velocidad (Nudos) | RPM (Hélice) | n_0 | n_h | n_r | n_d |
|-------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| 5 | 128.386 | 0.606 | 0.956 | 1.118 | 0.648 |
| 6 | 158.650 | 0.608 | 0.978 | 1.098 | 0.653 |
| 7 | 196.993 | 0.601 | 0.996 | 1.076 | 0.644 |
| 8 | 241.465 | 0.584 | 1.010 | 1.053 | 0.621 |
| 9 | 301.733 | 0.550 | 1.019 | 1.027 | 0.576 |
| 10 | 376.268 | 0.508 | 1.024 | 1.000 | 0.520 |

TABLA N° 6.25: Eficiencia cuasipropulsiva - Condición: Prueba de mar - Método: ITTC

| Velocidad (Nudos) | RPM (Hélice) | n_0 | n_h | n_r | n_d |
|-------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| 5 | 135.582 | 0.607 | 0.956 | 1.118 | 0.649 |
| 6 | 166.811 | 0.604 | 0.978 | 1.098 | 0.649 |
| 7 | 205.662 | 0.592 | 0.996 | 1.076 | 0.635 |
| 8 | 250.450 | 0.574 | 1.010 | 1.053 | 0.610 |
| 9 | 310.567 | 0.540 | 1.019 | 1.027 | 0.565 |
| 10 | 384.801 | 0.499 | 1.024 | 1.000 | 0.511 |

6.5.3 Cálculo potencia entregada a la hélice (DHP)

El cálculo del DHP se hace con la ecuación 2.27 y se aplica teniendo en cuenta que se obtuvo el resultado de resistencia al avance para los métodos de Hughes y ITTC, y para la condición de estudio de prueba de mar. A continuación se presentan los resultados incluyendo las revoluciones de hélice de forma comparativa.

TABLA N° 6.26: Cálculo de DHP-Condición: Prueba de mar-Método: Hughes

| Velocidad (Nudos) | RPM (Hélice) | DHP (hp) |
|-------------------|--------------|----------|
| 5 | 128.386 | 9.366 |
| 6 | 158.650 | 19.206 |
| 7 | 196.993 | 41.694 |
| 8 | 241.465 | 86.256 |
| 9 | 301.733 | 192.064 |
| 10 | 376.268 | 418.282 |

TABLA N° 6.27: Cálculo de DHP-Condición: Prueba de mar-Método: ITTC

| Velocidad (Nudos) | RPM (Hélice) | DHP (hp) |
|-------------------|--------------|----------|
| 5 | 135.582 | 12.171 |
| 6 | 166.811 | 24.208 |
| 7 | 205.662 | 50.228 |
| 8 | 250.450 | 100.136 |
| 9 | 310.567 | 214.525 |
| 10 | 384.801 | 453.880 |

6.5.4 Eficiencia en el eje n_M y transmisión marina n_G

Las eficiencias por parte del eje de propulsión y transmisión marina son tomadas de Ghose y Gokarn (2004). Los valores tomados para ambas eficiencias se describen a continuación:

TABLA N° 6.28: Pérdidas en el eje y transmisión marina

| Eficiencia | Valor(%) |
|--|----------|
| Eficiencia mecánica del eje(n_M) | 97.0% |
| Eficiencia de la transmisión marina(n_G) | 96.0% |

6.5.5 Cálculo potencia en el eje (SHP)

El cálculo del SHP se hace con la ecuación 2.30 y se aplica teniendo en cuenta que se obtuvo el resultado de resistencia al avance para los métodos de Hughes y ITTC, y para la condición de estudio de prueba de mar. A continuación se presentan los resultados incluyendo las revoluciones de la hélice de forma comparativa.

TABLA N° 6.29: Potencia en el eje(SHP)-Condición: Prueba de mar-Método: Hughes

| Velocidad (Nudos) | RPM (Hélice) | SHP (hp) |
|-------------------|--------------|----------|
| 5 | 128.386 | 9.656 |
| 6 | 158.650 | 19.800 |
| 7 | 196.993 | 42.983 |
| 8 | 241.465 | 88.924 |
| 9 | 301.733 | 198.004 |
| 10 | 376.268 | 431.218 |

TABLA N° 6.30: Potencia en el eje(SHP)-Condición: Prueba de mar-Método: ITTC

| Velocidad (Nudos) | RPM (Hélice) | SHP (hp) |
|-------------------|--------------|----------|
| 5 | 135.582 | 12.548 |
| 6 | 166.811 | 24.957 |
| 7 | 205.662 | 51.781 |
| 8 | 250.450 | 103.233 |
| 9 | 310.567 | 221.159 |
| 10 | 384.801 | 467.917 |

6.5.6 Cálculo potencia al freno del motor (BHP)

El cálculo del BHP se hace con la ecuación 2.32:

$$BHP = \frac{SHP}{n_G}$$

El cálculo se aplica teniendo en cuenta que se obtuvo el resultado de resistencia al avance para los métodos de Hughes y ITTC, y para la condición de estudio de prueba de mar. A continuación se presentan los resultados incluyendo las revoluciones de la hélice de

manera comparativa.

TABLA N° 6.31: Potencia al freno(BHP)-Condición: Prueba de mar-Método: Hughes

| Velocidad (Nudos) | RPM (Hélice) | BHP (hp) |
|-------------------|--------------|----------|
| 5 | 128.386 | 10.058 |
| 6 | 158.650 | 20.625 |
| 7 | 196.993 | 44.774 |
| 8 | 241.465 | 92.629 |
| 9 | 301.733 | 206.254 |
| 10 | 376.268 | 449.186 |

TABLA N° 6.32: Potencia al freno(BHP)-Condición: Prueba de mar-Método: ITTC

| Velocidad (Nudos) | RPM (Hélice) | BHP (hp) |
|-------------------|--------------|----------|
| 5 | 135.582 | 13.070 |
| 6 | 166.811 | 25.997 |
| 7 | 205.662 | 53.939 |
| 8 | 250.450 | 107.534 |
| 9 | 310.567 | 230.374 |
| 10 | 384.801 | 487.414 |

6.5.7 Curvas de propulsor

De las tablas 6.31 y 6.32 se grafican las curvas del propulsor. Esto se aplica teniendo en cuenta que se obtuvo el resultado de resistencia al avance para los métodos de Hughes y ITTC, y para la condición de estudio de prueba de mar. A continuación se presentan las gráficas resultantes.

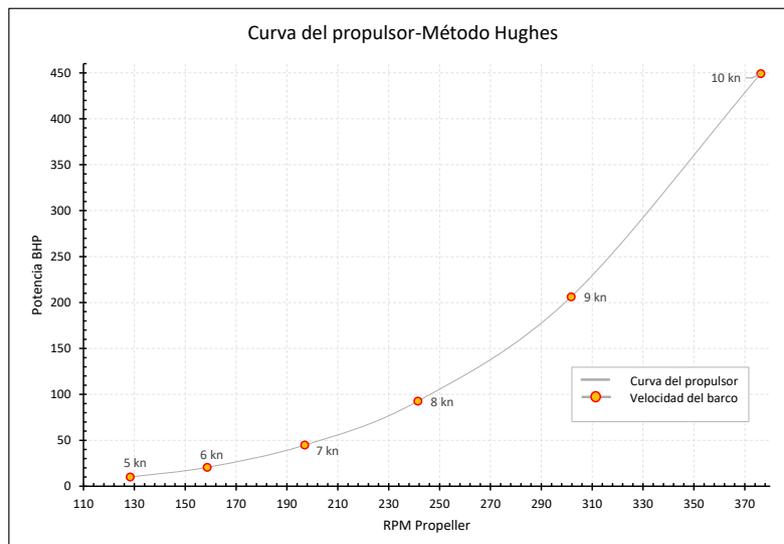


FIGURA N° 6.21: Curva de propulsor-Condición Prueba de mar-Método Hughes. Fuente propia.

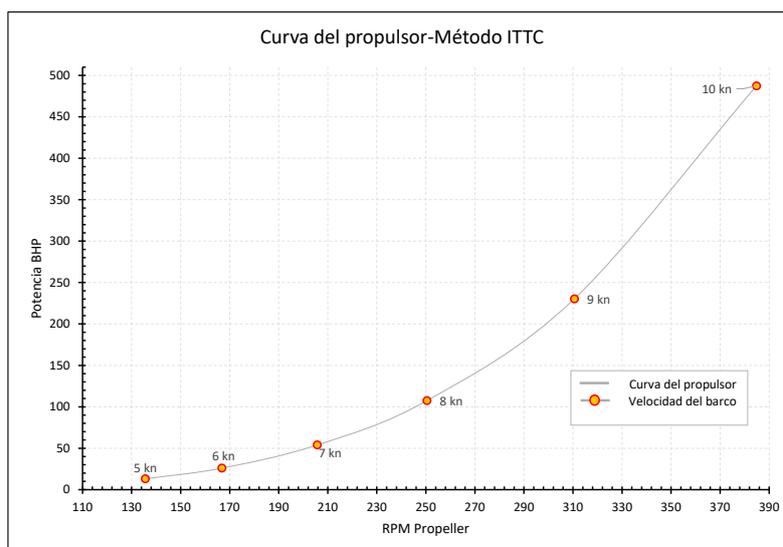


FIGURA N° 6.22: Curva de propulsor-Condición Prueba de mar-Método ITTC. Fuente propia.

6.6 Validación de resultados

6.6.1 Resultados prueba de mar

El barco DELIA I tuvo su botadura en la ciudad de Parachique, Piura. Se tuvo la oportunidad de asistir a las pruebas de mar en donde se analizaron los patrones de velocidad del barco y las RPM alcanzadas por el motor. El método de análisis de datos se describe en el apartado de metodología en la sección 3.4.1.2. A continuación, se muestran imágenes de la prueba realizada.



(a) Abordaje en el barco DELIA I. Fuente propia



(b) Prueba de mar en curso. Fuente propia

FIGURA N° 6.23: Prueba de mar barco DELIA I. Fuente propia

Los datos y explicación del proceso se encuentran completos en la sección de anexos (Anexo C), a continuación se muestra la tabla resumen de RPM de motor y velocidades obtenidas.

TABLA N° 6.33: Datos de RPM y velocidad obtenidos de prueba de mar

| RPM fijas | Vel Prom |
|-----------|----------|
| 800 | 6.42 |
| 1000 | 7.52 |
| 1100 | 7.92 |
| 1200 | 8.38 |
| 1300 | 8.75 |
| 1400 | 9.11 |
| 1500 | 9.28 |
| 1525 | 9.38 |

6.6.2 Comparación de resultados

La idea es comparar los resultados obtenidos en la prueba de mar y los datos de las curvas del propulsor obtenidos para la condición de prueba de mar. Esto se hará para los resultados de los métodos de Hughes y ITTC. Como adicional y para poder realizar la comparación de resultados, se debe convertir las RPM del propulsor (hélice) a RPM del motor. Para esto, simplemente se debe multiplicar los valores por la reducción de la transmisión marina.

$$RPM_{motor} = RPM_{hélice} \times Red_{caja} \quad (6.1)$$

Donde: $Red_{caja} = 4.61$

Utilizando las tablas 6.31 y 6.32 referentes a la prueba de mar, se obtienen las siguientes conversiones de RPM (hélice).

TABLA N° 6.34: Método Hughes - Conversión de RPM

| Velocidad (Nudos) | RPM (Hélice) | RPM (Motor) |
|-------------------|--------------|-------------|
| 5 | 128.386 | 591.859 |
| 6 | 158.650 | 731.378 |
| 7 | 196.993 | 908.137 |
| 8 | 241.465 | 1113.155 |
| 9 | 301.733 | 1390.990 |
| 10 | 376.268 | 1734.597 |

TABLA N° 6.35: Método ITTC - Conversión de RPM

| Velocidad (Nudos) | RPM (Hélice) | RPM (Motor) |
|-------------------|--------------|-------------|
| 5 | 135.582 | 625.033 |
| 6 | 166.811 | 769.000 |
| 7 | 205.662 | 948.102 |
| 8 | 250.450 | 1154.573 |
| 9 | 310.567 | 1431.716 |
| 10 | 384.801 | 1773.934 |

Realizada la conversión, se comparan los datos obtenidos en la prueba real de mar y los resultados teóricos. Respecto a los resultados teóricos vistos en las tablas 6.34 y 6.35, se realizó una interpolación cúbica en relación a las RPM reales descritas en la tabla 6.33. Esto con el fin de hacer una comparación más precisa. A continuación se muestran los resultados para los métodos Hughes y ITTC.

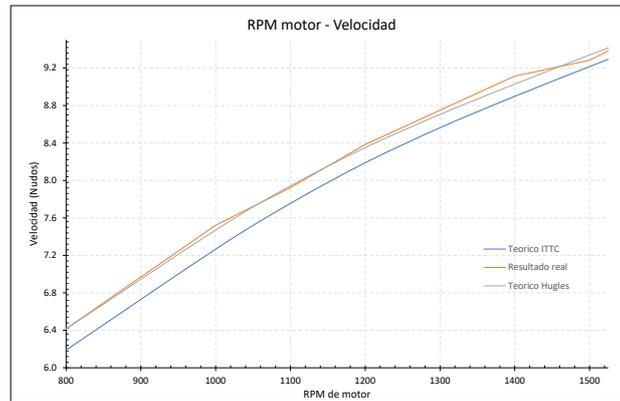


FIGURA N° 6.24: RPM motor vs Velocidad - Barco DELIA I. Fuente propia.

TABLA N° 6.36: Validación de resultados-Método Hughes

| Método Hughes | | | | |
|---------------|------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------|
| RPM | Velocidad real (Nudos) | Velocidad teórica (Nudos) | Margen de error | +/- Vel (Nudos) |
| 800 | 6.417 | 6.415 | 0.039% | 0.002 |
| 1000 | 7.522 | 7.470 | 0.691% | 0.052 |
| 1100 | 7.923 | 7.943 | 0.247% | 0.02 |
| 1200 | 8.383 | 8.350 | 0.390% | 0.033 |
| 1300 | 8.750 | 8.705 | 0.520% | 0.045 |
| 1400 | 9.114 | 9.029 | 0.940% | 0.086 |
| 1500 | 9.283 | 9.340 | 0.607% | 0.056 |
| 1525 | 9.383 | 9.415 | 0.342% | 0.032 |
| Promedio | | | 0.472% | 0.041 |

TABLA N° 6.37: Validación de resultados-Método ITTC

| Método ITTC | | | | |
|-------------|------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------|
| RPM | Velocidad real (Nudos) | Velocidad teórica (Nudos) | Margen de error | +/- Vel (Nudos) |
| 800 | 6.417 | 6.189 | 3.553% | 0.228 |
| 1000 | 7.522 | 7.267 | 3.400% | 0.256 |
| 1100 | 7.923 | 7.755 | 2.118% | 0.168 |
| 1200 | 8.383 | 8.189 | 2.318% | 0.194 |
| 1300 | 8.750 | 8.563 | 2.140% | 0.187 |
| 1400 | 9.114 | 8.898 | 2.372% | 0.216 |
| 1500 | 9.283 | 9.216 | 0.731% | 0.068 |
| 1525 | 9.383 | 9.293 | 0.963% | 0.0904 |
| Promedio | | | 2.199% | 0.176 |

Como se puede apreciar, ambos métodos son aceptables, teniendo una tasa de error baja, variando entre 0.472% para Hughes y 2.199% para el método ITTC. Comparando los resultados, se puede decir que el método con mayor afinidad para el barco de pesca artesanal DELIA I es el método planteado por Hughes.

Capítulo VII: Análisis y optimización de motor, transmisión y hélice

Como parte del cumplimiento de los objetivos de la presente tesis, el objetivo principal es seleccionar adecuadamente el motor, transmisión y hélice para un barco que ya se encuentra construido y tiene problemas de sobrecarga o algún problema de eficiencia, como puede ser una baja velocidad. Para esto, se propone el siguiente flujo de trabajo basado en las etapas de cálculo ejecutadas.

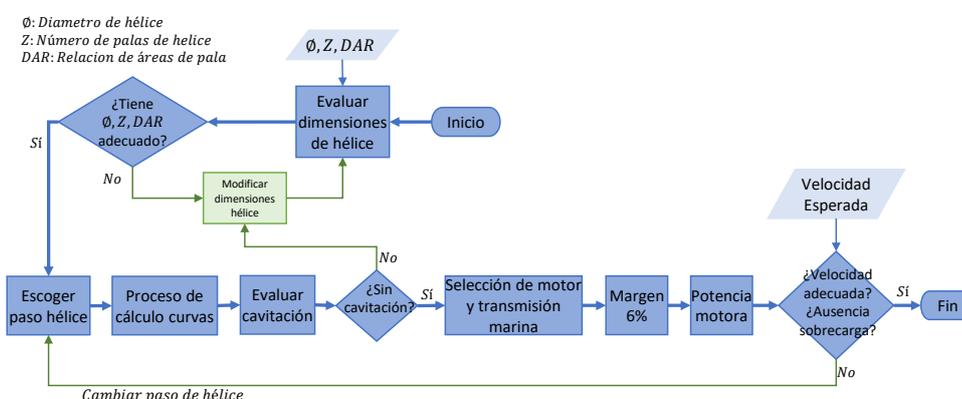


FIGURA N° 7.1: Selección del sistema propulsivo óptimo - Barco DELIA I. Fuente propia.

El proceso representado en la Figura 7.1 se inicia con el dimensionamiento de la hélice. El objetivo principal es verificar si la hélice actual cumple con las dimensiones correctas en términos de diámetro, número de palas (Z) y área (DAR). En caso de que no cumpla con los requisitos, se procede a realizar las modificaciones necesarias. Luego, se selecciona un paso inicial, que generalmente coincide con el paso de la hélice actual (conocida como hélice de trabajo), y se evalúa su viabilidad para su posterior modificación o mantenimiento.

Siguiendo el procedimiento, se llevan a cabo los cálculos pertinentes del propulsor, utilizando los datos específicos del barco y la hélice definida. Es importante tener en cuenta que los datos del barco se toman en condiciones de servicio para garantizar un rendimiento óptimo del sistema propulsivo.

Una vez completados los cálculos del propulsor, se obtienen las curvas del propulsor y la potencia al freno (BHP). En esta etapa, se evalúa la posibilidad de cavitación y se determina si puede convertirse en un problema en el futuro. A continuación, se procede a

la selección del conjunto de motor y transmisión marina en función de los resultados de las curvas del propulsor y la potencia al freno. El objetivo principal es determinar si el motor puede operar a sus máximas revoluciones y satisfacer los requisitos del propulsor.

Después de esta etapa, se agrega un margen de potencia a las BHP máximas requeridas por la hélice para determinar la potencia del motor necesaria para el barco, en esta etapa se evalúa nuevamente si el motor podrá cumplir con las exigencias impuestas por el margen de potencia agregado. Como último paso, se evalúa si se han logrado los resultados esperados, incluida la ausencia de sobrecarga y la obtención de una velocidad óptima para el trabajo.

Es importante destacar que este método no se centra en el diseño de un sistema de propulsión para un proyecto inicial de construcción de un barco. En cambio, su enfoque se orienta a brindar apoyo para la mejora de barcos existentes, con el propósito de modernizar o realizar cambios en su configuración de motor, transmisión y hélice.

7.1 Evaluación del propulsor

7.1.1 Dimensiones de la hélice

Diámetro:

Utilizando los datos de fotogrametría descritos en la sección 4.1.2.5, se evalúan los espacios utilizados para la hélice marina. Los estándares utilizados están basados en los requerimientos de Wilson (2005) descritos en la tabla 2.3.

Con los datos virtuales (digitales) descritos en la tabla 4.8 y las dimensiones de la hélice (ver tabla 4.9), se realiza un plano de espacios de hélice para verificar márgenes aceptables.

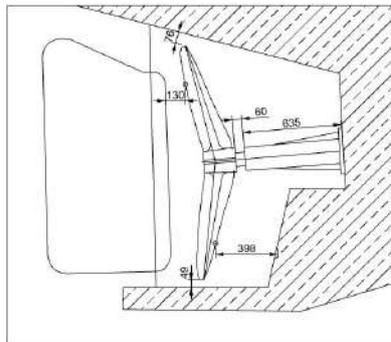


FIGURA N° 7.2: Espacios de hélice actual - Barco DELIA I. Fuente propia.

Posteriormente se comparan las dimensiones con los estándares de la tabla 2.3.

TABLA N° 7.1: Revisión de distancias de hélice-DELIA I

| Descripción | Solicitados | Actuales | Revisión |
|--|-------------|----------|----------|
| 1) Distancia mínima entre puntas de palas y casco. | 259.08 mm | 76 mm | Fail |
| 2) Distancia mínima entre puntas de palas y quilla. | 60.96 mm | 49 mm | Fail |
| 3) Distancia mínima entre dominio de popa y hélice a 35%D. | 411.48 mm | 368 mm | O.K. |
| 4) Distancia máxima entre hélice y timón a 35%D. | 152.4 mm | 130 mm | O.K. |
| 5) Distancia máxima al extremo del eje libre. | 355.6 mm | 60 mm | O.K. |

Como se puede apreciar, la hélice actual no cumple con los márgenes de protección para una hélice, en especial con el punto 1. Esto puede desencadenar en problemas de cavitación que afecten el casco del barco y a la hélice, además de vibraciones, entre otros.

Número de palas:

Respecto al número de palas según la tabla 4.4 indica que es 5, lo cual es válido ya que según recomendaciones (Baquero, 2011) se encuentra en el rango común.

Relación Área - disco:

Según la tabla 4.4, la hélice cuenta con un DAR de 0.6, lo cual está dentro del rango de la familia de Wageningen serie B (ver tabla 2.2). Esto asegura un buen cumplimiento de los estándares de Wageningen, además de evitar riesgos de cavitación.

Resumen:

TABLA N° 7.2: Resumen de verificación de dimensiones de hélice actual

| Descripción | Valor | Observación |
|-------------|-------------|-------------|
| Diámetro | 60 pulgadas | Incorrecto |
| N° de palas | 5 | Correcto |
| DAR | 0.6 | Correcto |

7.1.2 Re-dimensionamiento de hélice

Diámetro:

Usando como base las dimensiones de espacios para hélice como se ve en la figura

7.2, se selecciona un diámetro adecuado que permita mantener la protección necesaria en la hélice. En esta ocasión, un diámetro de hélice de 48 pulgadas estaría permitido como máximo para cumplir los estándares de protección (ver Figura N° 7.3 y Tabla N° 7.3).

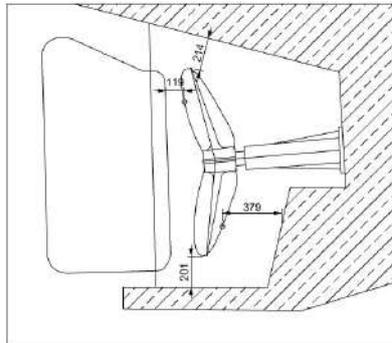


FIGURA N° 7.3: Espacios de hélice modificada - Barco DELIA I. Fuente propia.

TABLA N° 7.3: Distancias de espacios de hélice modificada-DELIA I

| Descripción | Solicitados | Actuales | Revisión |
|--|-------------|----------|----------|
| 1) Distancia mínima entre puntas de palas y casco. | 207.264 mm | 214 mm | O.K. |
| 2) Distancia mínima entre puntas de palas y quilla. | 48.768 mm | 201 mm | O.K. |
| 3) Distancia mínima entre dominio de popa y hélice a 35%D. | 329.184 mm | 379 mm | O.K. |
| 4) Distancia máxima entre hélice y timón a 35%D. | 121.92 mm | 119 mm | O.K. |
| 5) Distancia máxima al extremo del eje libre. | 355.6 mm | 60 mm | O.K. |

Número de palas:

Según recomendaciones propuestas por (Baquero, 2011), se escogerá un número de palas de 5, el cual además es común en el sector pesquero.

Relación Área - disco:

Se escoge un DAR para la hélice de 0.6 ya que se encuentra en el rango de áreas usadas por la serie B de Wageningen (ver 2.2).

Resumen:

TABLA N° 7.4: Resumen de verificación de dimensiones de hélice modificada

| Descripción | Valor | Observación |
|-------------|-------------|-------------|
| Diámetro | 48 pulgadas | Correcto |
| N° de palas | 5 | Correcto |
| DAR | 0.6 | Correcto |

7.2 Cálculo de curvas del propulsor

Como dato inicial se brinda un paso de 52 pulgadas, ya que el proceso iterativo (ver Figura N° 7.1) nos indica que es un paso adecuado. A partir de ahora se corroborarán los cálculos para confirmar la afirmación.

7.2.1 Cálculo de potencia efectiva EHP

El cálculo de EHP se realiza del mismo modo que en la sección 6.5.1. Se utilizará el método de Hughes por demostrar una mejor precisión. Se utiliza la resistencia al avance resultante de la condición de servicio para el proceso.

TABLA N° 7.5: EHP-Condición servicio-DELIA I

| Velocidad (m/s) | Resistencia Total (N) | EHP (hp) |
|-----------------|-----------------------|----------|
| 2.57 (5kn) | 1815.425 | 6.262 |
| 3.09 (6kn) | 3189.137 | 13.201 |
| 3.60 (7kn) | 6179.624 | 29.842 |
| 4.12 (8kn) | 10804.195 | 59.629 |
| 4.63 (9kn) | 19372.51 | 120.282 |
| 5.14 (10kn) | 34495.046 | 237.975 |

7.2.2 Cálculo eficiencia Cuasi-propulsiva

Utilizando el mismo proceso que en la sección 6.5.2, se utilizan los siguientes controles de variables para los cálculos de eficiencias.

TABLA N° 7.6: Control de variables-Eficiencia del casco

| Variables independientes | Condición: Servicio |
|--|---------------------|
| L_{PP} | 13.347 m |
| L_{WL} | 13.084 m |
| L_D | 13.216 m |
| B_{WL} | 6.365 m |
| $C_{P(L_D)} = f(L_{WL}, L_D, A_M)$ | 0.642 m |
| $LCB\%$ | 1.535 m |
| $Fn_{(L_D)}$ | $f(V_B, L_D)$ |
| Diámetro de hélice (ϕ_{helice}) | 48 pulg |

TABLA N° 7.7: Control de variables-Eficiencia del propulsor

| Variables independientes | Valor | Unidad |
|-----------------------------------|---------------|----------|
| Diámetro hélice (D) | 48 | Pulgadas |
| Paso hélice (P) | 52 | Pulgadas |
| Relación área disco (A_E/A_0) | 0.6 | - |
| Número de palas (Z) | 5 | - |
| Velocidad de avance (V_a) | $f(V_b, W_T)$ | Nudos |

A continuación se muestra los resultados de cada eficiencia:

Resultado de eficiencia del casco:

TABLA N° 7.8: Eficiencia del casco - Condición:servicio

| Velocidad (Nudos) | $F n_{(L_D)}$ | W_t | t | n_h |
|-------------------|---------------|-------|-------|-------|
| 5 | 0.226 | 0.224 | 0.253 | 0.964 |
| 6 | 0.271 | 0.229 | 0.239 | 0.986 |
| 7 | 0.316 | 0.233 | 0.229 | 1.005 |
| 8 | 0.361 | 0.236 | 0.221 | 1.020 |
| 9 | 0.407 | 0.239 | 0.216 | 1.030 |
| 10 | 0.452 | 0.241 | 0.214 | 1.036 |

Resultado eficiencia del propulsor:

TABLA N° 7.9: Eficiencia del propulsor - Condición:servicio

| Velocidad (Nudos) | Velocidad de avance (m/s) | RPM (Hélice) | J | K_T | K_Q | n_0 |
|-------------------|---------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| 5 | 1.995 | 134.124 | 0.732 | 0.215 | 0.039 | 0.646 |
| 6 | 2.380 | 169.103 | 0.693 | 0.233 | 0.041 | 0.623 |
| 7 | 2.763 | 218.969 | 0.621 | 0.266 | 0.046 | 0.575 |
| 8 | 3.144 | 275.141 | 0.562 | 0.291 | 0.049 | 0.532 |
| 9 | 3.525 | 350.632 | 0.495 | 0.319 | 0.053 | 0.477 |
| 10 | 3.905 | 449.037 | 0.428 | 0.346 | 0.056 | 0.420 |

Resultado de eficiencia rotativa relativa:

TABLA N° 7.10: Eficiencia rotativa relativa - Condición:servicio

| Velocidad (Nudos) | $F n_{(L_D)}$ | n_r |
|-------------------|---------------|-------|
| 5 | 0.2259 | 1.111 |
| 6 | 0.2711 | 1.091 |
| 7 | 0.3163 | 1.069 |
| 8 | 0.3615 | 1.045 |
| 9 | 0.4066 | 1.020 |
| 10 | 0.4518 | 0.993 |

Resultado de eficiencia cuasi propulsiva:

TABLA N° 7.11: Eficiencia cuasipropulsiva - Condición: servicio

| Velocidad (Nudos) | RPM (Hélice) | n_0 | n_h | n_r | n_d |
|-------------------|--------------|-------|-------|-------|--------|
| 5 | 134.124 | 0.646 | 0.954 | 1.111 | 0.6917 |
| 6 | 169.103 | 0.623 | 0.976 | 1.091 | 0.6704 |
| 7 | 218.969 | 0.575 | 0.995 | 1.069 | 0.618 |
| 8 | 275.141 | 0.532 | 1.009 | 1.045 | 0.5666 |
| 9 | 350.632 | 0.477 | 1.019 | 1.020 | 0.5013 |
| 10 | 449.037 | 0.420 | 1.025 | 0.993 | 0.4319 |

7.2.3 Cálculo de potencia entregada a la hélice DHP

Utilizando el mismo proceso que la sección 6.5.3, se muestran los resultados a continuación.

TABLA N° 7.12: Potencia entregada a la hélice (DHP) - Condición: servicio

| Velocidad (Nudos) | RPM (Hélice) | DHP (hp) |
|-------------------|--------------|----------|
| 5 | 134.124 | 9.053 |
| 6 | 169.103 | 19.690 |
| 7 | 218.969 | 48.289 |
| 8 | 275.141 | 105.232 |
| 9 | 350.632 | 239.942 |
| 10 | 449.037 | 550.988 |

7.2.4 Eficiencia en el eje n_M y transmisión marina n_G

Las eficiencias para el eje y transmisión marina son tomadas de la tabla 6.28.

7.2.5 Cálculo de potencia en el eje SHP

Utilizando el mismo proceso que la sección 6.5.5, se muestran los resultados a continuación.

TABLA N° 7.13: Potencia en el eje (SHP) - Condición: servicio

| Velocidad (Nudos) | RPM (Hélice) | SHP (hp) |
|-------------------|--------------|----------|
| 5 | 134.124 | 9.3331 |
| 6 | 169.103 | 20.2994 |
| 7 | 218.969 | 49.7829 |
| 8 | 275.141 | 108.4865 |
| 9 | 350.632 | 247.3634 |
| 10 | 449.037 | 568.0284 |

7.2.6 Cálculo de potencia al freno BHP

Utilizando el mismo proceso que la sección 6.5.6, se muestran los resultados a continuación.

TABLA N° 7.14: Potencia al freno del motor (BHP) - Condición: servicio

| Velocidad (Nudos) | RPM (Hélice) | BHP (hp) |
|-------------------|--------------|----------|
| 5 | 134.124 | 9.722 |
| 6 | 169.103 | 21.145 |
| 7 | 218.969 | 51.857 |
| 8 | 275.141 | 113.007 |
| 9 | 350.632 | 257.670 |
| 10 | 449.037 | 591.696 |

7.2.7 Curva del propulsor

De la tabla 7.14, se grafican los resultados de la curva del propulsor.

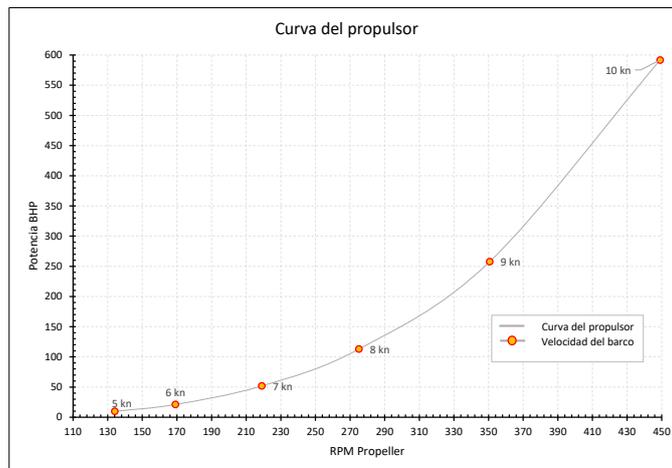


FIGURA N° 7.4: Curva de propulsor - Condición: Servicio. Fuente propia.

7.3 Evaluación de la cavitación

De los datos obtenidos por fotogrametría se tiene que la inmersión de la hélice (h) tiene un valor de 1.114 m. El valor del empuje de la hélice (T) se obtiene de la ecuación 2.34:

$$T = K_T * \rho * n^2 * D^4$$

Donde K_T es el coeficiente de empuje, n representa las revoluciones de la hélice,

ρ es la densidad del agua de mar y D es el diámetro de la hélice. Los datos de K_T y n se muestran en la tabla 7.9. Los resultados del empuje de la hélice (T) se muestran en la tabla 7.15.

Remplazando los datos de empuje calculados a la ecuación 2.39 se obtiene los resultados de cavitación, considerando que el DAR definido es 0.6 (ver tabla 7.16).

De los resultados finales se puede concluir que la cavitación presente en la hélice solo es notoria en a la velocidad de 10 nudos, por lo cual no es un problema para la hélice propuesta ya que esta hélice trabajara a velocidades máximas de 9 nudos.

TABLA N° 7.15: Cálculo de empuje de hélice modificada

| Velocidad (Nudos) | RPM (Hélice) | K_T | T (empuje en kgf) |
|-------------------|--------------|-------|-------------------|
| 5 | 134.124 | 0.215 | 247.716 |
| 6 | 169.103 | 0.233 | 427.538 |
| 7 | 218.969 | 0.266 | 817.083 |
| 8 | 275.141 | 0.291 | 1414.200 |
| 9 | 350.632 | 0.319 | 2519.309 |
| 10 | 449.037 | 0.346 | 4472.625 |

TABLA N° 7.16: Cálculo de cavitación de hélice modificada

| Velocidad (Nudos) | DAR mínimo | ¿Hélice cavita? |
|-------------------|------------|-----------------|
| 5 | 0.191 | No |
| 6 | 0.2207 | No |
| 7 | 0.2851 | No |
| 8 | 0.3838 | No |
| 9 | 0.5665 | No |
| 10 | 0.8895 | Si |

7.4 Selección del motor y transmisión

Elegir el motor y la transmisión marina va de la mano con el número de revoluciones de la hélice para la velocidad requerida. También es importante conocer las propuestas de cada fabricante. Inicialmente se puede escoger la configuración con la que le barco estuvo haciendo sus operaciones, y luego evaluar si cumplen con las condiciones de trabajo que se requerirá. En esta ocasión, por facilidad de datos de motor, se selecciona el motor de la marca Weichai y la transmisión de la marca Advance. Los modelos y potencias suministradas se muestran a continuación.

TABLA N° 7.17: Motor y transmisión óptimos - Condición:servicio

| Equipo | Marca/Modelo | Descripción |
|--------------------|--------------|--|
| Motor marino | Weichai/WD10 | Potencia nominal: 312 hp Revoluciones: 1800 rpm |
| Transmisión marina | Advance/300 | Reduccion: 4.94 Ratio: 0.2 hp/rpm |

7.4.1 Verificación transmisión marina

Utilizando el ratio de la transmisión, se verifica que a las revoluciones máximas del motor la transmisión marina pueda soportar toda la potencia entregada por el motor (312 HP nominales). Para esto se utiliza la siguiente ecuación:

$$Potencia_{admitida} = RPM_{motor} * Ratio = 1800rpm * 0.2 = 360hp \quad (7.1)$$

La potencia admitida por la transmisión es de 360 HP, siendo mayor que la potencia entregada por el motor (312 HP), por lo que se puede decir que puede trabajar de manera óptima con el motor.

7.4.2 Verificación potencia motor

Utilizando las curvas del propulsor de la figura 7.4 y la información de la reducción marina que tiene un factor de reducción de 4.94 (Tabla N° 7.17), se genera una nueva curva del propulsor con las revoluciones del motor. Para esto, se convierten las revoluciones de la hélice a revoluciones del motor (ver tabla 7.18).

TABLA N° 7.18: Conversión de RPM - Condición:servicio

| Velocidad (Nudos) | RPM (Hélice) | RPM (Motor) |
|-------------------|--------------|-------------|
| 5 | 134.124 | 662.571 |
| 6 | 169.103 | 835.368 |
| 7 | 218.969 | 1081.705 |
| 8 | 275.141 | 1359.197 |
| 9 | 350.632 | 1732.122 |
| 10 | 449.037 | 2218.245 |

Con los datos de las revoluciones en el motor, se pueden graficar las curvas del propulsor (ver figura 7.5) y realizar un análisis a sus máximas RPM nominales.

De la figura 7.5 se puede apreciar que a revoluciones máximas se obtiene una potencia de 294.08 HP y utilizando una interpolación cúbica se obtiene una velocidad de 9.1559

nudos, siendo esta una velocidad mayor a la deseada (9 nudos).

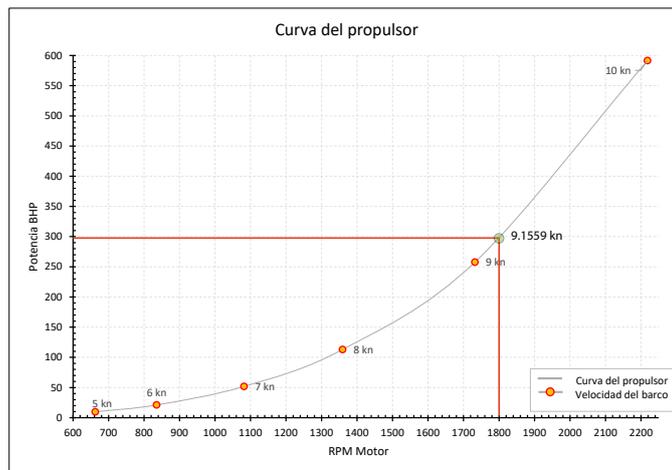


FIGURA N° 7.5: Curva de propulsor - Condición: Servicio. Fuente propia.

7.5 Margen de potencia

Se utiliza un margen de potencia del 6% para futuras complicaciones como la rugosidad, fouling, mayor carga del barco y condiciones adversas del mar (Gotz et al., 2005). Aplicando este margen a la potencia máxima que soporta la hélice a 1800 RPM, se obtiene:

$$Potencia_{motor} \geq (Potencia_{maxima} * 1.06\% = 294.08hp * 1.06\% = 311.73hp) \quad (7.2)$$

Por lo tanto, el motor propuesto (312HP) está capacitado para soportar la potencia máxima incluido un margen por condiciones desfavorables.

7.6 Resumen de optimización

En forma de resumen, se muestran los datos de la hélice, transmisión y motor marino seleccionados de manera óptima, además de la curva del propulsor y la curva del motor (referencial) obtenidas.

TABLA N° 7.19: Conjunto motor, transmisión y hélice optimizado - Condición:Servicio

| Equipo | Marca/Modelo | Descripción |
|--------------------|--------------|--|
| Motor marino | Weichai/WD10 | Potencia nominal: 312 HP Revoluciones: 1800 RPM |
| Transmisión marina | Advance/300 | Reducción: 4.94 Ratio: 0.2 hp/rpm |
| Hélice marina | - | Diámetro: 48 Pulg Paso: 51.5 Pulg |

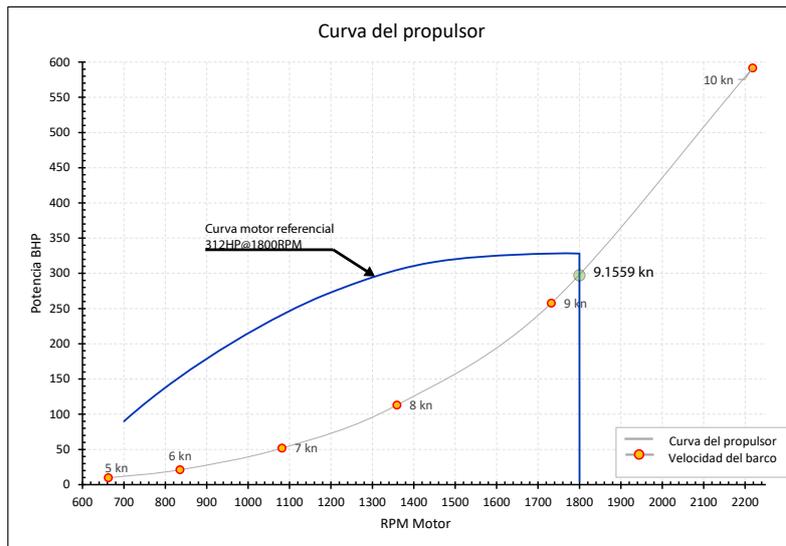


FIGURA N° 7.6: Curva de propulsor vs Curva de motor - Condición: Servicio. Fuente propia.

Conclusiones

1. Se logró la optimización del sistema propulsivo del barco DELIA I. Esto fue posible siguiendo el procedimiento descrito en la Figura N° 7.1. Al completar este análisis de optimización, se garantiza la ausencia de sobrecargas en las operaciones de pesca del barco DELIA I. Además, se asegura trabajar a una velocidad óptima de más de 9 nudos, que es superior a lo recomendado para este tipo de barcos de pesca artesanales. Este logro nos permite tener mayor confianza al analizar otros barcos de pesca artesanales.
2. Se desarrollo un método de simulación de dinámica de fluidos lo suficientemente preciso como para obtener un error promedio en la resistencia al avance del 3.57% (ver Tabla N° 5.6). Estos resultados respaldan la fiabilidad del método CFD y su aplicabilidad a otros barcos con características similares, especialmente aquellos de tipo desplazamiento.
3. Se demostró que el método de extrapolación de resultados y análisis de propulsión empleado es lo suficientemente preciso como para obtener velocidades con márgenes de error mínimos, con un rango promedio de solo 0.472% (ver Tabla N° 6.36). Esto equivale a una diferencia de solo 0.041 nudos en comparación con los resultados reales obtenidos en la prueba de mar del barco DELIA I.
4. Se comprobó que el método de fotogrametría relacionado con la medición y generación de modelos tridimensionales es lo suficientemente preciso como para obtener errores mínimos. Esto se contrasta con el trabajo realizado en el barco DELIA I, donde se obtuvieron los siguientes márgenes de error promedio: 0.45% (± 4.10 mm) en las mediciones realizadas en la carena del casco. 0.782% en relación a las dimensiones principales del barco. 1.08% (± 4.32 mm) en los espacios de la hélice. 0.394% en las dimensiones de la hélice. Todo esto se puede apreciar en la Tabla N° 4.6, Tabla N° 4.7 y Tabla N° 4.8 y Tabla N° 4.9.
5. Utilizando los métodos de fotogrametría, se pudo generar un plano de líneas de forma para el barco DELIA I (Anexo K), además de obtener datos hidrostáticos del mismo. Esto representa un punto de partida fundamental para el proceso de construcción y

para futuras modificaciones o mejoras en dicho barco. Este enfoque puede ser aplicable a muchos de los barcos de pesca artesanales que carecen de esta información, lo que resulta esencial para sus regulaciones y formalización.

6. Se concluye de manera final que la combinación de utilizar herramientas de fotogrametría y dinámica de fluidos computacional (CFD), junto con cálculos de potencia, brinda resultados óptimos para las embarcaciones de pesca artesanales, reduciendo así posibles problemas relacionados con el motor, transmisión y hélice de un barco.

Recomendaciones

1. En el método de fotogrametría, se aconseja emplear una cantidad significativa de fotografías para asegurar una calidad óptima en el proceso. La razón detrás de esta recomendación radica en que, de entre todas las fotografías capturadas, no todas cumplen con la configuración necesaria que requiere el software de fotogrametría para un procedimiento eficiente. Además, se aconseja marcar puntos de referencia en el objeto analizado. Esto tiene el propósito de proporcionar al software de fotogrametría información adicional que facilite la correspondencia y el emparejamiento de puntos en las diferentes imágenes.
2. Si se desea llevar a cabo un estudio similar al que se mostró, se recomienda llevar a cabo pruebas de mar y utilizar un medidor de presión (indicador) en los cilindros del motor para obtener mediciones de potencia a lo largo de las pruebas de mar. Esto se hace con el propósito de obtener una comparación más precisa con los cálculos de potencia, lo cual fortalecerá la validez de los resultados. Se puede utilizar la ecuación 2.33 para realizar estas mediciones y realizar una evaluación más precisa del desempeño de la embarcación en condiciones reales de navegación.
3. Se aconseja a futuros trabajos realizar un procedimiento de medición de combustible durante las pruebas de mar, con este parámetro se puede estudiar la eficiencia de combustible en relación al propulsor y tener un mayor grado de eficacia en la optimización.
4. Para la realización de un estudio de CFD, se recomienda siempre utilizar un modelo de validación lo más similar posible al tipo de barco que estás analizando. En caso de que no tengas acceso a un modelo exacto debido a la falta de información, es posible considerar otro tipo de barco, pero preferiblemente uno que haya sido utilizado en estudios similares al que estás llevando a cabo.

Referencias bibliográficas

- Alfaro, C. (2012). Metodología de la investigación científica aplicado a la ingeniería. *Universidad Nacional del Callao*.
- Bahatmaka, A., y Kim, D. J. (2019). Numerical approach for the traditional fishing vessel analysis of resistance by cfd. *J. Kim Journal of Engineering Science and Technology*, 14, 207-217.
- Baquero, A. (2011). *Introducción a la resistencia y propulsión*. Escuela técnica superior de ingenieros navales.
- Bilec, M., y Obreja, C. D. (2020, 9). Ship resistance and powering prediction of a fishing vessel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 916. doi: 10.1088/1757-899X/916/1/012011
- Bonilla, A. (1979). *Teoría del buque* (Tercera ed.).
- Cabral, E. (2017). *Embarcaciones ilegales: La ruta de los astilleros*. Descargado de <https://ojo-publico.com/488/embarcaciones-ilegales-la-ruta-de-los-astilleros>
- Carrere, M. (2021, 2). *Formalización pesquera esta por vencer y miles de pescadores podrían quedar en la ilegalidad*. Descargado de <https://es.mongabay.com/2021/02/peru-formalizacion-pesquera-esta-por-vencer-y-miles-de-pescadores-podrian-quedar-en-la-ilegalidad/>
- Castillo, G. (2018). Tercera encuesta estructural de la pesquería artesanal en el litoral peruano. *Instituto del mar del Perú*, 333.
- ContextCapture. (2022). *User guide of contextcapture*.
- Céspedes, C. M. S., Soto, W. M., y Vélez, J. A. (2012, 6). Propuesta sobre dimensionamiento y características de las embarcaciones y las artes de pesca que deben actuar en la pesquería artesanal peruana en el contexto de la sostenibilidad de los recursos pesqueros. *Instituto del Mar Peruano*.
- FAO. (2022). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022*. doi: 10.4060/cc0461es
- Fernández, J. M. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos*. Editorial Revelté.

- Ghose, J. P., y Gokarn, R. P. (2004). *Basic ship propulsion*.
- Gotz, G., Panke, C., y Steinbeck, K. (2005). *Guía técnica de proyectos mtu*. Escuela Técnica superior de ingeniería y oceanica.
- Greer, K., Zeller, D., Woroniak, J., Coulter, A., Winchester, M., Palomares, M. L., y Pauly, D. (2019, 9). Global trends in carbon dioxide (co2) emissions from fuel combustion in marine fisheries from 1950 to 2016. *Marine Policy*, 107. doi: 10.1016/j.marpol.2018.12.001
- Herrera, O. (2019). *La herencia de los botes en alto Perú*. Descargado de <https://puntoseguido.upc.edu.pe/la-herencia-de-los-botes-en-alto-peru/>
- HydroComp. (2004). *User's guide navcad*.
- ITTC. (2011). Recommended procedures: Fresh water and seawater properties. *International towing tank conference*.
- ITTC. (2017). Practical guidelines for ship cfd applications. *International towing tank conference*.
- Jouanny, O., Passarella, D. N., Bertolino, G., Cantero, M., Storti, M., y Teruel, F. (2014). Estudio del efecto del mallado en la resolución del flujo alrededor de un obstáculo. caso laminar. *Asociación argentina de mecánica computacional, XXXIII*, 207-219. Descargado de <http://www.unq.edu.ar/http://www.unq.edu.ar/://www.amcaonline.org.ar>
- Kanun, E., y Yakar, M. (2021, 6). Mobile phone - based photogrammetry for 3d modeling of ship hulls. *Mersin University Journal of Maritime Faculty*. doi: 10.47512/meujmaf.926505
- Kim, D. J., y Yeo, D. J. (2019). Estimation of weight parameters for small fishing vessels in accordance with loading conditions. *Port Res*, 43, 50-51. Descargado de <http://dx.doi.org/10.5394/KINPR.2019.43.1.16> doi: 10.5394/KINPR.2019.43.1.16
- Koelman, H. J. (2010, 8). Application of a photogrammetry-based system to measure and re-engineer ship hulls and ship parts: An industrial practices-based report. *CAD Computer Aided Design*, 42, 731-743. doi: 10.1016/j.cad.2010.02.005
- Kraus, K. (2004). *Photogrammetry*.

- la Puente, S. D., López, R., Benavente, S., Sueiro, J. C., y Pauly, D. (2020, 8). Growing into poverty: Reconstructing peruvian small-scale fishing effort between 1950 and 2018. *Frontiers in Marine Science*, 7. doi: 10.3389/fmars.2020.00681
- Lewis, E. (1988). *Principles of naval architecture* (Second ed., Vol. 2). SNAME.
- Martelli, M., Tasseti, A. N., y Buglioni, G. (2015). Reverse engineering techniques for trawler hull 3d modelling and energy efficiency evaluation. *International Conference on Ships and Shipping Research 2015*. Descargado de <https://www.researchgate.net/publication/307639828>
- Moctar, O., Shigunov, V., y Zorn, T. (2012). Duisburg test case: Post-panamax container ship for benchmarking. *Ship Technology Research*, 59, 50-64. doi: 10.1179/str.2012.59.3.004
- Molland, A. F., Turnock, S. R., y Hudson, D. A. (2011). *Ship resistance and propulsion* (First ed.). Cambridge University Press.
- Nguyen, H. P., Hoang, A. T., Nizetic, S., Nguyen, X. P., Le, A. T., Luong, C. N., ... Pham, V. V. (2021, 11). The electric propulsion system as a green solution for management strategy of co2 emission in ocean shipping: A comprehensive review. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31. doi: 10.1002/2050-7038.12580
- Oortmerssen, G. V. (1971). A power prediction method and its application to small ships. *International shipbuilding progress*, 12, 397-415.
- PRODUCE. (2017, 4). Reglamento de ordenamiento pesquero del recurso anchoveta para consumo humano directo.
- Putra, I. N., Susanto, A. D., y Suharyo, O. S. (2017). Comparative analysis results of towing tank and numerical calculations with harvald guldammer method. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12, 10637-10645. Descargado de <http://www.ripublication.com>
- Romero, J. E. G., Capel, S. R., Pérez, J. E., Parra, B. Z., y Abad, J. P. L. (2022, 2). Methodology based on photogrammetry for testing ship-block resistance in traditional towing tanks: Observations and benchmark data. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10. doi: 10.3390/jmse10020246

- Salas, S., Chuenpagdee, R., Seijo, J. C., y Charles, A. (2007, 10). Challenges in the assessment and management of small-scale fisheries in latin america and the caribbean. *Fisheries Research*, 87, 5-16. doi: 10.1016/j.fishres.2007.06.015
- Santosa, A. W. B., Mausulunnaji, M. F., Setiyobudi, N., Chrismianto, D., y Hadi, E. S. (2022). Engine propeller matching analysis on fishing vessel using inboard engine. *Journal of Applied Engineering Science*, 20, 477-484. doi: 10.5937/jaes0-31979
- Tadros, M., Vettor, R., Ventura, M., y Soares, C. G. (2021, 1). Coupled engine-propeller selection procedure to minimize fuel consumption at a specified speed. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9, 1-13. doi: 10.3390/jmse9010059
- Van, T. N., Thanh, T. L., y Natasa, N. (2021). Measuring propeller pitch based on photogrammetry and computer-aided design. *Manufacturing Technology*, 21, 706-713. doi: 10.21062/mft.2021.070
- Wilson, J. (2005). *Medidas de ahorro de combustible y de costos para armadores de pequeñas embarcaciones pesqueras*. Descargado de <https://www.fao.org/3/x0487s/X0487S05.htm>
- Zafra, D. (2020). *Conceptos básicos de la fotografía*. Descargado de <https://capturetheatl.com/es/conceptosbasicos-de-la-fotografia/>

Anexos

| | |
|--|----|
| Anexo A: Coeficientes polinomicos de la serie Wageningen | 1 |
| Anexo B: Información de la prueba de mar | 3 |
| Anexo C: prueba de mar | 4 |
| Anexo D: Cálculo de paso de hélice actual | 6 |
| Anexo E: Certificado de matricula del barco | 7 |
| Anexo F: Extrapolación por método ITTC | 8 |
| Anexo G: Extrapolación por método Hughes | 16 |
| Anexo H: Calculo de factor de forma (1+K) | 22 |
| Anexo I: Cálculo de resistencia por apéndices | 23 |
| Anexo J: Plano de lineas de forma | 27 |
| Anexo K: Plano de hélice | 28 |

Anexo A: Coeficientes polinomicos de la serie Wageningen

| n | K_T | | | | | K_Q | | | | |
|----|---------------|---|---|---|---|-------------|---|---|---|---|
| | C_n | s | t | u | v | C_n | s | t | u | v |
| 1 | 0.0088049600 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.00379368 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | -0.2045540000 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0.00886523 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0.1663510000 | 0 | 1 | 0 | 0 | -0.032241 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 4 | 0.1581140000 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0.00344778 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| 5 | -0.1475810000 | 2 | 0 | 1 | 0 | -0.0408811 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 6 | -0.4814970000 | 1 | 1 | 1 | 0 | -0.108009 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 7 | 0.4154370000 | 0 | 2 | 1 | 0 | -0.0885381 | 2 | 1 | 1 | 0 |
| 8 | 0.0144043000 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0.188561 | 0 | 2 | 1 | 0 |
| 9 | -0.0530054000 | 2 | 0 | 0 | 1 | -0.00370871 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 10 | 0.0143481000 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0.00513696 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 11 | 0.0606826000 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0.0209449 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 12 | -0.0125894000 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0.00474319 | 2 | 1 | 0 | 1 |
| 13 | 0.0109689000 | 1 | 0 | 1 | 1 | -0.00723408 | 2 | 0 | 1 | 1 |
| 14 | -0.1336980000 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0.00438388 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 15 | 0.0063840700 | 0 | 6 | 0 | 0 | -0.0269403 | 0 | 2 | 1 | 1 |
| 16 | -0.0013271800 | 2 | 6 | 0 | 0 | 0.0558082 | 3 | 0 | 1 | 0 |
| 17 | 0.1684960000 | 3 | 0 | 1 | 0 | 0.0161886 | 0 | 3 | 1 | 0 |
| 18 | -0.0507214000 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0.00318086 | 1 | 3 | 1 | 0 |
| 19 | 0.0854559000 | 2 | 0 | 2 | 0 | 0.015896 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| 20 | -0.0504475000 | 3 | 0 | 2 | 0 | 0.0471729 | 1 | 0 | 2 | 0 |
| 21 | 0.0104650000 | 1 | 6 | 2 | 0 | 0.0196283 | 3 | 0 | 2 | 0 |
| 22 | -0.0064827200 | 2 | 6 | 2 | 0 | -0.0502782 | 0 | 1 | 2 | 0 |

| n | C_n | s | t | u | v | C_n | s | t | u | v |
|----|---------------|---|---|---|---|-------------|---|---|---|---|
| 23 | -0.0084172800 | 0 | 3 | 0 | 1 | -0.030055 | 3 | 1 | 2 | 0 |
| 24 | 0.0168424000 | 1 | 3 | 0 | 1 | 0.0417122 | 2 | 2 | 2 | 0 |
| 25 | -0.0010229600 | 3 | 3 | 0 | 1 | -0.0397722 | 0 | 3 | 2 | 0 |
| 26 | -0.0317791000 | 0 | 3 | 1 | 1 | -0.00350024 | 0 | 6 | 2 | 0 |
| 27 | 0.0186040000 | 1 | 0 | 2 | 1 | -0.0106854 | 3 | 0 | 0 | 1 |
| 28 | -0.0041079800 | 0 | 2 | 2 | 1 | 0.00110903 | 3 | 3 | 0 | 1 |
| 29 | -0.0006068480 | 0 | 0 | 0 | 2 | -0.00031391 | 0 | 6 | 0 | 1 |
| 30 | -0.0049819000 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0.0035985 | 3 | 0 | 1 | 1 |
| 31 | 0.0025983000 | 2 | 0 | 0 | 2 | -0.00142121 | 0 | 6 | 1 | 1 |
| 32 | -0.0005605280 | 3 | 0 | 0 | 2 | -0.00383637 | 1 | 0 | 2 | 1 |
| 33 | -0.0016365200 | 1 | 2 | 0 | 2 | 0.0126803 | 0 | 2 | 2 | 1 |
| 34 | -0.0003287870 | 1 | 6 | 0 | 2 | -0.00318278 | 2 | 3 | 2 | 1 |
| 35 | 0.0001165020 | 2 | 6 | 0 | 2 | 0.00334268 | 0 | 6 | 2 | 1 |
| 36 | 0.0006909040 | 0 | 0 | 1 | 2 | -0.00183491 | 1 | 1 | 0 | 2 |
| 37 | 0.0042174900 | 0 | 3 | 1 | 2 | 0.00011245 | 3 | 2 | 0 | 2 |
| 38 | 0.0000565229 | 3 | 6 | 1 | 2 | -2.9723E-05 | 3 | 6 | 0 | 2 |
| 39 | -0.0014656400 | 0 | 3 | 2 | 2 | 0.00026955 | 1 | 0 | 1 | 2 |
| 40 | - | - | - | - | - | 0.00083265 | 2 | 0 | 1 | 2 |
| 41 | - | - | - | - | - | 0.00155334 | 0 | 2 | 1 | 2 |
| 42 | - | - | - | - | - | 0.00030268 | 0 | 6 | 1 | 2 |
| 43 | - | - | - | - | - | -0.0001843 | 0 | 0 | 2 | 2 |
| 44 | - | - | - | - | - | -0.0004254 | 0 | 3 | 2 | 2 |
| 45 | - | - | - | - | - | 8.6924E-05 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| 46 | - | - | - | - | - | -0.0004659 | 0 | 6 | 2 | 2 |
| 47 | - | - | - | - | - | 5.5419E-05 | 1 | 6 | 2 | 2 |

Anexo B: Información de la prueba de mar

| Datos de barco: | |
|--------------------------|----------------------------|
| Eslora total | 14.8 m |
| Manga total | 6.3 m |
| Puntal | 2.5 m |
| Capacidad de bodega | 30 ton |
| Nombre del barco | DELIA I |
| Matricula del barco | CE-22114-CM |
| Material de construcción | Madera |
| Tipo de pesca | De cerco / Consumo directo |

| Datos propulsión: | |
|---------------------------------|----------------|
| Modelo motor | Weichai – WD10 |
| Potencia motora | 278 HP |
| Revoluciones de motor | 1500 RPM |
| Modelo transmisión marina | Advance 300 |
| Reducción transmisión marina | 4.61 |
| Diámetro eje colero | 3.5 Pulgadas |
| Diámetro hélice marina | 60 pulgadas |
| Paso hélice marina | 44 pulgadas |
| Numero de palas hélice | 5 |
| Material hélice | Ni-Br-Al |
| Inclinación línea de propulsión | 5 grados |

| Distribución de pesos: | |
|-------------------------|-------------|
| Cantidad de combustible | 250 galones |
| Cantidad agua dulce | 750 galones |
| Panga | No |
| Red de pesca | No |
| Equipos de pesca | Si |
| Winche | Si |
| Tripulación a bordo | 6 personas |
| Víveres y provisiones | No |
| Hielo | No |
| Pesca | No |
| Lastre | No |
| Tanque hidrocarburos | 120 galones |



Firma

Patrón del barco: Fernando Temoche Ruiz Fecha: 02/03/23

FIGURA B.1: Hoja de datos del barco DELIA I al momento de la prueba.

Anexo C: prueba de mar

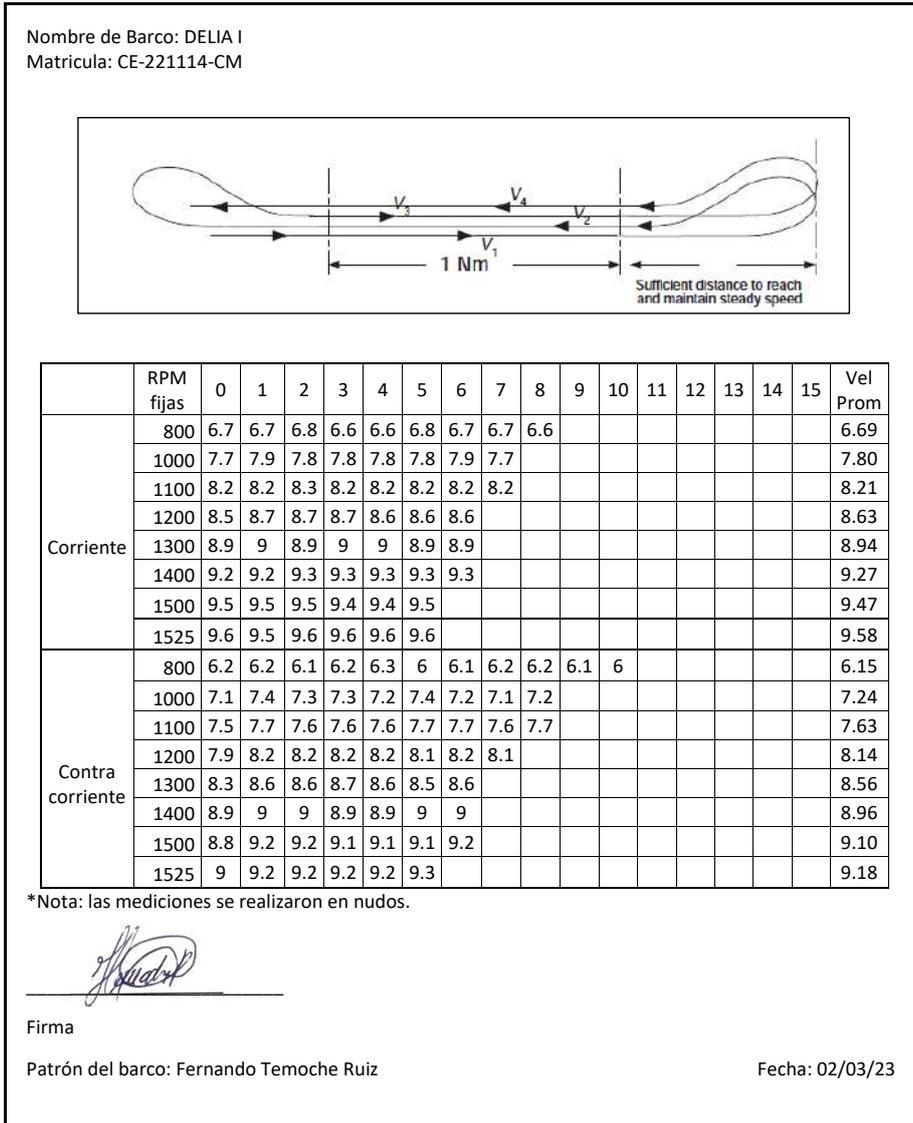


FIGURA C.1: Datos obtenidos en la prueba de mar.

Los números indicados en la cabecera de la tabla, que van de 0 a 15, indican los minutos en los que se tomó la medición. El recorrido, tanto de ida (a favor de la corriente) como de vuelta (en contra de la corriente), es de 1 milla náutica (Nm). Las mediciones de velocidad se realizaron utilizando el navegador del barco, la medición de RPM se hizo con el tablero de control del motor y la medición de la distancia se efectuó con la aplicación de celular Navionics Boating.

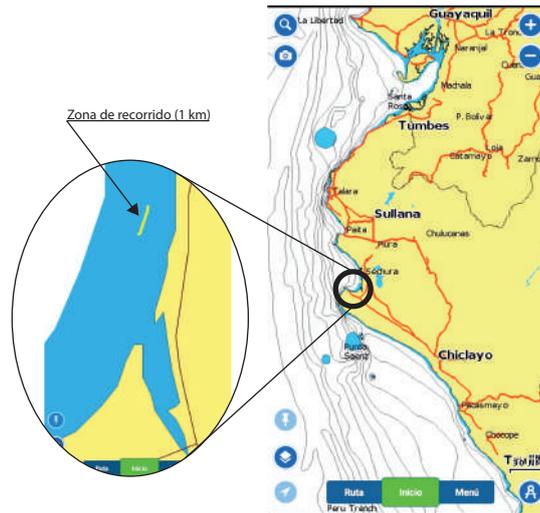


FIGURA C.2: Aplicación Navionics Boating.



FIGURA C.3: Navegador del barco DELIA I.



FIGURA C.4: Tablero de motor indicando 1502 RPM.

Anexo D: Cálculo de paso de hélice actual

Para el cálculo del paso aproximado de la hélice se usa la siguiente ecuación de la norma ISO 484-2 (?):

$$Paso = \frac{\Delta h * 360^\circ}{\Theta^\circ}$$

Donde Δh es la diferencia de alturas entre los puntos P y Q de la hélice al 70% del radio de la hélice, y Θ es el ángulo entre los puntos proyectados P y Q .

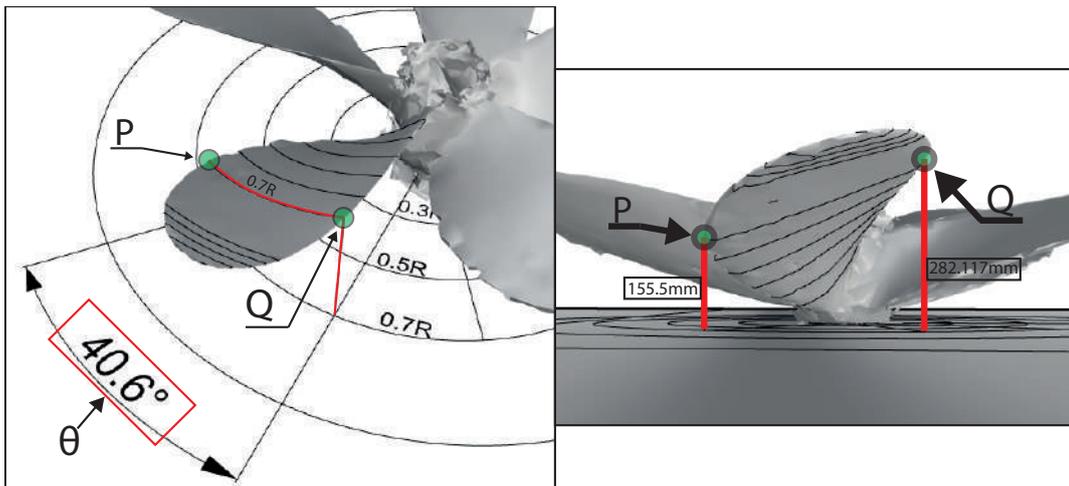


FIGURA D.1: Diferencia de alturas y ángulo en Rhinoceros.

Resolviendo:

$$\Delta h = 126.617mm; \Theta = 40.6^\circ$$

$$Paso = \frac{126.617 * 360^\circ}{40.6} = 1122.712mm$$

Anexo E: Certificado de matricula del barco

*Nota: El certificado de matrícula de naves y artefactos navales indica como nombre de barco: JUAN ENRIQUE I. La presente tesis indica como nombre de barco DELIA I, esto se debe a que el cambio de nombre se realizó posteriormente al trabajo de recolección de datos en campo. El historial de nombres se puede ver en la página web de consulta de naves y artefactos navales de DICAPI.



REPÚBLICA DEL PERÚ

 DIRECCION GENERAL DE CAPITANIAS Y GUARDACOSTAS

Nº DI-00160256-008-001
 Matricula : CE-22114-CM



CERTIFICADO DE MATRÍCULA DE NAVES Y ARTEFACTOS NAVALES

EXPEDIDO EN VIRTUD DE LAS DISPOSICIONES EMITIDAS POR LA AUTORIDAD MARÍTIMA DEL PERÚ

CAPTANÍA: CHIMBOTE Nº LIBRO: 1008 Nº FOLIO: 0193 REGISTRO INICIAL: 20/01/2005

DATOS DEL PROPIETARIO :

Nombre o Razón Social: D. N.G. SAC.
 DNI / RUC: RUC - 20525987966
 Domicilio: CALLE SAN FRANCISCO NRO. 400
 Distrito: SECHURA Provincia: SECHURA Departamento: PIURA

DATOS GENERALES :

Nombre de la Nave: JUAN ENRIQUE I Id.Nave: 16988
 Cod. Inter. de Llam: - Nº OMI: - Ambito: MARITIMO
 Tipo de Navegación: CABOTAJE Tipo Servicio: CM - De cerco de 13.30 a 70.48 AB

Construido por: CORPORACION SERVIMAR S.A.C.
 Inicio: 01/01/2004 Termino: 01/07/2004

CARACTERISTICAS PRINCIPALES

Esloro: 13.48 Manga: 5.25 Puntal: 2.22
 Arqueo Bruto: 21.91 Arqueo Neto: 6.71 Capacidad de Bodega: 29.25 m³
 Forma de Popa: Espejo Tipo de Propulsion: MOTOR DIESEL Forma de Proa: PESQUERO
 Material Superestructura: MADERA Color Superestructura: BLANCO
 Material Casco: MADERA Color Casco: ROJO
 VERDE

PLANTA DE INGENIERIA

a) Motores principales :

| Marca | Modelo | Nro Serie | Potencia |
|---------|----------|-------------|-----------|
| WEICHAI | WD10C27B | 1222G008575 | 278.00 HP |

b) Combustible : TIPO: Diesel Nº DE TANQUES: 4 CAPACIDAD TOTAL: 1000 gal

c) Agua : Nº TANQUES: 2 CAPACIDAD TOTAL: 1000 gal

MOTIVO DE EMISIÓN : Cambio de Dominio
 Se expide el presente Certificado en CHIMBOTE a los 09 días del mes de mayo del 2023



CAPTÁN DE PUERTO
 Capitán de Fragata
Samuel NAMIHAS Castro
 00904661



FIGURA E.1: Certificado de matricula y artefactos navales.

ANEXO F: EXTRAPOLACIÓN POR MÉTODO ITTC

ANEXO F.1

CONDICIÓN: PRUEBA DE MAR (MÉTODO ITTC)

CÁLCULO DE COEFICIENTE TOTAL DEL MODELO

COEFICIENTE TOTAL DEL MODELO

$$\text{for } a \in [1..\text{length}(V_{\text{barco}})]$$

$$CT_{\text{prueba_mar_modelo}} := \frac{|\text{row}(RT_{\text{prueba_mar_modelo}}; a)|}{\frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{fresh_water}} \cdot Smojada_Modelo_{\text{prueba_mar}} \cdot |\text{row}(V_{\text{modelo}}; a)|^2}$$

RESISTENCIA TOTAL DEL MODELO

$$RT_{\text{prueba_mar_modelo}} = \begin{bmatrix} 16.6936 \\ 27.6315 \\ 48.5442 \\ 82.0877 \\ 146.6559 \\ 254.8633 \end{bmatrix} \text{ N}$$

DENSIDAD AGUA DULCE

$$\rho_{\text{fresh_water}} = 998.8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

SUPERFICIE MOJADA MODELO

$$Smojada_Modelo_{\text{prueba_mar}} = 3.503 \text{ m}^2$$

VELOCIDAD DEL MODELO

$$V_{\text{modelo}} = \begin{bmatrix} 1.1503 \\ 1.3804 \\ 1.6105 \\ 1.8405 \\ 2.0706 \\ 2.3007 \end{bmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$CT_{\text{prueba_mar_modelo}} = \begin{bmatrix} 0.0072 \\ 0.0083 \\ 0.0107 \\ 0.0139 \\ 0.0196 \\ 0.0275 \end{bmatrix}$$

CÁLCULO DE COEFICIENTE FRICCIONAL DEL MODELO

COEFICIENTE FRICCIONAL DEL MODELO

$$\text{for } i \in [1..\text{length}(V_{\text{barco}})]$$

$$CF_{\text{prueba_mar_modelo}} := \frac{0.075}{\left(\log_{10} \left(|\text{row}(Rn_{\text{prueba_mar_modelo}}; i)| \right) - 2 \right)^2}$$

NÚMERO DE REYNOSL DEL MODELO

$$Rn_{\text{prueba_mar_modelo}} = \begin{bmatrix} 2.5687 \cdot 10^6 \\ 3.0824 \cdot 10^6 \\ 3.5962 \cdot 10^6 \\ 4.1099 \cdot 10^6 \\ 4.6237 \cdot 10^6 \\ 5.1374 \cdot 10^6 \end{bmatrix}$$

$$CF_{\text{prueba_mar_modelo}} = \begin{bmatrix} 0.0039 \\ 0.0037 \\ 0.0036 \\ 0.0035 \\ 0.0034 \\ 0.0034 \end{bmatrix}$$

CÁLCULO DE COEFICIENTE FRICCIONAL DEL BARCO

COEFICIENTE FRICCIONAL DEL BARCO

$$\text{for } b \in [1..\text{length}(V_{\text{barco}})]$$

$$CF_{\text{prueba_mar_barco}} := \frac{0.075}{b \left(\log_{10} \left(\left| \text{row} \left(Rn_{\text{prueba_mar_barco}}; b \right) \right| \right) - 2 \right)^2}$$

NÚMERO DE REYNOLDS DEL BARCO

$$Rn_{\text{prueba_mar_barco}} = \begin{bmatrix} 2.979 \cdot 10^7 \\ 3.5748 \cdot 10^7 \\ 4.1706 \cdot 10^7 \\ 4.7664 \cdot 10^7 \\ 5.3623 \cdot 10^7 \\ 5.9581 \cdot 10^7 \end{bmatrix}$$

$$CF_{\text{prueba_mar_barco}} = \begin{bmatrix} 0.0025 \\ 0.0024 \\ 0.0024 \\ 0.0023 \\ 0.0023 \\ 0.0022 \end{bmatrix}$$

FACTOR DE FORMA (MÉTODO PROHASKA)

FACTOR DE FORMA (1+K)

$$Factorforma_{\text{prohaska_prueba_mar}} = 1.4415 \quad // \text{Calculado en Anexo H}$$

CÁLCULO DE COEFICIENTE RESIDUAL

COEFICIENTE RESIDUAL

$$CR_{\text{prueba_mar}} := CT_{\text{prueba_mar_modelo}} - Factorforma_{\text{prohaska_prueba_mar}} \cdot CF_{\text{prueba_mar_modelo}}$$

$$CR_{\text{prueba_mar}} = \begin{bmatrix} 0.0017 \\ 0.0029 \\ 0.0055 \\ 0.0088 \\ 0.0146 \\ 0.0227 \end{bmatrix}$$

CÁLCULO DE MARGEN DE RUGOSIDAD

ALTURA DE GRANO (RECOMENDADO POR MOLLAND)

$$ks := 150 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

ESLORA DE FLOTACIÓN

$$Lwl_{\text{prueba_mar}} = 12.1699 \text{ m}$$

MARGEN DE RUGOSIDAD

$$DR_{\text{prueba_mar}} := \left(105 \cdot \left(\frac{ks}{Lwl_{\text{prueba_mar}}} \right)^{\frac{1}{3}} - 0.64 \right) \cdot 10^{-3}$$

$$DR_{\text{prueba_mar}} = 0.0018$$

CÁLCULO DE COEFICIENTE POR ADICION DE AIRE

COEFICIENTE POR ADICION DE AIRE

$$CAA_{prueba_mar_barco} := \frac{0.001 \cdot A_{Trans_prueba_mar_barco}}{Smojada_{prueba_mar}}$$

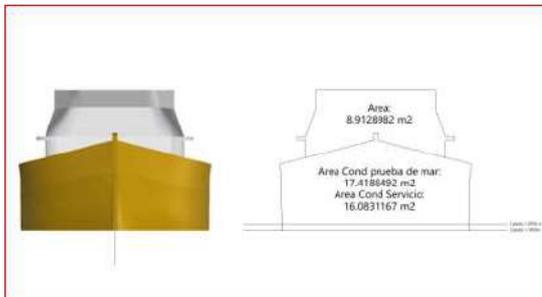
$$CAA_{prueba_mar_barco} = 0.0003$$

AREA TRANSVERSAL DEL BARCO

$$A_{Trans_prueba_mar_barco} = 26.3317 \text{ m}^2$$

SUPERFICIE MOJADA DEL BARCO

$$Smojada_{prueba_mar} = 87.5753 \text{ m}^2$$



CÁLCULO DE COEFICIENTES DE RESISTENCIA TOTAL (ITTC)

COEFICIENTE DE RESISTENCIA TOTAL (ITTC)

$$CT_{prueba_mar_ITTC_barco} := Factorforma_prohaska_{prueba_mar} \cdot CF_{prueba_mar_barco} + CR_{prueba_mar} + DR_{prueba_mar} + CAA_{prueba_mar_barco}$$

$$CT_{prueba_mar_ITTC_barco} = \begin{bmatrix} 0.0073 \\ 0.0085 \\ 0.011 \\ 0.0142 \\ 0.02 \\ 0.028 \end{bmatrix}$$

RESISTENCIA DEL BARCO (ITTC)

RESISTENCIA DEL BARCO (ITTC)

$$\text{for } i \in [1..length(V_{barco})]$$

$$RT_{prueba_mar_ITTC_barco}_i := \frac{1}{2} \cdot \rho_{agua_mar} \cdot Smojada_{prueba_mar} \cdot |row(CT_{prueba_mar_ITTC_barco}; i)| \cdot (|row(V_{barco}; i)|)^2$$

DENSIDAD AGUA DE MAR

$$\rho_{agua_mar} = 1024.81 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

SUPERFICIE MOJADA DEL BARCO

$$Smojada_{prueba_mar} = 87.5753 \text{ m}^2$$

VELOCIDAD DEL BARCO

$$V_{barco} = \begin{bmatrix} 2.5722 \\ 3.0867 \\ 3.6011 \\ 4.1156 \\ 4.63 \\ 5.1444 \end{bmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$RT_{prueba_mar_ITTC_barco} = \begin{bmatrix} 2180.9094 \\ 3640.7344 \\ 6400.6532 \\ 10802.2611 \\ 19205.4866 \\ 33228.8797 \end{bmatrix} \text{ N}$$

RESISTENCIA POR APENDICES

RESISTENCIA POR APENDICES

| | | | |
|--------------------------|----------|---|----------------------------------|
| $R_{app_prueba_mar} =$ | 108.7341 | N | //Calculos realizados en anexo I |
| | 152.1439 | | |
| | 202.1806 | | |
| | 258.7062 | | |
| | 321.6045 | | |
| | 390.7758 | | |

RESISTENCIA TOTAL DEL BARCO

RESISTENCIA TOTAL DEL BARCO

$$RT_{prueba_mar_TOTAL}_{barco} := RT_{prueba_mar_ITTC}_{barco} + R_{app_prueba_mar}$$

| | | |
|-------------------------------------|------------|---|
| $RT_{prueba_mar_TOTAL}_{barco} =$ | 2289.6436 | N |
| | 3792.8782 | |
| | 6602.8338 | |
| | 11060.9672 | |
| | 19527.0911 | |
| | 33619.6555 | |

ANEXO F.2

CONDICIÓN: SERVICIO (MÉTODO ITTC)

CÁLCULO DE COEFICIENTE TOTAL DEL MODELO

COEFICIENTE TOTAL DEL MODELO

$$\text{for } a \in [1..\text{length}(V_{\text{barco}})]$$

$$CT_{\text{servicio_modelo}} := \frac{|\text{row}(RT_{\text{servicio_modelo}}; a)|}{\frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{fresh_water}} \cdot Smojada_Modelo_{\text{servicio}} \cdot |\text{row}(V_{\text{modelo}}; a)|^2}$$

RESISTENCIA TOTAL DEL MODELO

$$RT_{\text{servicio_modelo}} = \begin{bmatrix} 17.4625 \\ 29.3375 \\ 53.954 \\ 91.44 \\ 159.7979 \\ 279.3768 \end{bmatrix} \text{ N}$$

DENSIDAD AGUA DULCE

$$\rho_{\text{fresh_water}} = 998.8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

SUPERFICIE MOJADA MODELO

$$Smojada_Modelo_{\text{prueba_mar}} = 3.503 \text{ m}^2$$

VELOCIDAD DEL MODELO

$$V_{\text{modelo}} = \begin{bmatrix} 1.1503 \\ 1.3804 \\ 1.6105 \\ 1.8405 \\ 2.0706 \\ 2.3007 \end{bmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$CT_{\text{servicio_modelo}} = \begin{bmatrix} 0.0067 \\ 0.0078 \\ 0.0106 \\ 0.0137 \\ 0.019 \\ 0.0269 \end{bmatrix}$$

CÁLCULO DE COEFICIENTE FRICCIONAL DEL MODELO

COEFICIENTE FRICCIONAL DEL MODELO

$$\text{for } i \in [1..\text{length}(V_{\text{barco}})]$$

$$CF_{\text{servicio_modelo}} := \frac{0.075}{\left(\log_{10}\left(|\text{row}(Rn_{\text{servicio_modelo}}; i)|\right)\right) - 2}^2$$

NÚMERO DE REYNOSL DEL MODELO

$$Rn_{\text{servicio_modelo}} = \begin{bmatrix} 2.7616 \cdot 10^6 \\ 3.314 \cdot 10^6 \\ 3.8663 \cdot 10^6 \\ 4.4186 \cdot 10^6 \\ 4.971 \cdot 10^6 \\ 5.5233 \cdot 10^6 \end{bmatrix}$$

$$CF_{\text{servicio_modelo}} = \begin{bmatrix} 0.0038 \\ 0.0037 \\ 0.0036 \\ 0.0035 \\ 0.0034 \\ 0.0033 \end{bmatrix}$$

CÁLCULO DE COEFICIENTE FRICCIONAL DEL BARCO

COEFICIENTE FRICCIONAL DEL BARCO

$$\text{for } b \in [1..\text{length}(V_{\text{barco}})]$$

$$CF_{\text{servicio_barco}} := \frac{0.075}{\left(\log_{10}\left(|\text{row}(Rn_{\text{servicio_barco}}; b)|\right)\right) - 2}^2$$

NÚMERO DE REYNOLDS DEL BARCO

$$Rn_{servicio_{barco}} = \begin{matrix} 3.2028 \cdot 10^7 \\ 3.8433 \cdot 10^7 \\ 4.4839 \cdot 10^7 \\ 5.1245 \cdot 10^7 \\ 5.765 \cdot 10^7 \\ 6.4056 \cdot 10^7 \end{matrix}$$

$$CF_{servicio_{barco}} = \begin{matrix} 0.0025 \\ 0.0024 \\ 0.0023 \\ 0.0023 \\ 0.0023 \\ 0.0022 \end{matrix}$$

FACTOR DE FORMA (MÉTODO PROHASKA)

FACTOR DE FORMA (1+K)

$$Factorforma_{prohaska_{servicio}} = 1.3915 \quad // \text{Calculado en la Anexo H}$$

CÁLCULO DE COEFICIENTE RESIDUAL

COEFICIENTE RESIDUAL

$$CR_{servicio} := CT_{servicio_{modelo}} - Factorforma_{prohaska_{servicio}} \cdot CF_{servicio_{modelo}}$$

$$CR_{servicio} = \begin{matrix} 0.0014 \\ 0.0027 \\ 0.0056 \\ 0.0089 \\ 0.0142 \\ 0.0222 \end{matrix}$$

CÁLCULO DE MARGEN DE RUGOSIDAD

ALTURA DE GRANO (RECOMENDADO POR MOLLAND)

$$ks := 150 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

ESLORA DE FLOTACIÓN

$$Lwl_{servicio} = 13.084 \text{ m}$$

MARGEN DE RUGOSIDAD

$$DR_{servicio} := \left(105 \cdot \left(\frac{ks}{Lwl_{servicio}} \right)^{\frac{1}{3}} - 0.64 \right) \cdot 10^{-3}$$

$$DR_{servicio} = 0.0017$$

CÁLCULO DE COEFICIENTE POR ADICION DE AIRE

COEFICIENTE POR ADICION DE AIRE

$$CAA_{servicio_{barco}} := \left(\frac{0.001 \cdot ATrans_{servicio_{barco}}}{Smojada_{servicio}} \right)$$

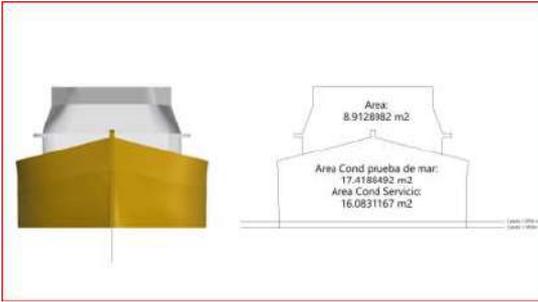
$$CAA_{servicio_{barco}} = 0.0003$$

AREA TRANSVERSAL DEL BARCO

$$A_{Trans_servicio_barco} = 24.996 \text{ m}^2$$

SUPERFICIE MOJADA DEL BARCO

$$S_{mojada_servicio} = 98.39 \text{ m}^2$$



CÁLCULO DE COEFICIENTES DE RESISTENCIA TOTAL (ITTC)

COEFICIENTE DE RESISTENCIA TOTAL (ITTC)

$$CT_servicio_ITTC_barco := Factorforma_prohaska_servicio \cdot CF_servicio_barco + CR_servicio + DR_servicio + CAA_servicio_barco$$

| | |
|-------------------------------|--------|
| $CT_servicio_ITTC_barco =$ | 0.0068 |
| | 0.0081 |
| | 0.0109 |
| | 0.0141 |
| | 0.0194 |
| | 0.0273 |

RESISTENCIA DEL BARCO (ITTC)

RESISTENCIA DEL BARCO (ITTC)

$$for \ i \in [1..length(V_barco)]$$

$$RT_servicio_ITTC_barco_i := \frac{1}{2} \cdot \rho_{agua_mar} \cdot S_{mojada_servicio} \cdot |row(CT_servicio_ITTC_barco; i)| \cdot (|row(V_barco; i)|)^2$$

DENSIDAD AGUA DE MAR

$$\rho_{agua_mar} = 1024.81 \frac{kg}{m^3}$$

SUPERFICIE MOJADA DEL BARCO

$$S_{mojada_servicio} = 98.39 \text{ m}^2$$

VELOCIDAD DEL BARCO

| | | |
|--------------|--------|---------------|
| $V_barco =$ | 2.5722 | $\frac{m}{s}$ |
| | 3.0867 | |
| | 3.6011 | |
| | 4.1156 | |
| | 4.63 | |
| | 5.1444 | |

| | | |
|-------------------------------|------------|-----|
| $RT_servicio_ITTC_barco =$ | 2284.193 | N |
| | 3868.5214 | |
| | 7109.1629 | |
| | 12023.5649 | |
| | 20921.5004 | |
| | 36413.5449 | |

RESISTENCIA POR APENDICES

RESISTENCIA POR APENDICES

$$R_{app_servicio} = \begin{bmatrix} 107.4953 \\ 150.4349 \\ 199.9364 \\ 255.8637 \\ 318.1022 \\ 386.5537 \end{bmatrix} \quad // \text{Calculos realizados en Anexo I}$$

RESISTENCIA TOTAL DEL BARCO

RESISTENCIA TOTAL DEL BARCO

$$RT_servicio_TOTAL_{barco} := RT_servicio_ITTC_{barco} + R_{app_servicio}$$

$$RT_servicio_TOTAL_{barco} = \begin{bmatrix} 2391.6883 \\ 4018.9564 \\ 7309.0993 \\ 12279.4286 \\ 21239.6026 \\ 36800.0986 \end{bmatrix}$$

ANEXO G: EXTRAPOLACIÓN POR MÉTODO HUGHES

ANEXO G.1

CONDICIÓN PRUEBA DE MAR (MÉTODO HUGHES)

CÁLCULO DE COEFICIENTE TOTAL DEL MODELO

COEFICIENTE TOTAL DEL MODELO

$$\text{for } a \in [1..\text{length}(V_{\text{barco}})]$$
$$CT_{\text{prueba_mar_modelo}} := \frac{|\text{row}(RT_{\text{prueba_mar_modelo}}; a)|}{\frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{fresh_water}} \cdot Smojada_Modelo_{\text{prueba_mar}} \cdot |\text{row}(V_{\text{modelo}}; a)|^2}$$

RESISTENCIA TOTAL DEL MODELO

$$RT_{\text{prueba_mar_modelo}} = \begin{bmatrix} 16.6936 \\ 27.6315 \\ 48.5442 \\ 82.0877 \\ 146.6559 \\ 254.8633 \end{bmatrix} \text{ N}$$

DENSIDAD AGUA DULCE

$$\rho_{\text{fresh_water}} = 998.8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

SUPERFICIE MOJADA MODELO

$$Smojada_Modelo_{\text{prueba_mar}} = 3.503 \text{ m}^2$$

VELOCIDAD DEL MODELO

$$V_{\text{modelo}} = \begin{bmatrix} 1.1503 \\ 1.3804 \\ 1.6105 \\ 1.8405 \\ 2.0706 \\ 2.3007 \end{bmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$CT_{\text{prueba_mar_modelo}} = \begin{bmatrix} 0.0072 \\ 0.0083 \\ 0.0107 \\ 0.0139 \\ 0.0196 \\ 0.0275 \end{bmatrix}$$

CÁLCULO DE COEFICIENTE FRICCIONAL DEL MODELO

COEFICIENTE FRICCIONAL DEL MODELO

$$\text{for } i \in [1..\text{length}(V_{\text{barco}})]$$
$$CF_{\text{prueba_mar_modelo}} := \frac{0.075}{\left(\log_{10}\left(|\text{row}(Rn_{\text{prueba_mar_modelo}}; i)|\right)\right)^2}$$

NÚMERO DE REYNOSL DEL MODELO

$$Rn_{\text{prueba_mar_modelo}} = \begin{bmatrix} 2.5687 \cdot 10^6 \\ 3.0824 \cdot 10^6 \\ 3.5962 \cdot 10^6 \\ 4.1099 \cdot 10^6 \\ 4.6237 \cdot 10^6 \\ 5.1374 \cdot 10^6 \end{bmatrix}$$

$$CF_{\text{prueba_mar_modelo}} = \begin{bmatrix} 0.0039 \\ 0.0037 \\ 0.0036 \\ 0.0035 \\ 0.0034 \\ 0.0034 \end{bmatrix}$$

CÁLCULO DE COEFICIENTE FRICCIONAL DEL BARCO

COEFICIENTE FRICCIONAL DEL BARCO

$$\text{for } b \in [1..\text{length}(V_{\text{barco}})]$$

$$CF_{\text{prueba_mar_barco}} := \frac{0.075}{\left(\log_{10}\left(\left|\text{row}\left(Rn_{\text{prueba_mar_barco}}; b\right)\right|\right) - 2\right)^2}$$

NÚMERO DE REYNOLDS DEL BARCO

$$Rn_{\text{prueba_mar_barco}} = \begin{bmatrix} 2.979 \cdot 10^7 \\ 3.5748 \cdot 10^7 \\ 4.1706 \cdot 10^7 \\ 4.7664 \cdot 10^7 \\ 5.3623 \cdot 10^7 \\ 5.9581 \cdot 10^7 \end{bmatrix}$$

$$CF_{\text{prueba_mar_barco}} = \begin{bmatrix} 0.0025 \\ 0.0024 \\ 0.0024 \\ 0.0023 \\ 0.0023 \\ 0.0022 \end{bmatrix}$$

FACTOR DE FORMA (MÉTODO PROHASKA)

FACTOR DE FORMA (1+K)

$$Factorforma_{\text{prohaska_prueba_mar}} = 1.4415 \quad // \text{Calculos realizados en Anexo H}$$

CÁLCULO DE COEFICIENTE POR ADICION DE AIRE

COEFICIENTE POR ADICION DE AIRE

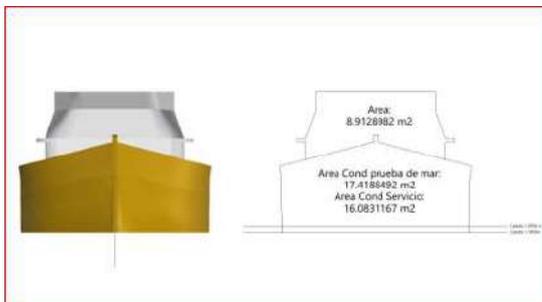
$$CAA_{\text{prueba_mar_barco}} := \frac{0.001 \cdot A_{\text{Trans_prueba_mar_barco}}}{S_{\text{mojada_prueba_mar}}} \quad CAA_{\text{prueba_mar_barco}} = 0.0003$$

AREA TRANSVERSAL DEL BARCO

$$A_{\text{Trans_prueba_mar_barco}} = 26.3317 \text{ m}^2$$

SUPERFICIE MOJADA DEL BARCO

$$S_{\text{mojada_prueba_mar}} = 87.5753 \text{ m}^2$$



CÁLCULO DE COEFICIENTES DE RESISTENCIA TOTAL

COEFICIENTE DE RESISTENCIA TOTAL DEL BARCO

$$CT_{\text{prueba_mar_barco}} := CT_{\text{prueba_mar_modelo}} - \left(Factorforma_{\text{prohaska_prueba_mar}} \right) \cdot \left(CF_{\text{prueba_mar_modelo}} - CF_{\text{prueba_mar_barco}} \right) + CAA_{\text{prueba_mar_barco}}$$

$$CT_{prueba_mar_barco} = \begin{bmatrix} 0.0056 \\ 0.0067 \\ 0.0092 \\ 0.0124 \\ 0.0182 \\ 0.0262 \end{bmatrix}$$

RESISTENCIA DEL BARCO (HUGHES)

RESISTENCIA DEL BARCO (HUGHES)

$$\text{for } i \in [1..\text{length}(V_{barco})]$$

$$RT_{prueba_mar_barco}_i := \frac{1}{2} \cdot \rho_{agua_mar} \cdot Smojada_{prueba_mar} \cdot |\text{row}(CT_{prueba_mar_barco}; i)| \cdot (|\text{row}(V_{barco}; i)|)^2$$

DENSIDAD AGUA DE MAR

$$\rho_{agua_mar} = 1024.81 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

SUPERFICIE MOJADA DEL BARCO

$$Smojada_{prueba_mar} = 87.5753 \text{ m}^2$$

VELOCIDAD DEL BARCO

$$V_{barco} = \begin{bmatrix} 2.5722 \\ 3.0867 \\ 3.6011 \\ 4.1156 \\ 4.63 \\ 5.1444 \end{bmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$RT_{prueba_mar_barco} = \begin{bmatrix} 1650.8108 \\ 2877.3923 \\ 5361.6598 \\ 9445.2084 \\ 17487.9669 \\ 31108.485 \end{bmatrix} \text{ N}$$

RESISTENCIA POR APENDICES

RESISTENCIA POR APENDICES

$$R_{app_prueba_mar} = \begin{bmatrix} 108.7341 \\ 152.1439 \\ 202.1806 \\ 258.7062 \\ 321.6045 \\ 390.7758 \end{bmatrix} \text{ N} \quad //\text{Calculos realizados en la Anexo I}$$

RESISTENCIA TOTAL DEL BARCO

RESISTENCIA TOTAL DEL BARCO

$$RT_{prueba_mar_TOTAL_barco} := RT_{prueba_mar_barco} + R_{app_prueba_mar}$$

$$RT_{prueba_mar_TOTAL_barco} = \begin{bmatrix} 1759.5449 \\ 3029.5362 \\ 5563.8404 \\ 9703.9146 \\ 17809.5714 \\ 31499.2608 \end{bmatrix} \text{ N}$$

ANEXO G.2

CONDICIÓN: SERVICIO (MÉTODO HUGHES)

CÁLCULO DE COEFICIENTE TOTAL DEL MODELO

COEFICIENTE TOTAL DEL MODELO

$$\text{for } a \in [1..\text{length}(V_{\text{barco}})]$$

$$CT_{\text{servicio_modelo}} := \frac{|\text{row}(RT_{\text{servicio_modelo}}; a)|}{\frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{fresh_water}} \cdot Smojada_Modelo_{\text{servicio}} \cdot |\text{row}(V_{\text{modelo}}; a)|^2}$$

RESISTENCIA TOTAL DEL MODELO

$$RT_{\text{servicio_modelo}} = \begin{bmatrix} 17.4625 \\ 29.3375 \\ 53.954 \\ 91.44 \\ 159.7979 \\ 279.3768 \end{bmatrix} \text{ N}$$

DENSIDAD AGUA DULCE

$$\rho_{\text{fresh_water}} = 998.8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

SUPERFICIE MOJADA MODELO

$$Smojada_Modelo_{\text{prueba_mar}} = 3.503 \text{ m}^2$$

VELOCIDAD DEL MODELO

$$V_{\text{modelo}} = \begin{bmatrix} 1.1503 \\ 1.3804 \\ 1.6105 \\ 1.8405 \\ 2.0706 \\ 2.3007 \end{bmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$CT_{\text{servicio_modelo}} = \begin{bmatrix} 0.0067 \\ 0.0078 \\ 0.0106 \\ 0.0137 \\ 0.019 \\ 0.0269 \end{bmatrix}$$

CÁLCULO DE COEFICIENTE FRICCIONAL DEL MODELO

COEFICIENTE FRICCIONAL DEL MODELO

$$\text{for } i \in [1..\text{length}(V_{\text{barco}})]$$

$$CF_{\text{servicio_modelo}} := \frac{0.075}{\left(\log_{10}\left(|\text{row}(Rn_{\text{servicio_modelo}}; i)|\right)\right) - 2}^2$$

NÚMERO DE REYNOSL DEL MODELO

$$Rn_{\text{servicio_modelo}} = \begin{bmatrix} 2.7616 \cdot 10^6 \\ 3.314 \cdot 10^6 \\ 3.8663 \cdot 10^6 \\ 4.4186 \cdot 10^6 \\ 4.971 \cdot 10^6 \\ 5.5233 \cdot 10^6 \end{bmatrix}$$

$$CF_{\text{servicio_modelo}} = \begin{bmatrix} 0.0038 \\ 0.0037 \\ 0.0036 \\ 0.0035 \\ 0.0034 \\ 0.0033 \end{bmatrix}$$

CÁLCULO DE COEFICIENTE FRICCIONAL DEL BARCO

COEFICIENTE FRICCIONAL DEL BARCO

$$\text{for } b \in [1..\text{length}(V_{\text{barco}})]$$

$$CF_{\text{servicio_barco}} := \frac{0.075}{\left(\log_{10}\left(|\text{row}(Rn_{\text{servicio_barco}}; b)|\right)\right) - 2}^2$$

NÚMERO DE REYNOLDS DEL BARCO

$$Rn_{servicio_{barco}} = \begin{matrix} 3.2028 \cdot 10^7 \\ 3.8433 \cdot 10^7 \\ 4.4839 \cdot 10^7 \\ 5.1245 \cdot 10^7 \\ 5.765 \cdot 10^7 \\ 6.4056 \cdot 10^7 \end{matrix}$$

$$CF_{servicio_{barco}} = \begin{matrix} 0.0025 \\ 0.0024 \\ 0.0023 \\ 0.0023 \\ 0.0023 \\ 0.0022 \end{matrix}$$

FACTOR DE FORMA (MÉTODO PROHASKA)

FACTOR DE FORMA (1+K)

$$Factorforma_{prohaska_{servicio}} = 1.3915 \quad // \text{Calculado en Anexo H}$$

CÁLCULO DE COEFICIENTE POR ADICION DE AIRE

COEFICIENTE POR ADICION DE AIRE

$$CAA_{servicio_{barco}} := \frac{0.001 \cdot A_{Trans_{servicio_{barco}}}}{Smojada_{servicio}}$$

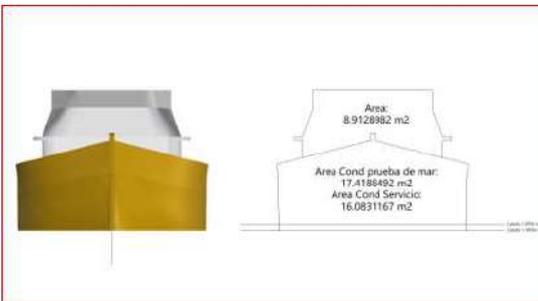
$$CAA_{servicio_{barco}} = 0.0003$$

AREA TRANSVERSAL DEL BARCO

$$A_{Trans_{servicio_{barco}}} = 24.996 \text{ m}^2$$

SUPERFICIE MOJADA DEL BARCO

$$Smojada_{servicio} = 98.39 \text{ m}^2$$



CÁLCULO DE COEFICIENTES DE RESISTENCIA TOTAL

COEFICIENTE DE RESISTENCIA TOTAL DEL BARCO

$$CT_{servicio_{barco}} := CT_{servicio_{modelo}} - (Factorforma_{prohaska_{servicio}}) \cdot (CF_{servicio_{modelo}} - CF_{servicio_{barco}}) + CAA_{servicio_{barco}}$$

$$CT_{servicio_{barco}} = \begin{matrix} 0.0051 \\ 0.0063 \\ 0.0091 \\ 0.0124 \\ 0.0176 \\ 0.0256 \end{matrix}$$

RESISTENCIA DEL BARCO (HUGHES)

RESISTENCIA DEL BARCO (HUGHES)

```
for i ∈ [1..length(V_barco)]
    RT_servicio_barco_i := 1/2 · ρ_agua_mar · Smojada_servicio · |row(CT_servicio_barco; i)| · (|row(V_barco; i)|)2
```

DENSIDAD AGUA DE MAR

$$\rho_{\text{agua_mar}} = 1024.81 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

SUPERFICIE MOJADA DEL BARCO

$$Smojada_{\text{servicio}} = 98.39 \text{ m}^2$$

VELOCIDAD DEL BARCO

$$V_{\text{barco}} = \begin{bmatrix} 2.5722 \\ 3.0867 \\ 3.6011 \\ 4.1156 \\ 4.63 \\ 5.1444 \end{bmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$RT_{\text{servicio_barco}} = \begin{bmatrix} 1707.9299 \\ 3038.7025 \\ 5979.6872 \\ 10548.3313 \\ 19054.4079 \\ 34108.4924 \end{bmatrix} \text{ N}$$

RESISTENCIA POR APENDICES

RESISTENCIA POR APENDICES

$$R_{\text{app_servicio}} = \begin{bmatrix} 107.4953 \\ 150.4349 \\ 199.9364 \\ 255.8637 \\ 318.1022 \\ 386.5537 \end{bmatrix} \text{ N}$$

//Calculos realizados en Anexo I

RESISTENCIA TOTAL DEL BARCO

RESISTENCIA TOTAL DEL BARCO

$$RT_{\text{servicio_TOTAL_barco}} := RT_{\text{servicio_barco}} + R_{\text{app_servicio}}$$

$$RT_{\text{servicio_TOTAL_barco}} = \begin{bmatrix} 1815.4252 \\ 3189.1375 \\ 6179.6236 \\ 10804.195 \\ 19372.5101 \\ 34495.0461 \end{bmatrix} \text{ N}$$

ANEXO H: CÁLCULO DE FACTOR DE FORMA (1+K)

ANEXO H.1

CONDICIÓN: PRUEBA DE MAR

CÁLCULO DE VALORES A GRAFICAR (X y Y)

VALORES DE X

VALORES DE X CALCULADOS CON LA RELACIÓN (fn^4/Cf)

$$\text{for } c \in [1..\text{length}(V_{\text{barco}})]$$
$$ffx_c := \frac{|\text{row}(fn_{\text{prueba_mar_modelo}}; c)|^4}{|\text{row}(CF_{\text{prueba_mar_modelo}}; c)|}$$

NÚMERO DE FROUDE DEL MODELO

| | |
|-----------------------------------|--------|
| $fn_{\text{prueba_mar_modelo}}$ | 0.2354 |
| | 0.2825 |
| | 0.3296 |
| | 0.3767 |
| | 0.4237 |
| | 0.4708 |

COEFICIENTE FRICCIONAL DEL MODELO

| | |
|-----------------------------------|--------|
| $CF_{\text{prueba_mar_modelo}}$ | 0.0039 |
| | 0.0037 |
| | 0.0036 |
| | 0.0035 |
| | 0.0034 |
| | 0.0034 |

VALORES CALCULADOS DE X

| | |
|---------|---------|
| $ffx =$ | 0.7963 |
| | 1.7111 |
| | 3.2652 |
| | 5.713 |
| | 9.3551 |
| | 14.5398 |

VALORES DE Y

VALORES DE Y CALCULADOS CON LA RELACIÓN (Ct/Cf)

$$\text{for } d \in [1..\text{length}(V_{\text{barco}})]$$
$$ffy_d := \frac{|\text{row}(CT_{\text{prueba_mar_modelo}}; d)|}{|\text{row}(CF_{\text{prueba_mar_modelo}}; d)|}$$

COEFICIENTE DE RESISTENCIA TOTAL DEL MODELO

| | |
|----------------------------------|--------|
| $CT_{\text{prueba_mar_barco}}$ | 0.0056 |
| | 0.0067 |
| | 0.0092 |
| | 0.0124 |
| | 0.0182 |
| | 0.0262 |

COEFICIENTE FRICCIONAL DEL MODELO

| | |
|-----------------------------------|--------|
| $CF_{\text{prueba_mar_modelo}}$ | 0.0039 |
| | 0.0037 |
| | 0.0036 |
| | 0.0035 |
| | 0.0034 |
| | 0.0034 |

VALORES CALCULADOS DE Y

| | |
|---------|--------|
| $ffy =$ | 1.8697 |
| | 2.227 |
| | 2.9609 |
| | 3.9316 |
| | 5.6736 |
| | 8.1438 |

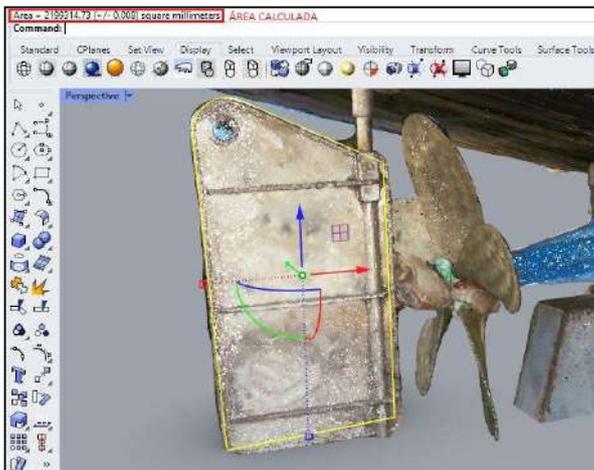
ANEXO I: CALCULO DE RESISTENCIA POR APENDICES

ANEXO I.1

CONDICIÓN: PRUEBA DE MAR

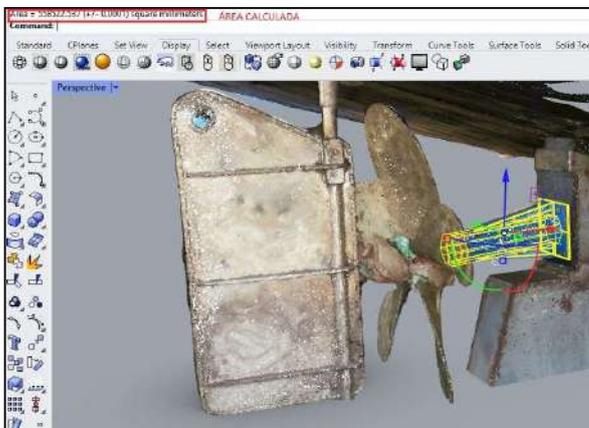
CÁLCULO DE ÁRES DE APENDICES

CÁLCULO DE ÁREA DE PALAS CON SOFTWARE RHINOCEROS



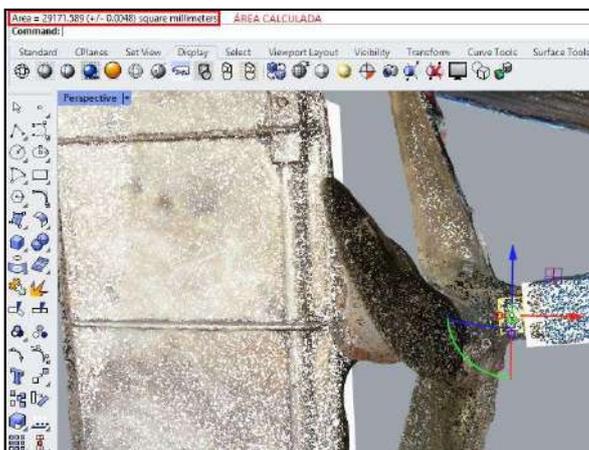
$Pala_{talon_quilla} := 2.199 \text{ m}^2$

CÁLCULO DE ÁREA DE BOCINA CODASTE CON SOFTWARE RHINOCEROS



$Bocina_{codaste} := 0.48215 \text{ m}^2$

CÁLCULO DE ÁREA DE EJE DE COLA EXPUESTO CON SOFTWARE RHINOCEROS



$Eje_{colero} := 0.0167 \text{ m}^2$

CÁLCULO DE ÁREA DE KEEL COOLER

Al momento de realizar el trabajo de fotogrametría el keel cooler no estaba instalado, pero por parte de la empresa responsable de la instalación se informó que el barco contaría con un keel cooler de 8 tubos de 6 metros de largo, con un diámetro por tubo de 1.5 pulgadas. Realizando el cálculo de área aproximada se obtiene:

$$Keel_cooler := 8 \cdot 6 \cdot 3.14 \cdot 1.5 \text{ in}$$

$$Keel_cooler = 5.74 \text{ m}$$

CÁLCULO DE RESISTENCIA POR APENDICES

ÁREAS DE APENDICES

$$S_{app} := \begin{bmatrix} Pala_{talon_quilla} & 2.199 \text{ m}^2 \\ Bocina_{codaste} & 0.48215 \text{ m}^2 \\ Eje_{colero} & 0.0167 \text{ m}^2 \\ Keel_cooler & 5.74 \text{ m}^2 \end{bmatrix}$$

COEFICIENTES PARA APENDICES

$$F_{app} := \begin{bmatrix} Pala_{talon_quilla} & 1.5 \\ Bocina_{codaste} & 3 \\ Eje_{colero} & 2 \\ Keel_cooler & 1.4 \end{bmatrix}$$

CÁLCULO DE COEFICIENTE EQUIVALENTE DE TODOS LOS APENDICES

$$F_{appE} := \frac{\sum_{s=1}^4 \left(\left| \text{row}(\text{col}(F_{app}; 2); s) \right| \cdot \left| \text{row}(\text{col}(S_{app}; 2); s) \right| \right)}{\sum_{s=1}^4 \left| \text{row}(\text{col}(S_{app}; 2); s) \right|}$$

$$F_{appE} = 1.5187$$

CÁLCULO DE RESISTENCIA POR APENDICES

$$\text{for } i \in [1..length(V_{barco})]$$

$$R_{app_prueba_mar_i} := \frac{1}{2} \cdot \rho_{agua_mar} \cdot \left| \text{row}(V_{barco}; i) \right|^2 \cdot \left| \text{row}(CF_{prueba_mar_barco}; i) \right| \cdot F_{appE} \cdot \sum_{s=1}^4 \left| \text{row}(\text{col}(S_{app}; 2); s) \right|$$

COEFICIENTE FRICIONAL DEL BARCO

$$CF_{prueba_mar_barco} = \begin{bmatrix} 0.0025 \\ 0.0024 \\ 0.0024 \\ 0.0023 \\ 0.0023 \\ 0.0022 \end{bmatrix}$$

VELOCIDAD DEL BARCO

$$V_{barco} = \begin{bmatrix} 2.5722 \\ 3.0867 \\ 3.6011 \\ 4.1156 \\ 4.63 \\ 5.1444 \end{bmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

DENSIDAD DEL AGUA DE MAR

$$\rho_{agua_mar} = 1024.81 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

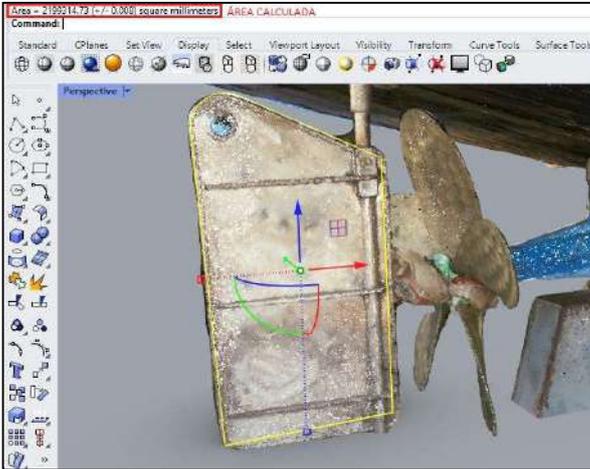
$$R_{app_prueba_mar} = \begin{bmatrix} 108.7341 \\ 152.1439 \\ 202.1806 \\ 258.7062 \\ 321.6045 \\ 390.7758 \end{bmatrix} \text{ N}$$

ANEXO I.2

CONDICIÓN: SERVICIO

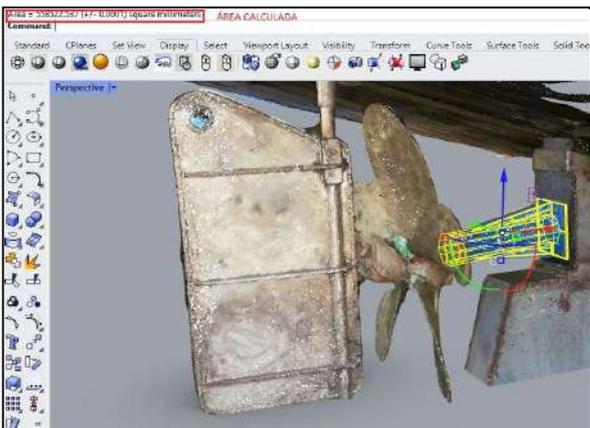
CÁLCULO DE ÁRES DE APENDICES

CÁLCULO DE ÁREA DE PALAS CON SOFTWARE RHINOCEROS



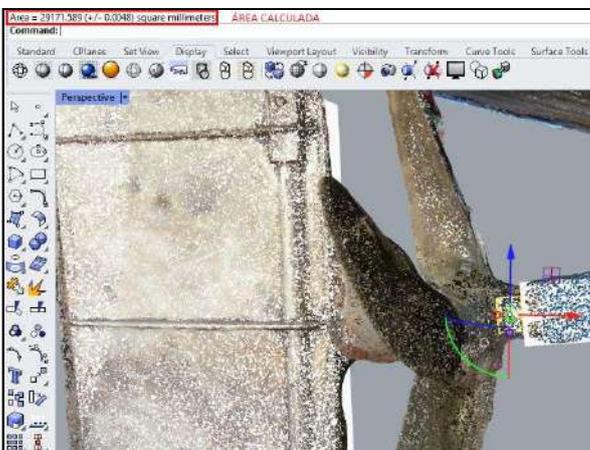
$$Pala_{\text{talon_quilla}} := 2.199 \text{ m}^2$$

CÁLCULO DE ÁREA DE BOCINA CODASTE CON SOFTWARE RHINOCEROS



$$Bocina_{\text{codaste}} := 0.48215 \text{ m}^2$$

CÁLCULO DE ÁREA DE EJE DE COLA EXPUESTO CON SOFTWARE RHINOCEROS



$$Eje_{\text{colero}} := 0.0167 \text{ m}^2$$

CÁLCULO DE ÁREA DE KEEL COOLER

Al momento de realizar el trabajo de fotogrametría el keel cooler no estaba instalado, pero por parte de la empresa responsable de la instalación se informó que el barco contaría con un keel cooler de 8 tubos de 6 metros de largo, con un diámetro por tubo de 1.5 pulgadas. Realizando el cálculo de área aproximada se obtiene:

$$Keel_cooler := 8 \cdot 6 \cdot 3.14 \cdot 1.5 \text{ in}$$

$$Keel_cooler = 5.74 \text{ m}$$

CÁLCULO DE RESISTENCIA POR APENDICES

ÁREAS DE APENDICES

$$S_{app} := \begin{bmatrix} Pala_{talon_quilla} & 2.199 \text{ m}^2 \\ Bocina_{codaste} & 0.48215 \text{ m}^2 \\ Eje_{colero} & 0.0167 \text{ m}^2 \\ Keel_cooler & 5.74 \text{ m}^2 \end{bmatrix}$$

COEFICIENTES PARA APENDICES

$$F_{app} := \begin{bmatrix} Pala_{talon_quilla} & 1.5 \\ Bocina_{codaste} & 3 \\ Eje_{colero} & 2 \\ Keel_cooler & 1.4 \end{bmatrix}$$

CÁLCULO DE COEFICIENTE EQUIVALENTE DE TODOS LOS APENDICES

$$F_{appE} := \frac{\sum_{s=1}^4 \left(\left| \text{row}(\text{col}(F_{app}; 2); s) \right| \cdot \left| \text{row}(\text{col}(S_{app}; 2); s) \right| \right)}{\sum_{s=1}^4 \left| \text{row}(\text{col}(S_{app}; 2); s) \right|}$$

$$F_{appE} = 1.5187$$

CÁLCULO DE RESISTENCIA POR APENDICES

$$\text{for } i \in [1..length(V_{barco})]$$

$$R_{app_servicio_i} := \frac{1}{2} \cdot \rho_{agua_mar} \cdot \left| \text{row}(V_{barco}; i) \right|^2 \cdot \left| \text{row}(CF_servicio_{barco}; i) \right| \cdot F_{appE} \cdot \sum_{s=1}^4 \left| \text{row}(\text{col}(S_{app}; 2); s) \right|$$

COEFICIENTE FRICIONAL DEL BARCO

$$CF_servicio_{barco} = \begin{bmatrix} 0.0025 \\ 0.0024 \\ 0.0023 \\ 0.0023 \\ 0.0023 \\ 0.0022 \end{bmatrix}$$

VELOCIDAD DEL BARCO

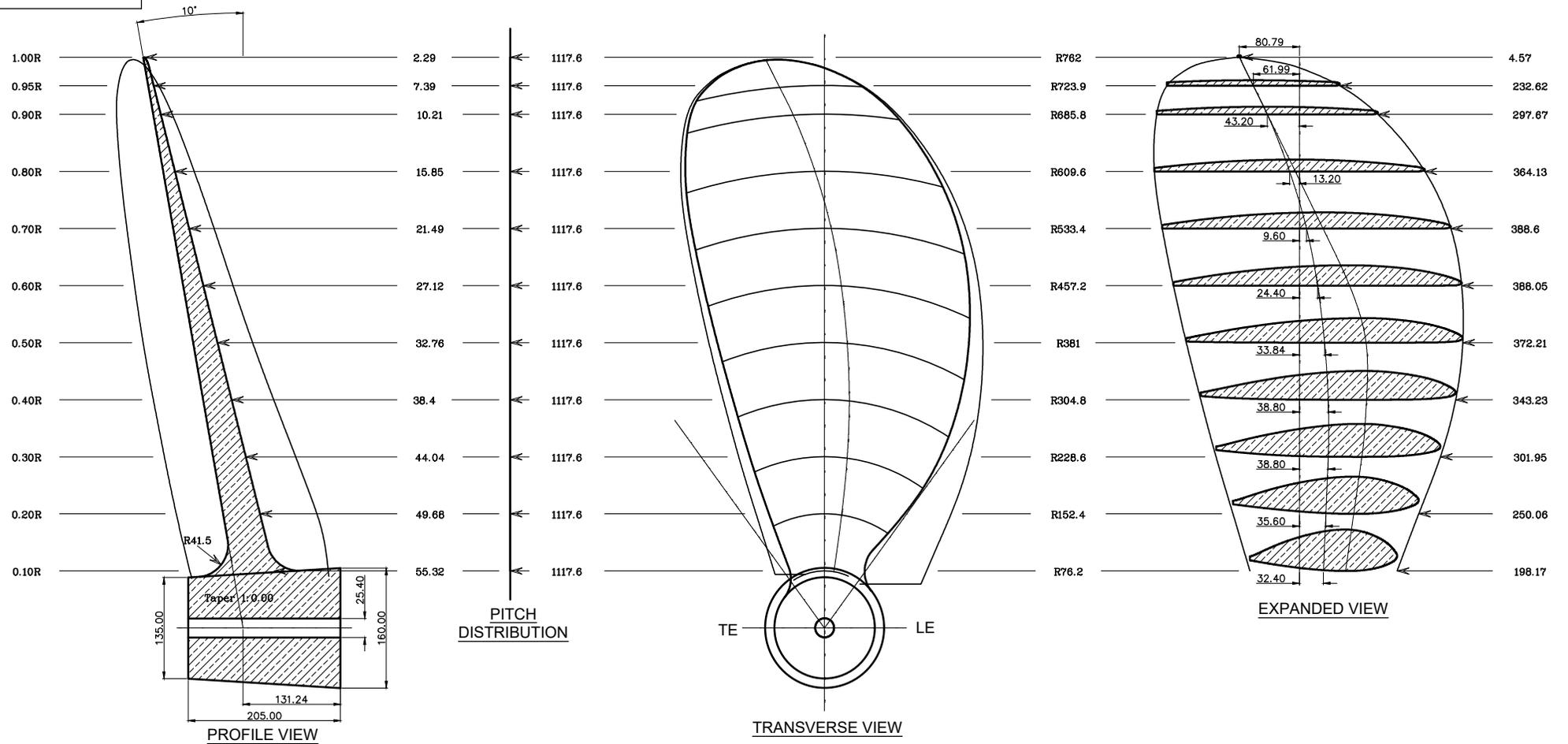
$$V_{barco} = \begin{bmatrix} 2.5722 \\ 3.0867 \\ 3.6011 \\ 4.1156 \\ 4.63 \\ 5.1444 \end{bmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

DENSIDAD DEL AGUA DE MAR

$$\rho_{agua_mar} = 1024.81 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$R_{app_servicio} = \begin{bmatrix} 107.4953 \\ 150.4349 \\ 199.9364 \\ 255.8637 \\ 318.1022 \\ 386.5537 \end{bmatrix} \text{ N}$$

ANEXO K



PROPELLER INFORMATION

| | | |
|-------------------|---|-------------------------------|
| TIPO DE PROPULSOR | : | FPP – HÉLICE DE PASO FIJO |
| NÚMERO DE PALAS | : | 5 |
| DIÁMETRO | : | 1524 mm (60 Pulg.) |
| PASO | : | 1117.6 mm (44 Pulg.) |
| DAR | : | 0.6 |
| MATERIAL | : | Nibral [Cu 3] |
| SKEW | : | 15.5 ° |
| PESO | : | 205 Kg |
| RAKE | : | 10° |
| ROTACION | : | RH-Horario |
| EJE COLERO | : | ∅ 3 1/2"–ACERO INOX(AISI316L) |



UNI

PLANO DE FABRICACIÓN HÉLICE MARINA 60X44

| | | | | |
|------------------------------------|--|-----------------------------|--|---------------------|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA | FACULTAD: INGENIERIA MECÁNICA | DISEÑO PLANNER 1 | PROPIEDAD OLIVOS MAQUINARIAS S.A.C RUC: 20600405358 | FECHA 20/10/2023 |
| | ESCUELA PROFESIONAL: INGENIERIA NAVAL | APROBADO PROJECT MANAGER | LA EMPRESA AUTORIZA EL USO DE ESTE PLANO ÚNICAMENTE PARA LA PRESENTE TESIS | |
| | | REVISADO C.E.O | UNIT: mm | SCALE: 1:8 |