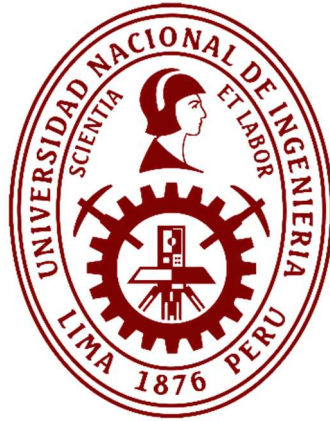


Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



TESIS

**Optimización del Sistema de Propulsión de las Embarcaciones
de Alta Velocidad mediante el Análisis por Herramientas
Computacionales**

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Naval.

Elaborado por

Luis Fernando Concha Figueroa

 [0009-0004-0244-5377](https://orcid.org/0009-0004-0244-5377)

Asesor

MSc. Jorge Alfredo Mendoza Dávila

 [0000-0002-4017-0202](https://orcid.org/0000-0002-4017-0202)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	(Concha, 2025)
Referencia/Reference	Concha, L. (2025). <i>Optimización del Sistema de Propulsión de las Embarcaciones de Alta Velocidad mediante el Análisis por Herramientas Computacionales</i> . [Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a mis padres, Claudio y Sabina, quienes me apoyaron en todo momento y fueron un pilar fundamental en mi vida profesional y personal. También a mis tíos; Félix, Felicia y Jesús, quienes siempre me apoyaron y confiaron en mí.

Luis F. Concha Figueroa

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a mis padres, Sabina y Claudio, quienes siempre me apoyaron de distintas maneras, y que gracias a ellos me desarrolle como persona y profesional. También, agradezco a mis hermanos; Eduardo y Camila, por siempre compartir buenos momentos conmigo. A mi familia en general por siempre preocuparse por mi bienestar.

A mis amigos de la universidad, del colegio y del vecindario, con quienes compartí momentos agradables, a pesar del agotamiento causado por los estudios en la universidad.

Finalmente, a mi asesor, el MSc. Jorge Mendoza, por el apoyo y tiempo brindado en la elaboración de esta tesis.

Resumen

En el Perú, la demanda de embarcaciones de alta velocidad es cada vez mayor debido a la necesidad de transportar personal a las plataformas petroleras, embarcaciones y lugares sin conexión terrestre, como existen en la Amazonía peruana. Uno de los retos de los armadores, dueños de estas embarcaciones, es alcanzar el máximo rendimiento del sistema de propulsión. De esta manera, la embarcación consumirá menos combustible, disminuyendo los costos operacionales. El objetivo de esta tesis es desarrollar una herramienta computacional para evaluar y calcular, con alta precisión, el rendimiento propulsivo (potencia BHP y la eficiencia de propulsión total) en las embarcaciones de alta velocidad con sistema convencional, utilizando únicamente los datos geométricos del casco y del propulsor, evaluándose también el riesgo de cavitación en el propulsor. Este algoritmo permitirá optimizar o seleccionar el sistema propulsivo de estas embarcaciones. Para alcanzar este objetivo, métodos para calcular la resistencia al avance, los coeficientes de interacción casco-hélice, el rendimiento del propulsor y la cavitación fueron estudiados e implementados en el algoritmo desarrollado en LabVIEW.

Para verificar la precisión del algoritmo, un caso de estudio es evaluado. En este caso, se verifica el cálculo de la potencia, rotación y torque realizado por el algoritmo, proporcionando buenos resultados. Además, el algoritmo fue utilizado para optimizar el sistema propulsivo de la embarcación utilizada como caso de estudio, logrando mejorar el rendimiento propulsivo y disminuir la cavitación.

Palabras claves: Rendimiento propulsivo, Embarcaciones de alta velocidad, Rendimiento hidrodinámico, Cavitación, Interacción casco-hélice.

Abstract

In Peru, the demand for high-speed vessels is increasing due to the need to transport crew from coast to oil platforms, vessels, and locations without land connections, such as those found in the Peruvian Amazon. One of the challenges facing shipowners of these vessels is to achieve the maximum propulsion system performance. This will reduce fuel consumption, lowering operating costs. The objective of this thesis is to develop a computational tool to evaluate and calculate, with high precision, propulsion performance (BHP and efficiency) in high-speed vessels with conventional propulsion systems, using only the geometric data of the hull and propeller, and the assessing also the risk of cavitation in the propeller. This algorithm will allow for the optimization or selection of the propulsion system for these vessels. To achieve this objective, methods for calculating resistance, hull-propeller interaction coefficients, propeller efficiency, and cavitation were studied and implemented in the algorithm developed in LabVIEW.

To verify the algorithm's accuracy, a case study was evaluated. In this case, the calculation of power, rotation, and torque was verified, getting satisfactory results. Furthermore, the algorithm was used to optimize the propulsion system of the vessel used as a case study, improving propulsion efficiency and reducing the cavitation.

Keywords: Propulsion efficiency, High-speed vessels, Hydrodynamic performance, Cavitation, Hull-propeller interaction.

Tabla de Contenido

Resumen	V
Abstract	VI
Tabla de Contenido	VII
Lista de Tablas	X
Lista de Figuras	XI
Introducción	XV
CAPITULO I Generalidades.....	1
1.1 Antecedentes investigativos	1
1.2 Identificación y descripción del problema de estudio	7
1.3 Formulación del problema.....	12
1.3.1 Problema principal	12
1.3.2 Problemas específicos.....	12
1.4 Justificación e importancia	12
1.5 Objetivos	15
1.5.1 Objetivo general.....	15
1.5.2 Objetivos específicos.....	16
1.6 Hipótesis	16
1.6.1 Hipótesis general	16
1.6.2 Hipótesis específicas	16
1.7 Variables y operacionalización de variables	17
1.7.1 Variables.....	17
1.7.2 Operacionalización de variables	18
1.8 Metodología de la investigación	20

1.8.1	Unidad de análisis	20
1.8.2	Tipo, enfoque y nivel de investigación	20
1.8.3	Diseño de la investigación	21
1.8.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	21
CAPITULO II Marco Teórico y Conceptual.....		22
2.1	Desempeño hidrodinámico de las embarcaciones de alta velocidad	22
2.1.1	Equilibrio dinámico – Método de Savitsky	29
	a) Consideraciones geométricas.....	30
	b) Sustentación de superficies prismáticas.	33
	c) Cálculo de la resistencia al avance total.	36
2.2	Influencia de la interacción casco-hélice en el desempeño propulsivo	38
2.2.1	Variaciones de la velocidad de avance del propulsor.....	39
2.2.2	Variación de la resistencia al avance	45
2.2.3	Efectos del flujo oblicuo en el propulsor	47
2.3	Desempeño del sistema de propulsión.....	51
2.3.1	Desempeño de la hélice	53
	a) Serie B (Wageningen).	55
	b) Serie Gawn.....	57
	c) Determinación de la potencia requerida por la hélice (DHP).....	59
2.3.2	Cavitación en la hélice	61
	a) Profundidad del propulsor.....	66
2.4	Marco conceptual.....	68
2.4.1	Cascos de alta velocidad	68
2.4.2	Casco planeador.....	69
2.4.3	Desempeño propulsivo	69
2.4.4	Comportamiento hidrodinámico	69

2.4.5	Número de Froude volumétrico.....	70
2.4.6	Ventilación en la hélice	70
CAPITULO III Desarrollo del Trabajo de Investigación.....		71
3.1	Estimación de la resistencia al avance y factores hidrodinámicos	72
3.2	Metodología de cálculo de la RPS, torque y potencia de la hélice.....	77
3.3	Metodología de cálculo del desempeño propulsivo y la cavitación	78
3.4	Flujograma de la metodología de cálculo implementado en el algoritmo	81
3.5	Optimización de la Propulsión mediante las Curvas de Carga	83
CAPITULO IV Resultados, Contratación de Hipótesis y Discusión de Resultados.....		88
4.1	Descripción del caso de estudio.....	88
4.2	Ensayo experimental para obtener el torque y la rotación	91
4.3	Estimación del desempeño propulsivo	92
4.3.1	Determinación de las curvas de desempeño de la hélice.....	92
4.3.2	Cálculo de la resistencia al avance y ángulo de trim.....	96
4.3.3	Análisis de resultados	101
4.4	Análisis del desempeño propulsivo	107
4.5	Optimización del sistema de propulsión	110
Conclusiones		123
Recomendaciones		125
Referencias		126
Anexos		130

Lista de Tablas

Tabla 1.1 Matriz de Operacionalización de Variables.....	19
Tabla 4.1 Características principales del Barco Piloto.....	89
Tabla 4.2 Datos de entrada para calcular la resistencia por Savitsky mediante el Maxsurf	96
Tabla 4.3 Datos de entrada para calcular la resistencia por Holtrop mediante el algoritmo	97
Tabla 4.4 Resistencia al avance en el régimen de desplazamiento - utilizando Holtrop	97
Tabla 4.5 Resistencia al avance en altas velocidades - utilizando Savitsky (Maxsurf Resistance).....	98
Tabla 4.6 Ángulo de trim dinámico calculado utilizando Savitsky (Maxsurf Resistance)	100
Tabla 4.7 Comparación entre la rotación medida en prueba de navegación y la obtenida mediante el algoritmo.....	101
Tabla 4.8 Comparación entre el torque medido en prueba de navegación y el obtenido mediante el algoritmo.....	102
Tabla 4.9 Comparación entre la potencia medida en prueba de navegación y la obtenida mediante el algoritmo.....	103
Tabla 4.10 Influencia del flujo oblicuo en el cálculo de la rotación	106
Tabla 4.11 Influencia del flujo oblicuo en el cálculo del torque	106
Tabla 4.12 Influencia del flujo oblicuo en el cálculo de la potencia.....	107
Tabla 4.13 Cuadro resumen de las modificaciones recomendadas para el sistema de propulsión del Barco Piloto	122

Lista de Figuras

Figura 1.1 Tipos de sistemas de Propulsión	10
Figura 1.2 Tendencia de Uso de los Sistemas de Propulsión	10
Figura 2.1 Diagrama de Cuerpo Libre en el Régimen de Desplazamiento	22
Figura 2.2 Diagrama de Cuerpo Libre del Casco en los Regímenes Hidrodinámicos ..	25
Figura 2.3 Curva Característica de la Resistencia al Avance en Embarcaciones de Alta Velocidad.....	26
Figura 2.4 Descripción del Planeo en una Superficie Plana.....	30
Figura 2.5 Descripción del Planeo en una Superficie Prismática (Casco en V).....	32
Figura 2.6 Vista Transversal de una Superficie Prismática en Régimen de Planeo	33
Figura 2.7 Diagrama de Cuerpo Libre de un Casco Prismático en Planeo.....	37
Figura 2.8 Diagrama de Cuerpo Libre de una Embarcación Operando en Altas Velocidades	38
Figura 2.9 Variación de los Coeficientes de las Estelas Nominal y Efectiva en Relación al Número de Froude Volumétrico	42
Figura 2.10 Diferencia entre el Campo de Velocidades, con Hélice y sin Hélice, en la Estela	43
Figura 2.11 Variación del Coeficiente de Estela en Función del Coeficiente de Bloque	44
Figura 2.12 Variación del Coeficiente de Reducción de Empuje en Relación al Número de Froude Volumétrico.....	46
Figura 2.13 Variación del Coeficiente de Reducción de Empuje en Función del Coeficiente de Bloque.....	47
Figura 2.14 Diagrama Vectorial del Empuje (T) y la Velocidad de Avance de la Hélice (V_a).....	48
Figura 2.15 Efectos en la localización del empuje debido a la velocidad tangencial V_{at}	50

Figura 2.16 Diagrama de Pala Típica de la Serie B	55
Figura 2.17 Gráfica de Desempeño Típico de la Serie B	56
Figura 2.18 Esquema de Pala Típica de la Serie Gawn	57
Figura 2.19 Gráfica de desempeño típico de la Serie Gawn	58
Figura 2.20 Distribución de la Presión y del Fluido en una Sección de la Pala.....	62
Figura 2.21 Velocidad Relativa en una Sección de la Pala	63
Figura 2.22 Presión Media en la Hélice	64
Figura 2.23 Diagrama de Burrill	65
Figura 2.24 Esquema de Ubicación de la Hélice en el Régimen de Desplazamiento ..	67
Figura 2.25 Esquema de Ubicación de la Hélice en Altas Velocidades	68
Figura 2.26 Ejemplos de Tipos de Casco de Alta Velocidad	68
Figura 3.1 Software LabVIEW.....	71
Figura 3.2 Formato del archivo procesado por el algoritmo para calcular la resistencia.	72
Figura 3.3 Diagrama de bloques para el cálculo de la resistencia al avance.....	73
Figura 3.4 Formato del archivo procesado por el algoritmo para estimar el trim dinámico.	73
Figura 3.5 Ventana de resultados del cálculo y análisis de la resistencia al avance. ..	74
Figura 3.6 Diagrama de bloques implementado para cálculo de estela total.....	76
Figura 3.7 Diagrama de bloques implementado para cálculo del coeficiente de reducción de empuje.....	76
Figura 3.8 Algoritmo iterativo implementado para calcular las revoluciones de la hélice a una velocidad determinada.	77
Figura 3.9 Ventana de resultados del cálculo y análisis del desempeño de la hélice. .	78
Figura 3.10 Ventana de análisis del comportamiento de la potencia y la eficiencia propulsiva.	79
Figura 3.11 Implementación del algoritmo para el cálculo de los niveles de cavitación.	80

Figura 3.12 Ventana de análisis de los niveles de cavitación de la hélice.....	81
Figura 3.13 Flujograma de la metodología de cálculo implementada en LabVIEW.....	83
Figura 3.14 Curva de carga de la hélice para diferentes valores de BAR.....	84
Figura 3.15 Curva de carga de la hélice para diferentes valores de diámetro.....	85
Figura 3.16 Curvas de carga de la hélice para diferentes valores de razón P/D.....	85
Figura 3.17 BAR mínimo calculado por el algoritmo en diferentes velocidades.....	86
Figura 3.18 Curva de carga de la hélice versus la curva de motor - seleccionados. ...	87
Figura 4.1 Embarcación "Barco Piloto"	89
Figura 4.2 Plano de línea de forma del "Barco Piloto".....	90
Figura 4.3 Instalación de strain gage y sistema de telemetría.....	92
Figura 4.4 Software de adquisición de señales y medición de potencia (SMEG).....	92
Figura 4.5 Scanner 3D HandyScan.....	93
Figura 4.6 Levantamiento de la geometría de la hélice	94
Figura 4.7 Medición de una sección de la pala	94
Figura 4.8 Simulación de la geometría de la pala en el software GeoPro	95
Figura 4.9 Estimación de las curvas de desempeño de la hélice utilizando el GeoPro	95
Figura 4.10 Comportamiento de la resistencia en relación a la velocidad - Barco Piloto	99
Figura 4.11 Gráfica de ángulo de trim vs velocidad utilizando Savitsky	100
Figura 4.12 Gráfico de la rotación medida y la simulada por el algoritmo.....	104
Figura 4.13 Gráfico del torque medido y el simulado por el algoritmo	104
Figura 4.14 Gráfico de la potencia medida y la simulada por el algoritmo.....	105
Figura 4.15 Estimación de la potencia BHP en el Barco Piloto - Ventana del algoritmo	108
Figura 4.16 Estimación de la eficiencia propulsiva en el Barco Piloto - Ventana del algoritmo.....	109
Figura 4.17 Estimación de los niveles de cavitación en la hélice original - Ventana del algoritmo.....	109

Figura 4.18 Diagrama de carga del motor y de la hélice	111
Figura 4.19 Variación de la carga de la hélice cuando el P/D es alterado	112
Figura 4.20 Comportamiento de la eficiencia de la hélice en relación al P/D	113
Figura 4.21 Variación de la carga de la hélice cuando el diámetro es alterado	113
Figura 4.22 Comportamiento de la eficiencia de la hélice en relación al diámetro.....	114
Figura 4.23 Curva de carga de la hélice cuando $D=0.52$ m.....	115
Figura 4.24 Niveles de cavitación de la hélice cuando $D=0.52$ m.....	116
Figura 4.25 Variación de la carga de la hélice cuando la razón de áreas (BAR) es alterada.....	117
Figura 4.26 Comportamiento de la eficiencia de la hélice en relación a la razón de áreas (BAR).....	117
Figura 4.27 Curva de carga de la hélice en la tercera modificación - Cambio de hélice	118
Figura 4.28 Niveles de cavitación en la tercera modificación - Cambio de hélice.....	119
Figura 4.29 Curva de carga de la hélice en la cuarta modificación - Cambio de las hélices y las cajas reductoras	120
Figura 4.30 Niveles de cavitación en la cuarta modificación - Cambio de la hélice y de la caja reductora.....	121

Introducción

En la actualidad, el Perú está en pleno proceso de desarrollo portuario, siendo el puerto de Chancay un referente para la logística marítima. Por esta razón, disminuir los tiempos en la cadena logística se vuelve más importante, a fin de que los puertos sean más eficientes y productivos.

Las embarcaciones de alta velocidad son actores clave en la logística marítima, debido a que son frecuentemente utilizadas en este ámbito, siendo su principal función el transporte de personal o tripulación hacia embarcaciones mercantes o plataformas offshore. Por lo tanto, es esencial que estas embarcaciones cumplan su función en tiempos relativamente cortos, a fin de reducir los tiempos de espera.

Por los motivos expuestos, la presente tesis se enfoca en establecer una metodología para analizar el desempeño propulsivo de las embarcaciones de alta velocidad, las cuales presentan un comportamiento hidrodinámico complejo. Debido a esto, el estudio del desempeño propulsivo debe ser más detallado que en las embarcaciones de desplazamiento.

A fin de cumplir con el objetivo, el presente trabajo está organizado en seis capítulos, siendo el primero dedicado a la identificación y contextualización del área de estudio. Este capítulo también proporciona la justificación y los propósitos que fundamentan la elaboración del presente trabajo.

Asimismo, en el primer capítulo se presenta una breve revisión bibliográfica que muestra los avances investigativos en el área de desempeño propulsivo de embarcaciones de alta velocidad. Adicionalmente, en este capítulo, se presenta la evolución de los softwares y algoritmos que evalúan el desempeño propulsivo de este tipo de embarcaciones, a fin de tener una mejor comprensión de las razones por las cuales algunas metodologías de cálculo fueron utilizadas en esta tesis.

El segundo capítulo detalla el marco conceptual y teórico, mostrando la metodología empleada para el cómputo del desempeño propulsivo. El capítulo

comienza explicando el método de Savitsky, el cual describe el comportamiento hidrodinámico de los cascos prismáticos. Seguidamente, se presenta la formulación utilizada para el cálculo de los coeficientes de la interacción casco-hélice, que es producto de una regresión lineal realizada con datos de simulación numérica. Además, se desarrolla un método para estimar con precisión la potencia entregada a la hélice. Los tipos de hélices estudiados fueron de la serie B y de la serie Gawn, debido a que son los más utilizados en la industria. Finalmente, se presenta un método para estimar los niveles de cavitación en la hélice, considerando la variación de profundidad de la hélice en las embarcaciones de planeo.

El tercer capítulo muestra el desarrollo del algoritmo, describiendo el flujograma principal y los sub-flujogramas utilizados para programar e integrar los métodos en el *software* LabVIEW.

El cuarto capítulo es dedicado a la presentación de los resultados de la tesis, realizando el análisis de un caso de estudio. Además, las rutinas del programa fueron validadas con resultados experimentales. El caso de estudio fue una embarcación tipo *Pilot Boat* (casco planeador), en el cual se realizó una prueba de navegación para obtener el torque, RPM, y la potencia en la salida del motor en diferentes velocidades, comparándose los datos obtenidos con los resultados proporcionados por el algoritmo. En este caso, la optimización del sistema propulsivo se realizó utilizando el algoritmo, a fin de mejorar su rendimiento propulsivo.

En el quinto y sexto capítulo, de acuerdo a los resultados obtenidos, las conclusiones y recomendaciones de la tesis son expuestas. Se presentan y recomiendan las limitaciones y trabajos futuros, para mejorar el algoritmo propuesto.

CAPITULO I

Generalidades

1.1 Antecedentes investigativos

El trabajo realizado por D. Savitsky (1964), sobre las características hidrodinámicas de los cascos prismáticos de planeo, fue la base para el desarrollo de varias investigaciones; y de gran importancia en la comprensión del fenómeno de planeo. Savitsky estableció un procedimiento para calcular la fuerza de sustentación, resistencia al avance, y la estabilidad longitudinal de los cascos prismáticos en función de la velocidad, del ángulo de trim, del ángulo de astilla muerta y del peso de la embarcación. Para la elaboración del procedimiento, Savitsky desarrolló ecuaciones empírico-analíticas, que describen el fenómeno de planeo en cascos prismáticos (cascos con ángulo de astilla muerta y manga constantes a lo largo de la longitud de la embarcación), basadas en resultados de pruebas experimentales e investigaciones de otros autores. Savitsky dedujo las ecuaciones para cascos prismáticos como consecuencia del análisis realizado en una placa plana. En el trabajo, se propuso un proceso iterativo para estimar la resistencia al avance (R_T) y el ángulo de trim dinámico (τ), utilizando como criterio la estabilidad longitudinal para verificar los resultados obtenidos.

Diversas series de propulsores (o hélices) fueron elaboradas. Sin embargo, para la elaboración de esta tesis, las series de hélices Gawn y B (Wageningen) serán seleccionadas debido a su gran uso en la industria, de acuerdo a lo indicado por Molland et al. (2011) y Carlton (2012).

La serie B fue desarrollada por Bernitsas et al. (1981), en este artículo se publicaron las curvas de desempeño de los propulsores de la serie, siendo cada curva definida por las características geométricas del propulsor. Adicionalmente, los autores desarrollaron los polinomios característicos que describen las curvas de rendimiento la

serie, los cuales serán utilizados en la presente tesis debido a su accesible implementación. Por otro lado, la serie Gawn fue desarrollada por Gawn (1953), quien publicó los resultados de las pruebas realizadas con 37 propulsores de su serie, obteniendo valores para un amplio rango de la razón paso-diámetro (P/D). Análogamente a la serie B, cada propulsor es caracterizado por una curva de rendimiento única, dependiendo cada curva de una combinación específica de parámetros geométricos de la hélice. Blount & Hubble, Radojic, Khoushan e Kozhukharov propusieron sus propios polinomios para representar matemáticamente las curvas de la serie Gawn. Radojic et al. (2009) evaluaron los cuatro modelos matemáticos y determinaron que, para una operación sin cavitación, el polinomio establecido por Blount & Hubble (1981) es el más confiable para un rango específico de aplicación. Adicionalmente, según Molland et al. (2011) es recomendable utilizar la serie Gawn en embarcaciones de alta velocidad, patrulleras y ferris porque su diseño reduce el riesgo de cavitación.

El comportamiento hidrodinámico complejo y la operación en condiciones variables de navegación, de las embarcaciones de alta velocidad, fomentaron el desarrollo de investigaciones enfocadas en la influencia de estos factores en el rendimiento de la propulsión.

Un trabajo importante y precursor sobre el análisis del rendimiento propulsivo de embarcaciones de planeo fue el desarrollado por Hadler (1966), quien propuso un método para estimar la potencia en el eje y los coeficientes de propulsión (coeficiente de estela y coeficiente de reducción de empuje) en cascos prismáticos propulsados por hélices no cavitantes, instaladas en ejes inclinados. La metodología propuesta se basa en el equilibrio de las fuerzas hidrodinámicas y propulsivas. El método fue evaluado con dos cascos prismáticos, uno con fondo plano (ángulo de astilla muerta igual 0) y otro con ángulo de astilla muerta igual 9° , comparando los resultados con ensayos experimentales. A pesar que el método proporcionó resultados coherentes, apenas es aplicable para pequeños ángulos de astilla muerta, y constantes a lo largo del casco. En

la prueba experimental, un aumento de la potencia fue observado cuando el ángulo de inclinación del eje incrementa. Adicionalmente, se verificó que los coeficientes de propulsión varían en relación a la inclinación del eje.

Continuando con el análisis de la influencia del eje inclinado en la propulsión, Peck & Moore (1974) analizaron experimentalmente el desempeño de los propulsores cuando estos están sujetos a la inclinación del eje en altas velocidades. En el experimento, cuatro propulsores no cavitantes fueron utilizados, con diferentes razones de P/D, evaluándose en diferentes números de cavitación, coeficientes de carga y ángulos de inclinación del eje. El estudio mostró que el eje es afectado por fuerzas de sustentación y flexión debido a la inclinación del eje. Asimismo, un aumento de la cavitación fue observado cuando la inclinación del eje incrementa. Por lo tanto, la eficiencia y las fuerzas del propulsor (empuje y torque) son afectadas significativamente por la inclinación del eje.

Rutgersson (1981) evaluó, mediante un análisis analítico-experimental, los efectos de la cavitación, de la interacción casco-hélice, de la inclinación del eje y de la interacción entre los propulsores (cuando la embarcación tiene de dos a más propulsores) en el rendimiento del propulsor. A lo largo del estudio, se verificó que el riesgo de erosión en el propulsor aumenta debido a las altas presiones y a la influencia del casco en altas velocidades. Adicionalmente, el estudio demuestra que los efectos de la estela y la presión estática dependen de la inclinación del eje y de la embarcación. El análisis se realizó con seis propulsores supercavitantes, que fueron analizados en la popa de un casco de desplazamiento en altas velocidades.

Radojic (1991) elaboró un programa computacional para calcular el rendimiento hidrodinámico de embarcaciones de planeo. El programa se fundamenta en un modelo matemático, resultante del análisis de interacción entre la resistencia al avance y las fuerzas de propulsión de la embarcación. El modelo matemático fue sometido a una técnica de optimización no lineal, permitiendo que el algoritmo proporcione los

parámetros óptimos del casco y del propulsor. No obstante, el programa apenas fue elaborado para el régimen de planeo.

Debido a la influencia del ángulo de trim y de la inclinación del eje en el rendimiento propulsivo de embarcaciones de planeo, surgieron los “*flaps*” (o aletas) instaladas en popa, consiguiendo que la embarcación opere en su ángulo de trim óptimo. Jensen & Latorre (1992) analizaron los efectos de los flaps sobre el rendimiento operacional de las embarcaciones. Para el estudio desarrollaron un programa computacional, en el que se utilizó el método de Savitsky (1964) y la formulación proporcionada por Savitsky & Brown (1976), la cual describe el efecto de los flaps en el rendimiento de los cascos de planeo. Los autores evaluaron la metodología con dos embarcaciones de alta velocidad, mostrando que, para una cierta velocidad, la potencia requerida será mínima para una combinación específica de ángulo de trim y un ángulo de flap. Si uno de estos ángulos varía, habrá un aumento de la potencia.

El procedimiento de cálculo para estimar los parámetros hidrodinámicos y propulsivos de las embarcaciones puede ser complejo, por eso, es importante el desarrollo de algoritmos computacionales. Bate (1994) desarrolló una herramienta computacional que calcula el desempeño de las embarcaciones de alta velocidad a través de métodos empíricos, empleando también el método de Savitsky. La metodología establecida consideró flaps, apéndices y condiciones ambientales irregulares, estimando el desempeño hidrodinámico con alta precisión. A pesar que el programa calculó eficientemente el desempeño hidrodinámico, el cálculo del desempeño propulsivo no proporcionó buenos resultados. Bate no consideró los efectos de la interacción casco-propulsor, de la cavitación y tampoco del propulsor para estimar la potencia en el eje, considerando apenas un coeficiente total de propulsión constante ($\text{Potencia efectiva/Potencia BHP}=\text{constante}$), generando errores considerables en el cálculo del rendimiento propulsivo.

Otro procedimiento computacional fue desarrollado por Moody (1996). El programa tuvo como objetivo predecir la potencia requerida por la embarcación en la

fase de diseño del proyecto. La metodología aplicada fue el resultado de la evaluación y de la comparación de los diversos métodos que permiten calcular los factores de propulsión, seleccionando el método de Holtrop para el cálculo de la resistencia y de los coeficientes propulsivos; y la serie B para estimar los parámetros de la hélice. Adicionalmente, para una alta precisión en el cálculo de la potencia, el programa incluye factores como la resistencia por apéndices, por incrustaciones en el casco (*fouling*), rugosidad en el casco y condiciones ambientales. Las desventajas del programa fueron: emplear un único método de cálculo de potencia para cualquier tipo de embarcación, y no considerar la variación del trim, la inclinación del eje y el efecto de la cavitación para embarcaciones de alta velocidad, generando resultados inconsistentes en este tipo de embarcaciones.

Blount & Bartee (1997) propusieron un método para seleccionar óptimamente el sistema de propulsión en embarcaciones de alta velocidad, proporcionando requisitos para seleccionar un propulsor con bajo riesgo de erosión. Durante el estudio, analizaron el comportamiento de la potencia y de las revoluciones del motor (BHP y RPM respectivamente), observando que la hélice demanda mayor potencia cuando opera en el régimen de semi-planeo, que en su velocidad máxima. Por este motivo, recomendaron un análisis más detallado de BHP e RPM, contrastando la curva de potencia del motor con la curva de potencia del propulsor para verificar si el sistema satisface los requerimientos de operación.

Un software que evalúa detalladamente todos los factores que afectan a la propulsión y proporciona el comportamiento de la potencia y las RPM del motor es el *SwiftCraft*, el cual fue desarrollado por MacPherson (2004), considerando a la resistencia al avance y al empuje del propulsor en función de la velocidad. A diferencia, de los otros programas computacionales, el software permite al usuario escoger el método más adecuado para un caso de estudio específico, permitiendo que el análisis y la estimación del rendimiento propulsivo sean más confiables para cualquier tipo de embarcación. Una recomendación importante del autor fue seleccionar cuidadosamente

los métodos, para estimar la resistencia al avance y los parámetros de la propulsión, en cada caso.

Las embarcaciones están expuestas a las variaciones de sus condiciones de navegación, sea por causa del comportamiento hidrodinámico o por las condiciones de carga. Por esta razón, surgieron investigaciones enfocadas en evaluar los efectos de las condiciones de navegación en el rendimiento propulsivo. Ichinose et al. (2012) evaluaron el efecto de la variación del calado en el rendimiento propulsivo de un barco granelero y el decrecimiento de la velocidad cuando la embarcación opera en climas adversos. La variación del calado fue causada por las condiciones de carga y lastre de la embarcación. El método propuesto por los autores fue basado en un estudio analítico-experimental. Ichinose et al. determinaron que una variación considerable en el calado puede generar pérdidas de hasta el 25% de potencia y significativas pérdidas de velocidad. Si bien el estudio fue realizado en una embarcación de desplazamiento, las embarcaciones de alta velocidad también están sujetas a frecuentes variaciones de calado.

Otra condición de navegación que debe tenerse en cuenta es la operación del propulsor en flujo oblicuo. Dubbioso et al. (2013) analizaron el rendimiento del propulsor operando en flujo oblicuo, efecto que puede ser producido por las maniobras realizadas en la embarcación. Los autores propusieron un cálculo por análisis numérico basado en las ecuaciones de Navier-Stokes, validando el procedimiento con datos experimentales obtenidos en ensayos de aguas abiertas. En el estudio fue observado que la eficiencia y los coeficientes de empuje y torque del propulsor (η_o , K_T y K_Q respectivamente) decrecen con el aumento del ángulo de incidencia del flujo en el propulsor.

Taskar et al. (2016) examinaron la influencia de las olas en el rendimiento del sistema de propulsión. En el análisis, el comportamiento propulsivo fue evaluado en diferentes condiciones de ola, utilizando solo olas regulares. El estudio demostró que las olas afectan considerablemente a la estela, generando oscilaciones en el empuje desarrollado por el propulsor. Adicionalmente, los autores determinaron que la eficiencia

propulsiva y la velocidad de navegación sufren alteraciones significativas debido a las olas.

Superar las adversidades que afectan el rendimiento propulsivo de las embarcaciones de alta velocidad, para alcanzar la velocidad deseada, motivó el desarrollo de técnicas de optimización para seleccionar el propulsor que tenga eficiencia máxima y cavitación mínima. Gaggero et al. (2017) desarrollaron un programa de optimización numérica, fundamentado en la combinación del método de elementos de contorno (BEM) con el análisis RANSE (o RANS), que define el propulsor ideal (cavitación mínima y eficiencia máxima) para una condición específica de operación de la embarcación. El procedimiento fue evaluado y validado con datos obtenidos en ensayos realizados en un túnel de cavitación y prueba de navegación.

1.2 Identificación y descripción del problema de estudio

A través de los años, el rendimiento propulsivo de las embarcaciones ha sido una preocupación para los armadores, tanto en la etapa de diseño como en la operación del mismo. Una embarcación que presenta un rendimiento ineficiente, tendrá mayores costos operacionales y, a su vez, su capacidad operacional no será la adecuada.

Un sistema propulsivo de baja eficiencia genera mayores volúmenes de gases contaminantes (NO_x , CO_2 , etc.), afectando el medio ambiente. Por este motivo, en 2011, en convenio MARPOL, se establecieron medidas técnicas y operacionales en el área de eficiencia energética para reducir la contaminación producida por los buques. Como resultado de estas medidas, el índice de eficiencia energética de diseño (EEDI) y el índice operacional de eficiencia energética (EEOI) fueron establecidos por la International Maritime Organization (s.f.). Estos índices permiten evaluar si el diseño o la operación de la embarcación son eficientes desde punto de vista energético. Un sistema propulsivo ineficiente también produce pérdidas económicas debido al mayor consumo de combustible generado. Por esta razón, la disminución del consumo de combustible siempre será buscada por el armador. Alcanzando este objetivo, el armador

conseguirá una reducción de los costos operacionales. Asimismo, de los sistemas instalados en la embarcación, el sistema propulsivo es el que más impacta en los costos operacionales; según lo indicado por Pinto (1995).

Otro factor importante, para el armador, es que la capacidad operacional de la embarcación no se vea afectada. En algunos tipos de embarcaciones, la capacidad operacional se refiere a la producción de empuje, requerido para un trabajo específico, comúnmente necesario en embarcaciones de apoyo logístico como los remolcadores y empujadores. En otros es la capacidad de transportar carga (barcos graneleros, petroleros, gaseros, etc.) y, en el caso de las embarcaciones de alta velocidad (o alto desempeño) es alcanzar la velocidad de diseño.

Desde el punto de vista hidrodinámico, si, en la velocidad máxima de operación (o velocidad de diseño, V_S), la embarcación alcanza un número de Froude ($Fn = V_S/\sqrt{g \cdot L_{wl}}$) mayor que 0.40, la embarcación se considera de alta velocidad; según Faltinsen (2005). Un aumento del Fn indica que las fuerzas de inercia están alcanzando mayor impacto en el fluido que las fuerzas gravitacionales. Por consiguiente, cuando la embarcación supera los límites de Fn mencionados, una fuerza hidrodinámica comienza a aparecer, que, sumada al empuje hidrostático de la embarcación, soportan el peso de la misma. También, existen embarcaciones de alto desempeño que, en lugar de la fuerza hidrodinámica, generan una fuerza aerostática para sustentar el peso. Por lo tanto, una característica de la embarcación de alta velocidad es la existencia de una fuerza de sustentación, adicional al empuje hidrostático.

Según Faltinsen (2005), las embarcaciones de alta velocidad pueden clasificarse, según la forma en la cual son sustentadas, como:

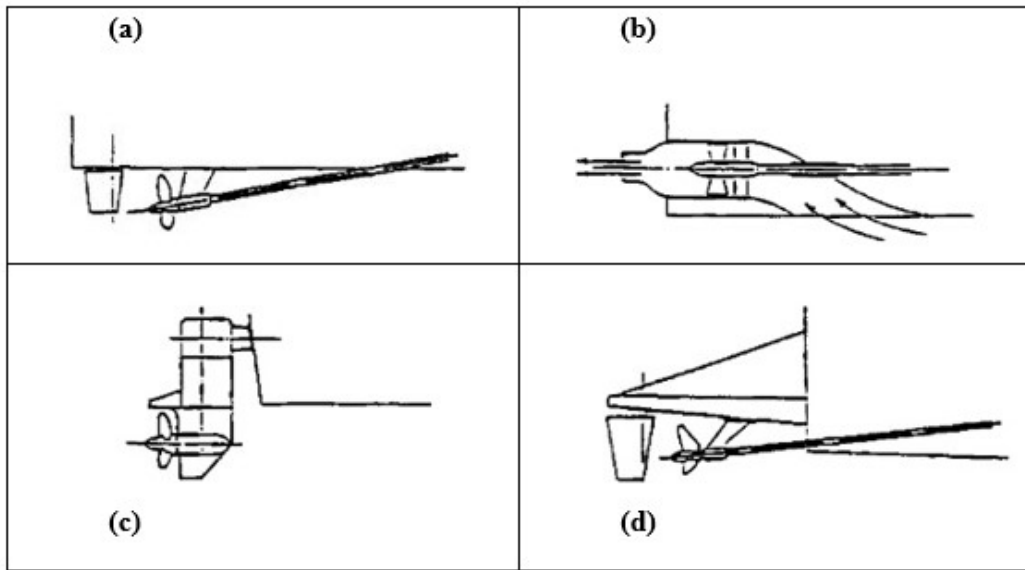
- Cascos inmersos (monocascos, SWATHs, catamaranes, etc.).
- Cascos sustentados por hidroalas (*hydrofoils*).
- Cascos sustentados por aire (SES, ACV, WIG, etc.).
- Alguna combinación de los mencionados arriba.

Dentro de los cascos inmersos encontramos los cascos planeadores, también llamados cascos de planeo, y los cascos de semi-planeo (o semidesplazamiento). La ocurrencia del fenómeno de planeo, en este tipo de embarcaciones, se debe al surgimiento de la fuerza hidrodinámica cuando la embarcación excede el límite del régimen de desplazamiento. No obstante, antes de operar en el régimen de planeo, la embarcación atraviesa un régimen de transición llamado semi-planeo. A partir del momento en el cual el casco de alta velocidad cruza el límite del régimen de desplazamiento, su equilibrio dinámico comienza a variar, afectando sus condiciones de navegación (calado, trim, superficie mojada, etc.). Para identificar el momento en el cual estas embarcaciones comienzan a planear, se utilizan el número de Froude (F_n) o el número de Taylor (Q_t). Estos coeficientes indican en qué régimen hidrodinámico está operando la embarcación.

Las variaciones de la condición de navegación, las altas velocidades de flujo en el propulsor y la variación de presión afectan la eficiencia del propulsor, incrementando, también, el riesgo de cavitación. En el peor de los casos el propulsor puede estar expuesto al fenómeno de emersión (parte de la hélice fuera del agua). Por esta razón, un análisis detallado del sistema propulsivo del casco de alta velocidad es necesario para mejorar el desempeño propulsivo, a fin de que la embarcación alcance la velocidad deseada.

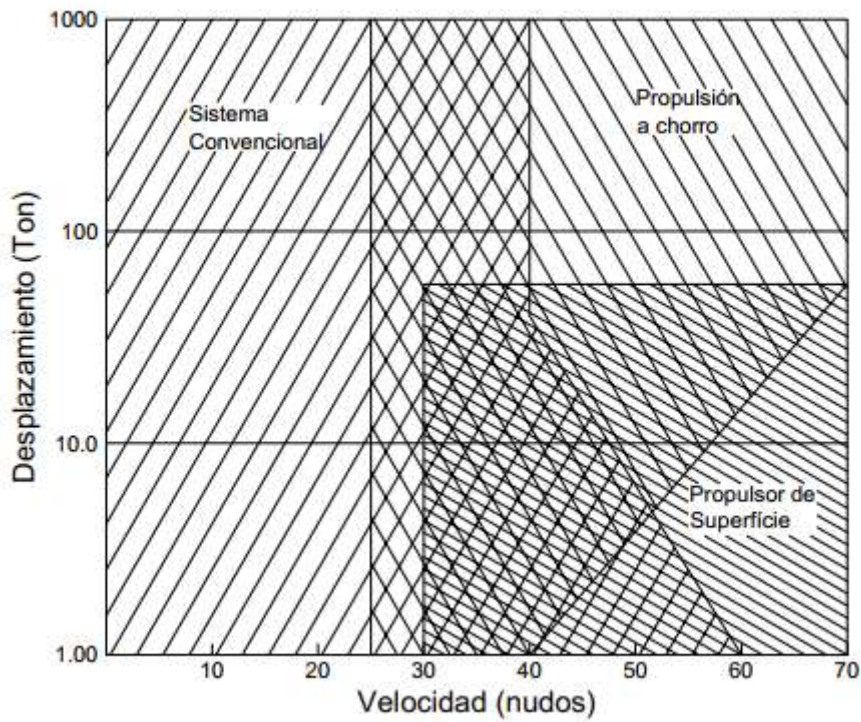
Para que este tipo de embarcaciones alcancen y operen en la velocidad de diseño, surgieron diferentes sistemas de propulsión que lidian con el comportamiento hidrodinámico complejo, al que la embarcación está expuesta (ver Figura 1.1). El sistema más utilizado es el sistema convencional con eje inclinado (Figura 1.1-a), para embarcaciones que operan con velocidades menores a 30 nudos (kn), según lo indicado por Blount & Bartee (1997). En la Figura 1.2, se presenta una tendencia del uso de los sistemas propulsivos para cascos planeadores, desde el punto de vista de la velocidad y del peso de la embarcación.

Figura 1.1
Tipos de sistemas de Propulsión



Nota: Imagen (a): Sistema convencional con eje inclinado. Imagen (b): Propulsión a chorro de agua. Imagen (c): Propulsión con motor fuera de borda. Imagen (d): Propulsor semisumergido o de superficie. Fuente Faltinsen (2005).

Figura 1.2
Tendencia de Uso de los Sistemas de Propulsión



Fuente: Blount & Bartee (1997).

Debido a las características hidrodinámicas y propulsivas, mencionadas anteriormente, el análisis completo del sistema casco-propulsor-motor es de gran importancia en los cascos de alta velocidad.

Con el fin de optimizar la forma del casco, surgieron diferentes series, cada una destinada a una función específica, pero con el mismo objetivo de operar en altas velocidades. Junto con las series de casco, varios métodos para estimar la resistencia al avance fueron propuestos, incluyendo ensayos en canal hidrodinámico, procedimientos analíticos, datos experimentales de series de cascos y análisis de regresión con los valores obtenidos en las pruebas con modelos.

Semejante a la optimización del casco, varias series de hélices fueron desarrolladas para sistemas convencionales, las cuales han evolucionado con el tiempo. La motivación detrás del desarrollo de estas series es la operación eficiente del propulsor en altas velocidades y en cavitación. Para estimar los parámetros operacionales de cada serie de hélices, se desarrollaron modelos matemáticos y gráficos que describen su desempeño.

Un adecuado análisis del rendimiento propulsivo se obtiene con el estudio integrado del sistema casco-propulsor-motor, porque se consideran los efectos entre cada componente del sistema. Por este motivo, varias investigaciones orientadas a mejorar la eficiencia propulsiva se realizaron considerando el sistema integrado. Por otro lado, proyectar y analizar el sistema de propulsión motivó el desarrollo de algunos softwares, con el fin de optimizar la selección de un sistema propulsivo que permita operar en las condiciones deseadas. Sin embargo, aún hay un amplio campo por explorar sobre el rendimiento propulsivo de los cascos de planeo. Adicionalmente, deben desarrollarse nuevas metodologías para un mejor análisis, que, a su vez, permitan determinar con mayor precisión la potencia requerida.

1.3 Formulación del problema

Del apartado anterior (subcapítulo 1.2), se deduce que la estimación del desempeño propulsivo en embarcaciones de alta velocidad debe ser diferente a las de desplazamiento. Esto se debe a la diferencia de comportamientos hidrodinámicos y propulsivos entre ambos tipos de embarcaciones. Por otro lado, la importancia, por parte de la industria, de simplificar los cálculos para estimar con alta precisión los parámetros propulsivos conlleva a proponer o mejorar metodologías computacionales.

Por lo anterior expuesto, se plantean los siguientes problemas (general y específico) a modo de pregunta.

1.3.1 Problema principal

¿Cómo determinar el desempeño propulsivo de las embarcaciones de alta velocidad, considerando su comportamiento hidrodinámico, a fin de mejorar el rendimiento propulsivo de este tipo de embarcaciones?

1.3.2 Problemas específicos

- ¿Cómo se desempeña el propulsor, desde el punto de vista energético, cuando la embarcación opera en un régimen hidrodinámico de alta velocidad?
- ¿Cuál es la influencia del comportamiento hidrodinámico en el desempeño propulsivo cuando la embarcación opera en altas velocidades?
- ¿De qué manera se puede estimar el desempeño propulsivo de una embarcación de alta velocidad, a fin de obtener datos precisos que permitan determinar un sistema de propulsión óptimo?

1.4 Justificación e importancia

Las embarcaciones de alta velocidad son comúnmente utilizadas en el transporte de personal, transporte de prácticos y actividades de cabotaje; siendo

empleadas en operaciones marítimas y fluviales. Por esta razón, se utilizan frecuentemente en actividades portuarias, la industria offshore y apoyo logístico. Por otro lado, el comportamiento hidrodinámico de este tipo de embarcaciones es diferente al comportamiento de las embarcaciones de desplazamiento, debido a que operan a altas velocidades, lo que puede afectar el desempeño propulsivo.

De lo expuesto, se justifica la necesidad de realizar un estudio que permita comprender el desempeño propulsivo de las embarcaciones, cuando operan en altas velocidades. Comprender el desempeño propulsivo permitirá optimizar y diseñar sistemas de propulsión con indicadores de eficiencia energética adecuados.

Para determinar el desempeño propulsivo de las embarcaciones de alta velocidad, es necesario comprender su desempeño hidrodinámico. A diferencia de las embarcaciones de desplazamiento, cuando este tipo de embarcaciones opera en altas velocidades, se desarrolla presión hidrodinámica que actúa en el fondo del casco, la cual genera una fuerza de sustentación hidrodinámica. Esta fuerza provoca variaciones en el equilibrio dinámico, encontrándose diferentes condiciones de navegación (trim, calado, etc.) para cada velocidad de operación.

Por otro lado, la variación del equilibrio dinámico produce cambios en el ángulo de trim y en el calado, provocando variaciones en la profundidad del propulsor. Esta variación afecta la eficiencia del propulsor y puede aumentar el riesgo de cavitación (en caso la profundidad del propulsor disminuya), causando daños estructurales y también la reducción de la eficiencia de la hélice. Además, la inclinación del eje (comúnmente vista en este tipo de embarcaciones) sumada al trim genera que el flujo de agua que llega al propulsor no sea aprovechado eficientemente y que apenas una parte del empuje generado por el propulsor sea destinada al desplazamiento de la embarcación, provocando una disminución de la eficiencia propulsiva.

Debido a las características hidrodinámicas complejas de las embarcaciones de alta velocidad, varias investigaciones, enfocadas en el desempeño hidrodinámico de este tipo de embarcaciones, fueron realizadas. Uno de los estudios más importantes

sobre estas embarcaciones es el realizado por Savitsky, cuyo foco de estudio son los cascos planeadores. A pesar de la antigüedad del método, aún es útil para estimar el equilibrio dinámico y resistencia al avance en los cascos planeadores.

Además del método de Savitsky, se han desarrollado varios *softwares* que calculan y evalúan la resistencia y el equilibrio dinámico de embarcaciones de alta velocidad, logrando estimar estos factores con alta precisión. La mayoría de estos utilizan métodos estadísticos para calcular la resistencia. Entre estos *softwares* se encuentran *Maxsurf Resistance*, el *SwiftCraft*, *Autopower*, *Orca3D* y el *EqDin*.

El *Maxsurf Resistance* es un software comercial que calcula la resistencia en cascos de desplazamiento y de alta velocidad. Este *software* posee varios métodos para estimar la resistencia dependiendo del tipo de casco; sin embargo, este *software* no evalúa el sistema de propulsión de la embarcación.

El *Autopower* permite estimar la potencia BHP y las revoluciones requeridas por el propulsor. No obstante, este apenas utiliza el método de Compton para calcular la resistencia en cascos de semi-planeo. Además, para evaluar la propulsión, este *software* calcula los coeficientes de la interacción casco-hélice utilizando métodos para cascos de desplazamiento, lo que puede generar errores en el cálculo de la propulsión. Por otra parte, los niveles de cavitación no son evaluados por el *software*.

El *SwiftCraft* posee diferentes métodos para calcular la resistencia en cascos de desplazamiento, semi-planeo y planeo. También contiene métodos para estimar los coeficientes de la interacción casco-hélice para cada tipo de embarcación. Adicionalmente, este *software* permite escoger entre dos tipos de propulsores (Gawn y Serie B), evaluando también los niveles de cavitación. Debido a estas características este *software* es confiable para estimar el desempeño propulsivo. No obstante, este *software* no muestra el comportamiento de la potencia BHP y la eficiencia propulsiva en relación a la velocidad.

Por lo anteriormente expuesto, el presente trabajo desarrolla un algoritmo que permite estimar la potencia BHP, la eficiencia propulsiva y los niveles de cavitación en

embarcaciones de planeo para bajas y altas velocidades ($F_n \leq 0.40$ y $F_n \geq 0.40$, respectivamente), utilizando únicamente los datos geométricos del casco y del propulsor. Este algoritmo es desarrollado para cascos de planeo con dos sistemas de propulsión convencionales.

Adicionalmente, la herramienta computacional desarrollada mostrará la razón de áreas (BAR) mínima, para evitar cavitación; y la variación de la curva de carga (BHP-RPS) de la hélice en relación a la razón paso-diámetro (P/D), el diámetro y la razón de áreas (BAR), permitiendo seleccionar el propulsor óptimo.

El comportamiento de la potencia BHP, de la eficiencia propulsiva e de los niveles de cavitación, en relación a la velocidad, es mostrado en gráficos por el algoritmo. Esto permite identificar el rango de velocidades, o régimen hidrodinámico, en el cual la embarcación es más eficiente o menos eficiente desde el punto de vista propulsivo, y si la hélice está trabajando sin riesgo de cavitación. Este análisis es importante en este tipo de embarcaciones, dado que presentan características hidrodinámicas particulares.

La presente propuesta, lejos de competir con los programas más avanzados, es presentar un algoritmo que determine el desempeño propulsivo de embarcaciones de planeo. Este trabajo es académico, por lo tanto, puede ser mejorado e innovado. Por otra parte, un propósito de este trabajo es contribuir al desarrollo de herramientas computacionales enfocadas en este campo de estudio.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Optimizar el sistema de propulsión de embarcaciones de alta velocidad, implementando un algoritmo que permite calcular y analizar con alta precisión el desempeño propulsivo de este tipo de embarcaciones.

1.5.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el desempeño del propulsor en regímenes de alta velocidad, utilizando una metodología de cálculo que considere los efectos hidrodinámicos generados al operar en estos regímenes.
- Caracterizar el desempeño propulsivo de la embarcación cuando opera en altas velocidades, implementando una metodología de cálculo que considere la variación de las condiciones de navegación en altas velocidades.
- Implementar un algoritmo que permita estimar con precisión el desempeño propulsivo, considerando el comportamiento hidrodinámico de los cascos de planeo y realice un análisis integral del sistema casco-hélice-motor.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis general

Considerar el comportamiento hidrodinámico en la estimación del desempeño propulsivo de las embarcaciones de alta velocidad reducirá los errores de cálculo, permitiendo optimizar el sistema de propulsión de este tipo de embarcaciones.

1.6.2 Hipótesis específicas

- La operación de la embarcación en altas velocidades afecta considerablemente al desempeño de la hélice, pudiendo generar la disminución de su eficiencia y aumento de los niveles de cavitación.
- Variaciones en factores del desempeño hidrodinámico, como la resistencia, coeficientes casco-hélice y condiciones de navegación, afectan considerablemente al desempeño propulsivo de los cascos de alta velocidad.

- La implementación de una metodología de cálculo a través de un algoritmo, considerando el comportamiento hidrodinámico de los cascos de alta velocidad, permitirá obtener datos precisos del desempeño propulsivo. Esto facilitará la tarea de optimizar el sistema de propulsión (convencional) de las embarcaciones de alta velocidad.

1.7 Variables y operacionalización de variables

1.7.1 Variables

El presente trabajo estudia y analiza a cuatro variables, una variable dependiente y tres variables independientes, que son descritas a continuación.

- Variable dependiente:
Optimización del sistema de propulsión en embarcaciones de alta velocidad. Consiste en mejorar el rendimiento y eficiencia del sistema de propulsión de la embarcación, disminuyendo el consumo de combustible sin afectar su capacidad operacional. Por otro lado, se puede definir como el aumento de la eficiencia propulsiva al realizar una modificación en el sistema.
- Variables independientes:
Desempeño de la hélice. Capacidad de operación de la hélice que le permite transformar la energía entregada (DHP) en energía necesaria para vencer la resistencia al avance de la embarcación, operando a una determinada velocidad. También, se puede definir como el empuje desarrollado por la hélice sometida a determinados niveles de cavitación, utilizando una parte de la energía entregada (DHP).
Desempeño propulsivo de la embarcación. Capacidad de la nave de desplazarse a una determinada velocidad venciendo la resistencia del agua, empleando la transformación de energía. Adicionalmente, se

puede definir como la potencia (EHP, BHP, etc.) y eficiencia generada por el sistema de propulsión.

Algoritmo de cálculo de desempeño propulsivo y del propulsor. Metodología de cálculo implementada en un algoritmo, la cual considera el comportamiento hidrodinámico de la embarcación para estimar el desempeño propulsivo y el desempeño del propulsor, cuando la embarcación opera en altas velocidades. A su vez, se define como un algoritmo capaz de calcular la potencia al freno (BHP), eficiencia propulsiva, eficiencia de la hélice, carga de la hélice y cavitación, obteniendo resultados confiables.

1.7.2 Operacionalización de variables

En referencia a las secciones anteriores, donde se determina la definición, dimensiones e indicadores de cada variable, se procede a la operacionalización de las variables, la cual se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1
Matriz de Operacionalización de Variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Dependiente: Optimización del sistema de propulsión en embarcaciones de alta velocidad	Consiste en mejorar el rendimiento y eficiencia del sistema de propulsión de la embarcación, disminuyendo el consumo de combustible sin afectar su capacidad operacional.	Aumento de la eficiencia propulsiva al realizar una modificación en el sistema	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de la eficiencia propulsiva. • Reducción de la carga requerida 	<ul style="list-style-type: none"> • Factor de incremento de eficiencia (%). • Grafica de carga inicial y grafica de carga con mejoras
Independientes: Desempeño de la hélice	Capacidad de operación de la hélice que le permite transformar la energía entregada (DHP) en energía necesaria para vencer la resistencia al avance de la embarcación, operando a una determinada velocidad.	Empuje desarrollado por la hélice sometida a determinados niveles de cavitación, utilizando una parte de la energía entregada (DHP).	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia de la hélice. • Torque de la hélice. • Velocidad de la hélice. • Nivel de cavitación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ratio EHP/DHP. • Torque requerido (KN-m). • Rotación en la hélice (RPS). • Coeficientes de Cavitación.
Desempeño propulsivo de la embarcación	Capacidad de la nave de desplazarse a una determinada velocidad venciendo la resistencia del agua, empleando la transformación de energía.	Potencia (EHP, BHP, etc.) y eficiencia generada por el sistema de propulsión.	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia del sistema de propulsión. • Potencia al freno requerida. • Velocidad de operación. • Parámetros de desempeño del propulsor. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ratio EHP/BHP. • Potencia (HP). • Velocidad (nudos).
Algoritmo de cálculo de desempeño propulsivo y del propulsor	Metodología de cálculo implementada en un algoritmo, la cual considera el comportamiento hidrodinámico de la embarcación para estimar el desempeño propulsivo y el desempeño del propulsor, cuando la embarcación opera en altas velocidades.	Algoritmo capaz de calcular la potencia al freno BHP, eficiencia propulsiva, eficiencia de la hélice, carga de la hélice y cavitación, obteniendo resultados confiables.		<ul style="list-style-type: none"> • Precisión del algoritmo en el cálculo de parámetros del desempeño de la hélice usando como referencia datos experimentales.

1.8 Metodología de la investigación

Esta sección definirá la unidad de análisis, el tipo de investigación, el enfoque, el nivel de investigación y el diseño de la presente investigación. Estas características de la tesis se basan en los problemas, objetivos, hipótesis y variables definidas en la tesis. En el ANEXO C, se presenta la matriz de consistencia, la cual relaciona estos factores de manera práctica y entendible.

1.8.1 Unidad de análisis

La unidad de análisis de la presente investigación es evaluar el desempeño propulsivo de las embarcaciones de alta velocidad, verificando la influencia del comportamiento hidrodinámico en este tipo de embarcaciones. Para realizar este análisis es necesario determinar el desempeño propulsivo y el desempeño de la hélice cuando la embarcación opera en altas velocidades. Además, se implementará una metodología de cálculo mediante un algoritmo que permita estimar los parámetros mencionados. La precisión del algoritmo, la estimación de los parámetros del desempeño propulsivo de la embarcación y la caracterización del desempeño de la hélice permitirán analizar y optimizar el sistema de propulsión de las embarcaciones cuando operan en altas velocidades. El estudio de esta unidad de análisis es esencial para comprender la relación entre las variables dependientes e independientes del presente trabajo.

1.8.2 Tipo, enfoque y nivel de investigación

La presente tesis presenta una investigación de tipo aplicada debido a que el objetivo principal del estudio es optimizar el desempeño propulsivo de las embarcaciones de alta velocidad, permitiendo aplicar mejoras al sistema de propulsión de este tipo buques, lo cual conllevaría a aumentar el rendimiento.

Por otro lado, el enfoque de la tesis es de carácter cuantitativo debido a que se calculará y analizará datos numéricos como son los parámetros del desempeño propulsivo de la embarcación y parámetros del desempeño del propulsor, a fin de comprender la

influencia del comportamiento hidrodinámico en altas velocidades en el rendimiento propulsivo.

Para alcanzar el objetivo principal que es optimizar el sistema de propulsión de las embarcaciones de alta velocidad, es necesario describir el comportamiento del desempeño propulsivo de estas embarcaciones y cómo afecta los factores hidrodinámicos al rendimiento de la embarcación, a fin de realizar mejoras en su sistema. Por esta razón, la presente tesis tiene un nivel de investigación descriptivo.

1.8.3 *Diseño de la investigación*

El diseño de investigación es no experimental debido a que se estudia el fenómeno causado en el desempeño propulsivo cuando la embarcación opera en altas velocidades, a partir de comprender este comportamiento se pueden plantear mejoras al sistema de propulsión.

1.8.4 *Técnicas e instrumentos de recolección de datos*

Como se planteó en los objetivos, parte de la tesis consiste en validar un algoritmo de cálculo, razón por la cual, se necesitó de datos reales adquiridos en prueba de navegación, a fin de comparar los resultados del algoritmo con valores reales.

En la prueba de navegación se midió el torque, la rotación y la potencia (DHP) en diferentes. Para medir el torque en el eje, un sistema de medición para cada eje de propulsión fue instalado. Este sistema consiste en dos extensómetros, un dispositivo de telemetría, una placa de adquisición de señales y un *software* de procesamiento y análisis de señales.

Para la medición de la rotación del eje, se instaló un sensor óptico. Las señales adquiridas por el sensor son filtradas y transferidas al computador en revoluciones por segundo.

Por otra parte, para el desarrollo del algoritmo se utilizó el software LabVIEW, el cual permite automatizar los cálculos y la pantalla de interacción con el usuario el amigable.

CAPITULO II

Marco Teórico y Conceptual

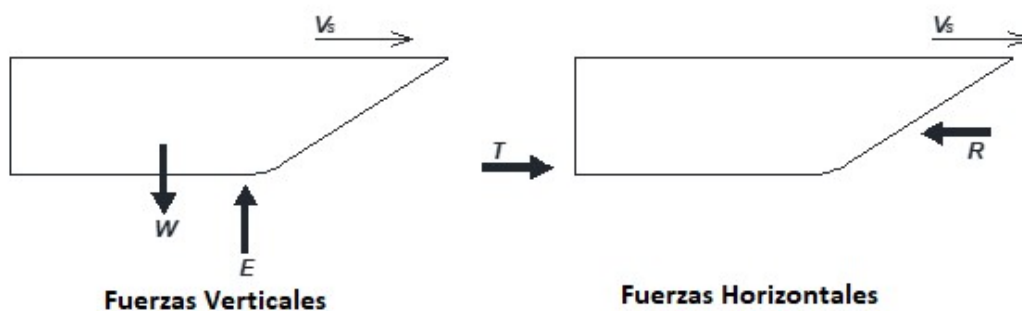
2.1 Desempeño hidrodinámico de las embarcaciones de alta velocidad

A diferencia de las embarcaciones de desplazamiento, las embarcaciones de alta velocidad son diseñadas para operar en mayores velocidades. Con el objetivo de alcanzar altas velocidades, las embarcaciones de este tipo deben superar las limitaciones hidrodinámicas que surgen en el camino, principalmente la limitación encontrada en la transición del régimen de desplazamiento al de planeo.

En el régimen de desplazamiento, el equilibrio longitudinal de la embarcación es representado por las fuerzas de empuje hidrostático (E), resistencia al avance (R_T), peso de la embarcación (W) y el empuje del propulsor (T). La Figura 2.1 muestra que las únicas fuerzas en la dirección vertical son E y W , pero, en sentidos contrarios para mantener el equilibrio ($W = E$).

Figura 2.1

Diagrama de Cuerpo Libre en el Régimen de Desplazamiento



Sin embargo, en las velocidades cercanas al límite superior del régimen de desplazamiento, comienza a aparecer una fuerza adicional de origen hidrodinámico. Esta fuerza es insignificante en comparación a E o a W , en ese rango de operación.

Cuando la embarcación atraviesa la barrera de desplazamiento, al alcanzar mayores velocidades, la presión hidrodinámica que actúa en el fondo del casco comienza a ser significativa, generando una fuerza hidrodinámica normal a la superficie del fondo del

casco (N). Esta fuerza es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad de la embarcación, según Savitsky (1964). Por consiguiente, en el régimen de semi-planeo, el peso del casco no es solo sustentado por el empuje hidrostático; la componente vertical de la fuerza N (N_V) también sustentará el peso del casco. En el rango de planeo, el empuje hidrostático comienza a desaparecer, por lo tanto, la fuerza N_V será prácticamente la única que sustente el peso de la embarcación.

Por otra parte, debido al desplazamiento del centro de presión donde actúa la fuerza hidrodinámica, el equilibrio dinámico varía en relación con la velocidad, generando variaciones de trim y calado durante la navegación. Inicialmente, el ángulo de trim dinámico (τ) comienza a aumentar cuando el casco comienza a planear, sin embargo, este puede disminuir o aumentar cuando la embarcación alcanza mayores velocidades debido al desplazamiento del centro de presión a lo largo del fondo del casco.

No obstante, a pesar de disminuir el calado medio, debido al efecto de la sustentación hidrodinámica, el calado en la popa (T_{pp}) aumenta cuando el τ incrementa y viceversa. Si el casco alcanza la condición de planeo completamente desarrollado, caracterizada por tener la popa y los costados secos, el T_{pp} disminuirá considerablemente por causa del dominio de la sustentación hidrodinámica (N). Es importante considerar las variaciones de T_{pp} debido a su influencia en el desempeño de la hélice.

Por lo expuesto, una dependencia de las características hidrodinámicas en relación a la velocidad es observada.

Un modo práctico de identificar los regímenes hidrodinámicos (desplazamiento, semiplaneo y planeo) es a través del número de Froude (Fn). Según Faltinsen (2005), la embarcación es considerada de alta velocidad cuando $Fn > 0.40$, a partir de ese valor el casco comienza a planear. Ribeiro (2002) considera que un casco alcanza la condición de planeo completamente desarrollado cuando $Fn > 0.89$, porque la interferencia de las olas siempre será destructiva a partir de esa velocidad, disminuyendo la resistencia por formación de olas. Por lo tanto, los límites de los regímenes son:

- Desplazamiento: $Fn < 0.40$.
- Semiplaneo: $0.40 \leq Fn < 0.89$.
- Planeo: $Fn \geq 0.89$.

Otro número adimensional, utilizado para definir estos tres regímenes hidrodinámicos, es el coeficiente de Taylor, que es representado por $Q_t = V_S / \sqrt{L_{wl}}$, donde, la unidad de la velocidad son los nudos (kn o kt) y la eslora está en pies (ft). Este coeficiente también puede ser calculado utilizando el Fn mediante la expresión $Q_t = 3.355 \cdot Fn$. el coeficiente de Taylor divide a los tres regímenes en:

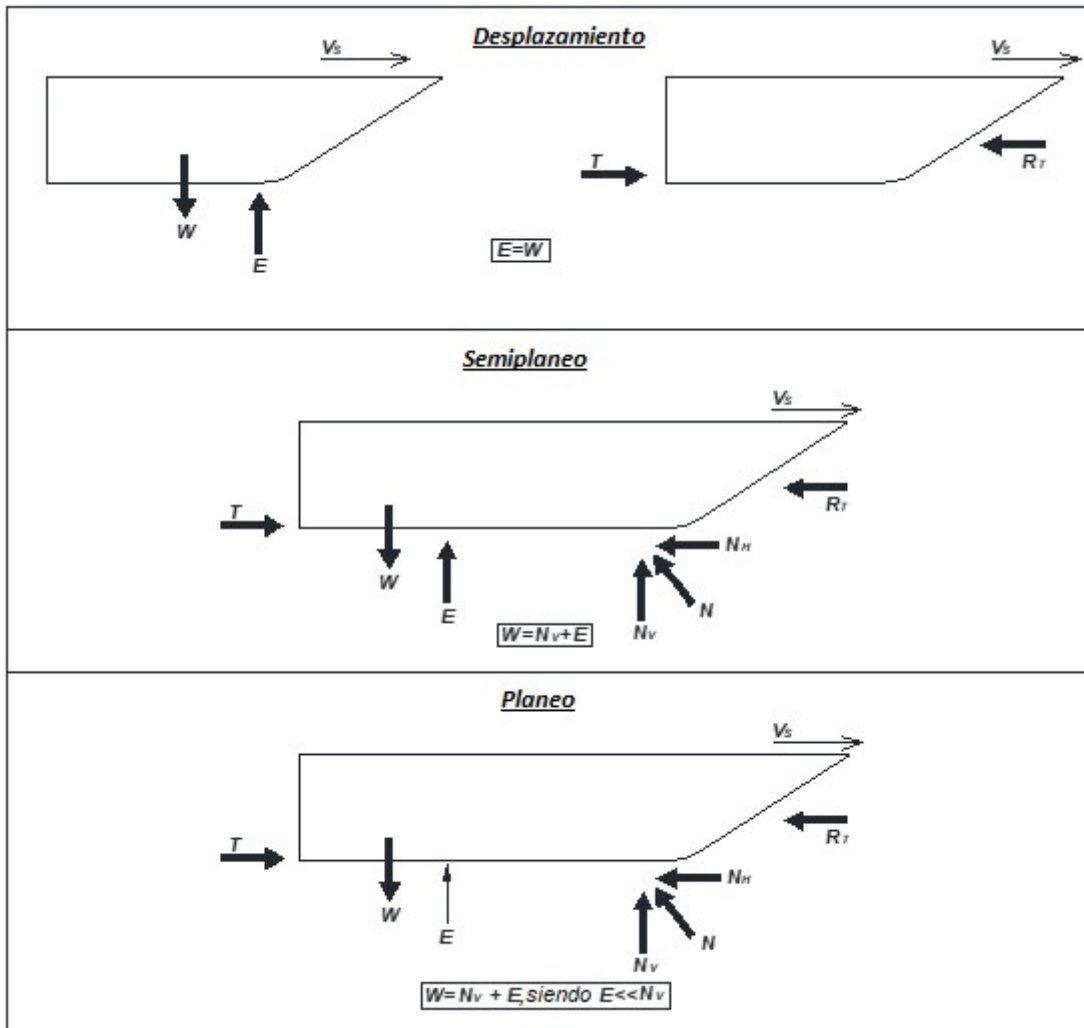
- Desplazamiento: $Q_t < 1.34$.
- Semiplaneo: $1.34 \leq Q_t < 3.00$.
- Planeo: $Q_t \geq 3.00$.

En principio, la embarcación debería alcanzar el planeo completamente desarrollado para números de Froude superiores a 0.89. No obstante, no todas las embarcaciones alcanzan esta condición con $Fn \geq 0.89$. Como se mencionó, la condición de planeo plenamente desarrollado está caracterizada por presentar la popa y los costados secos. Esta condición se obtiene dependiendo de la geometría del casco. Los cascos planeadores están diseñados para lograr esta condición con mayor facilidad que los cascos de semiplaneo. Sin embargo, según Ribeiro (2002), una embarcación planeadora puede alcanzar un Fn superior a 0.89 y no planear completamente por causa de sus características geométricas, siendo la razón longitud-manga, ángulo de astilla muerta, relación peso-volumen y el centro de gravedad longitudinal (LCG) los más influyentes.

De modo genérico, una descripción gráfica de los regímenes hidrodinámicos es mostrada en la Figura 2.2, donde se aprecia que la fuerza hidrodinámica (N) tiene mayor impacto en el equilibrio dinámico en los regímenes de semiplaneo y planeo. Adicionalmente, la influencia del empuje hidrostático en la sustentación es mínima en relación a la fuerza hidrodinámica cuando el casco está en el régimen de planeo. En la Figura 2.2, N_H y N_V son resultados de la descomposición trigonométrica de N .

Figura 2.2

Diagrama de Cuerpo Libre del Casco en los Regímenes Hidrodinámicos

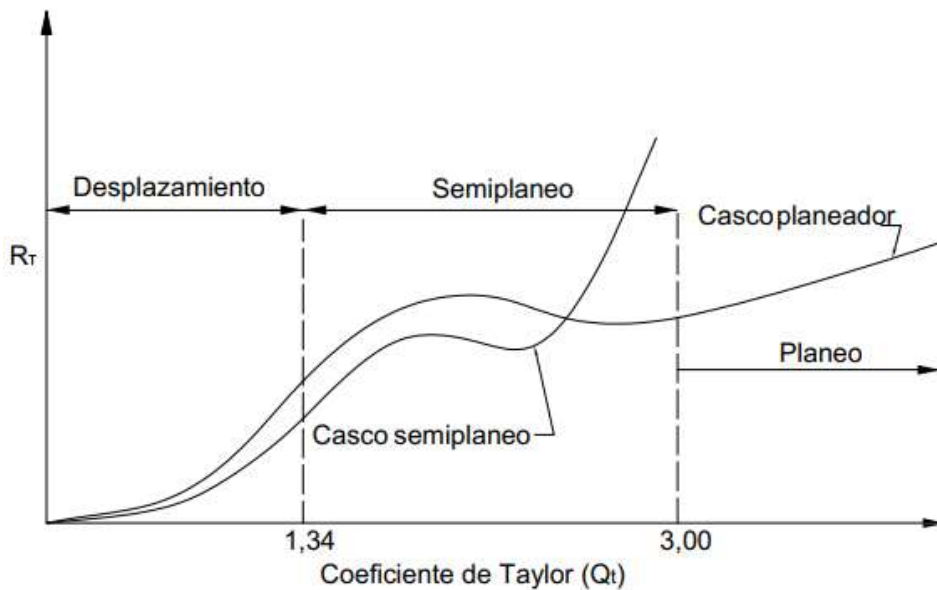


El complejo desempeño hidrodinámico de los cascos planeadores, además de afectar al equilibrio dinámico, influye en el comportamiento de la resistencia al avance. En las embarcaciones de desplazamiento, la resistencia es proporcional al cuadrado de la velocidad. Por el contrario, en las embarcaciones de alta velocidad, la resistencia presenta un comportamiento particular en cada régimen (ver Figura 2.3).

En la Figura 2.3, se presentan las curvas de resistencia características de los cascos de semiplaneo y de los cascos planeadores, mostrando el comportamiento de la resistencia en estos cascos.

Figura 2.3

Curva Característica de la Resistencia al Avance en Embarcaciones de Alta Velocidad



En los dos tipos de casco, la curva de resistencia presenta una inflexión en el régimen de semiplaneo, específicamente cuando el casco comienza a planear. No obstante, conforme el coeficiente de Taylor es mayor, la diferencia entre las curvas de resistencia es notoria, siendo el casco planeador el que presenta menores valores de resistencia en altas velocidades en comparación al casco de semiplaneo.

Estas características de la resistencia al avance total en embarcaciones de alta velocidad son consecuencia de las variaciones en la resistencia por formación de olas (R_w) y la resistencia por fricción (R_f). Según Ribeiro (2002), en el régimen de desplazamiento, la R_f es la parte que predomina en la resistencia total hasta $Fn \leq 0.23$ debido al dominio de la capa límite en bajas velocidades. A pesar de esto, la resistencia por formación de olas tiene mayor influencia en la resistencia total a medida que el casco alcanza mayores velocidades. En $Fn > 0.23$, las interferencias constructivas y destructivas de las olas, generadas en popa y proa de la embarcación, producen máximos y mínimos en la curva de resistencia. Estos máximos y mínimos generados se intensifican cuando la embarcación alcanza altos valores de Fn , aumentando la R_w debido a la disipación de mayor energía. Según Ribeiro (2002), la resistencia por formación de olas alcanza su valor máximo cuando $Fn = 0.40$ ($Q_t = 1.34$) aproximadamente. De acuerdo a la publicación de MAN Diesel &

Turbo (2013), la R_F representa entre 70% a 90% de la resistencia total, mientras la R_W representa entre 8% a 25% de la resistencia, en el régimen de desplazamiento.

De acuerdo con Ribeiro (2002), en mayores velocidades ($Fn \geq 0.40$), la influencia generada por la formación de olas en la resistencia total se vuelve más intensa. Simultáneamente, el ángulo de trim aumenta debido a la elevación del cuerpo de entrada, causada por la fuerza de sustentación que actúa en la proa. En consecuencia, la superficie mojada aumenta debido al aumento progresivo del calado en popa, generado por el incremento del trim; incrementándose también la resistencia friccional y de presión viscosa.

Debido a lo explicado anteriormente y a su geometría, es que los cascos de desplazamiento no pueden superar la barrera del régimen de desplazamiento. En contrapartida, la geometría del casco planeador permite superar estas dificultades debido a que posee popa espejo y líneas de secciones longitudinales rectas.

Según Faltinsen (2005), la ecuación de dispersión de la ola transversal en aguas profundas (Ecuación 3.1), generada por la proa del casco, muestra que la longitud de onda aumenta cuando la embarcación alcanza mayores velocidades, corroborándose el incremento de la resistencia por formación de olas en $Fn > 0.23$, conforme lo mencionado anteriormente.

$$Fn^2 = \frac{\lambda_{wT}}{2 \cdot \pi \cdot L_{wl}} \quad (3.1)$$

donde,

- L_{wl} es la eslora de la línea de agua.
- λ_{wT} es la longitud de la ola transversal generada.

No obstante, cuanto más incrementa el Fn , la razón λ_{wT}/L_{wl} aumenta, alcanzando valores mayores a 1.00. Esto causa que las interferencias entre las olas, generadas en la proa y la popa, sean siempre destructivas en altas velocidades. De acuerdo a Ribeiro (2002), este fenómeno ocurre para $Fn \geq 0.89$ ($Q_t \geq 3.00$, régimen de planeo). Además, en el régimen de planeo, la superficie de contacto del casco con el agua decrece. Por lo tanto,

la tendencia de la resistencia por formación de olas prácticamente desaparece cuando la embarcación opera en el régimen de planeo.

Adicionalmente, en el régimen de planeo, la disminución de la superficie mojada y del coeficiente de fricción C_F ocasiona una ligera reducción de la resistencia por fricción (R_F). Sin embargo, en este régimen, se genera un *spray* en los costados del casco, aumentando la R_F . Por lo tanto, el incremento de la R_F , sumado a la disminución de la R_W , provoca que la R_F se convierta en la parte dominante en la resistencia total en el régimen de planeo.

Debido a este desempeño hidrodinámico complejo de los cascos de alta velocidad, es importante escoger los métodos adecuados de cálculo de resistencia que representen realmente su comportamiento en todo el rango de velocidades de operación, y no solo en la velocidad de diseño. Asimismo, es importante que los métodos muestren la tendencia de la resistencia entre el desplazamiento y el planeo con alta precisión, porque es la zona donde aumenta la demanda del propulsor.

En la siguiente sección, el método de Savitsky se desarrolla para calcular la resistencia en los regímenes de semiplaneo y planeo en embarcaciones planeadoras (casco en V y popa espejo). Este método permite comprender la relación entre la resistencia y los parámetros que la influyen.

Para estimar la resistencia en el régimen de desplazamiento se utilizó el método de Holtrop. A pesar que este método ha sido desarrollado para los cascos de desplazamiento, este proporciona resultados coherentes en cascos de alta velocidad dentro del régimen de desplazamiento, según lo indicado por Castelli (2015). El método de Holtrop es de conocimiento común en el área naval, utilizándose frecuentemente en la industria, en las investigaciones y en la enseñanza. Por este motivo, el desarrollo de este método en el presente trabajo es innecesario. Sin embargo, un abordaje resumido del método es realizado a continuación.

El método de Holtrop se fundamenta en el análisis de regresión realizado con datos obtenidos en ensayos de canal, para diferentes modelos de cascos de desplazamiento.

Para el análisis de regresión también se utilizaron los parámetros geométricos de los modelos. Holtrop (1984) actualizó su método, adicionando los resultados y las características geométricas de la serie 64 (serie de cascos de alta velocidad), empleando un total de 334 modelos. Este método se caracteriza por proporcionar un procedimiento matemático para cada fracción de la resistencia total, incluyendo las resistencias debidas a los apéndices del casco y al viento. El procedimiento detallado de Holtrop genera estimaciones aproximadas de la resistencia real. Holtrop propone la siguiente expresión para el cálculo de la resistencia total:

$$R_{total} = R_F * (1 + k) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A \quad (3.2)$$

donde,

- R_F es la resistencia friccional de acuerdo a la ITTC-1957.
- $(1 + k)$ es el factor de forma que describe la resistencia viscosa de la forma del casco en relación con la resistencia friccional.
- R_{APP} es la resistencia de los apéndices.
- R_W es la resistencia por formación de olas.
- R_B es la resistencia por presión adicional del bulbo.
- R_{TR} es la resistencia por presión adicional de la parte sumergida del espejo de popa.
- R_A es la resistencia de correlación modelo-buque.

2.1.1 Equilibrio dinámico – Método de Savitsky

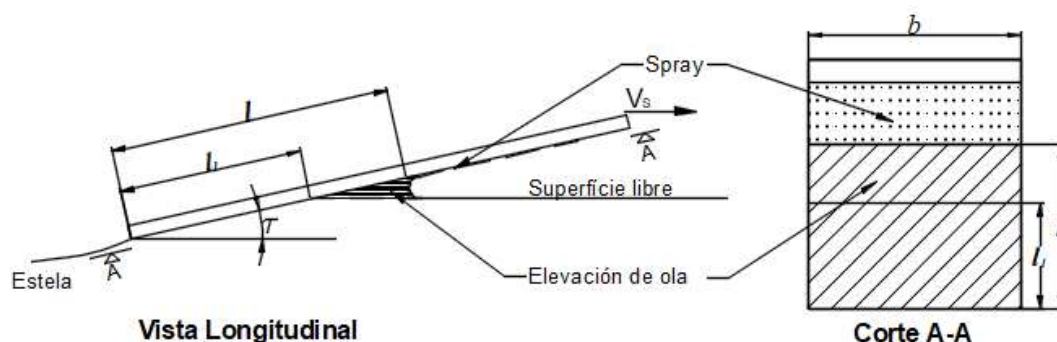
Savitsky (1964) estudió las características hidrodinámicas de los cascos prismáticos en su trabajo titulado *Hydrodynamic Design of Planning Hulls*, proporcionando fórmulas que describen la sustentación, la resistencia, la superficie mojada y el centro de presión en función de la velocidad, del ángulo de trim, del ángulo de astilla muerta (β) y del desplazamiento. Estas fórmulas fueron producto de un estudio analítico y empírico realizado por el autor sobre datos obtenidos en pruebas. Asimismo, Savitsky recolectó las investigaciones anteriormente realizadas sobre el planeo para mejorar el desarrollo de las

ecuaciones. Finalmente, un procedimiento iterativo que asocia las fórmulas obtenidas y las ecuaciones de estabilidad dinámica longitudinal (resultado del balance de fuerzas en el plano longitudinal) es propuesto para estimar la resistencia total y el ángulo de trim en los cascos prismáticos. Adicionalmente, este procedimiento permite calcular la longitud de quilla mojada, que, junto con el ángulo de trim, caracterizan la condición de navegación de los cascos prismáticos con popa espejo (*transom stern*).

Todas las ecuaciones propuestas por Savitsky fueron desarrolladas para cascos prismáticos con manga entre codillos (b) y ángulo de astilla muerta (β) constantes. Sin embargo, estos parámetros geométricos varían longitudinalmente en los cascos prismáticos. Por otro lado, Lahtiharju et al. (1991), Ribeiro (2002) y Varda et al. (2012), recomiendan utilizar los valores de b y β encontrados en el medio de la embarcación para facilitar los cálculos. Por este motivo, en el presente trabajo, estos parámetros serán obtenidos en la sección media de embarcación.

a) **Consideraciones geométricas.** Savitsky analiza las superficies prismáticas partiendo de un caso específico, empleando una placa plana ($\beta = 0^\circ$) como referencia. La respuesta de una placa plana al planeo depende geoméricamente de la longitud mojada (l) y del ancho de la placa (b), definidos en la Figura 2.4.

Figura 2.4
Descripción del Planeo en una Superficie Plana



Nota: Adaptado de Savitsky (1964).

El desempeño de una superficie plana, en el régimen de planeo, genera una elevación de ola y la formación de *spray* en el fondo de la superficie. Por lo tanto, la

superficie mojada total está compuesta por el área donde la presión es efectiva (factor que produce la sustentación) y por el área donde actúa el *spray*. Debido a que el área del *spray* no contribuye a la sustentación, la longitud mojada es definida únicamente por l (Figura 2.4) que es la longitud desde el borde de fuga hasta la raíz del *spray* (donde comienza a formarse el *spray*). También, en la Figura 2.4, la longitud l_1 es definida entre el borde de fuga (en la popa de la placa) y la intersección de la superficie libre con la placa plana, siendo siempre menor que l .

A partir de esos factores geométricos, Savitsky define la razón entre la longitud mojada y el ancho de la superficie (λ), siendo:

$$\lambda = \frac{l}{b} \quad (3.3)$$

El parámetro λ es importante por su influencia en la sustentación de superficies planas y prismáticas.

En las superficies prismáticas, la raíz del *spray* (definida en la Figura 2.5 por los puntos K y A), que define la longitud mojada, tiene una forma diferente en relación a las superficies planas, como se muestra en la Figura 2.5. Por consiguiente, el λ para superficies prismáticas es definido por la longitud mojada media (l_m) y por la manga entre los codillos (b) siendo

$$\lambda = \frac{l_m}{b} \quad (3.4)$$

y l_m es definido por

$$l_m = \frac{L_C + L_K}{2} \quad (3.5)$$

donde,

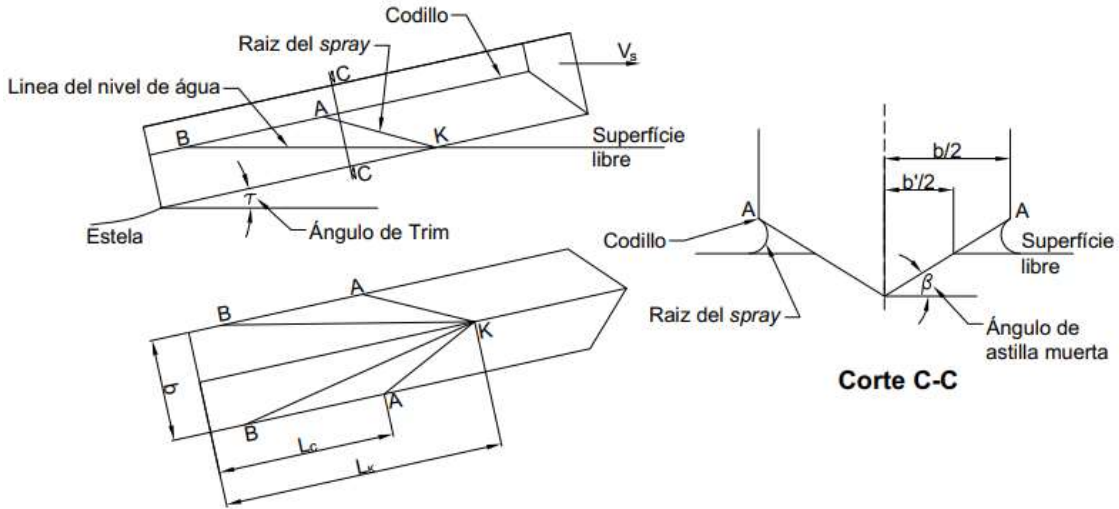
- L_C es la longitud de codillo mojado.
- L_K es la longitud de la quilla mojada.

Estos parámetros son presentados en la Figura 2.5. También, de las ecuaciones 3.4 y 3.5, se obtiene:

$$\lambda = \frac{L_C + L_K}{2 \cdot b} \quad (3.6)$$

Figura 2.5

Descripción del Planeo en una Superficie Prismática (Casco en V)



Nota: Adaptado de Savitsky (1964).

Del gráfico mostrado en el corte C-C de la Figura 2.5, el ancho de la superficie mojada (b'), definido en la intersección de la superficie libre en aguas calmas con la superficie prismática (determinada entre los puntos K y B), es representado por la siguiente ecuación:

$$b' = 2 \cdot (L_K - L_C) \cdot \frac{\tan \tau}{\tan \beta} \quad (3.7)$$

Por otro lado, basándose en una publicación de Wagner (1932), Savitsky proporciona una relación entre el ancho mojado efectivo ($2 \cdot b_1$), definido en el área formada por la intersección de la superficie prismática con la raíz del *spray*, y el ancho mojado definido por la intersección de la superficie libre en aguas calmas con la superficie prismática ($2 \cdot b'_1$). Estas dimensiones son mostradas en la Figura 2.6. Wagner analizó la penetración vertical de una cuña bidimensional en la superficie libre de un fluido, obteniendo como resultado que el ancho mojado efectivo es $\pi/2$ veces el valor de $2 \cdot b'_1$. Por lo tanto, en la vista transversal del casco prismático (Figura 2.6), la relación de $2 \cdot b_1$ y $2 \cdot b'_1$ es expresada como:

$$b'_1 = \frac{2}{\pi} \cdot b_1 \quad (3.8)$$

Entonces, a partir de las ecuaciones 3.7 y 3.8, la diferencia entre L_K y L_C es descrita como:

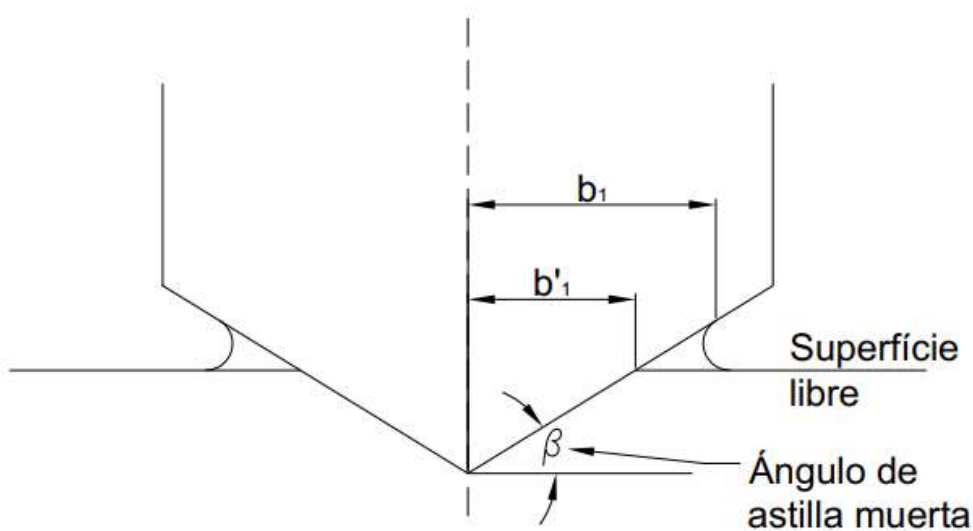
$$L_K - L_C = \frac{b \tan \beta}{\pi \cdot \tan \tau} \quad (3.9)$$

Las evaluaciones experimentales realizadas por Savitsky determinan que la Ecuación 3.9 es aplicable para coeficientes de velocidad (C_v) mayores que 2.00, donde,

- $C_v = V_S / \sqrt{g \cdot b}$,
- g es la gravedad.
- b es la manga o distancia entre codillos.

Figura 2.6

Vista Transversal de una Superficie Prismática en Régimen de Planeo



Vista transversal

b) Sustentación de superficies prismáticas. Anteriormente, se mencionó que la sustentación de los cascos prismáticos en altas velocidades es constituida por una fracción hidrostática (L_H) y otra hidrodinámica (L_D). Entonces, la fuerza de sustentación (L) se expresa como:

$$L_H + L_D = L \quad (3.10)$$

La fracción hidrostática se debe a la fuerza E y la fracción hidrodinámica se debe a la componente vertical de la fuerza N (N_V), según la Figura 2.2.

De acuerdo a Savitsky, para una superficie prismática desplazándose a una velocidad V_S , con un ancho entre codillos b y un ángulo de astilla muerta β constantes, la sustentación se define como:

$$L = \frac{1}{2} \cdot C_{L\beta} \cdot \rho \cdot V_S^2 \cdot b^2 = \Delta \quad (3.11)$$

De las ecuaciones 3.10 y 3.11 se demuestra que:

$$L = \frac{1}{2} \cdot (C_{L\beta H} + C_{L\beta D}) \cdot \rho \cdot V_S^2 \cdot b^2 \quad (3.12)$$

Por lo tanto, el componente hidrostático y el componente hidrodinámico de la sustentación total serán representados por los coeficientes de sustentación $C_{L\beta H}$ y $C_{L\beta D}$, respectivamente.

En referencia al análisis de una superficie plana ($\beta = 0$), Savitsky propone fórmulas para cada coeficiente de sustentación. En el caso del coeficiente de sustentación hidrodinámica para una placa plana (C_{L0D}), la teoría de la aerodinámica define que el coeficiente de sustentación es directamente proporcional al trim ($C_{L0D} = A \cdot \tau$) cuando la razón λ es baja ($b \gg l_m$, como en las alas del avión), no obstante, cuando la razón λ es alta ($b \ll l_m$) el coeficiente es directamente proporcional a τ^2 ($C_{L0D} = B \cdot \tau^2$). En el caso de las superficies de planeo, el coeficiente de sustentación hidrodinámica será la suma de las dos relaciones mencionadas. Para simplificar el estudio del coeficiente hidrodinámico, Savitsky propone la siguiente función:

$$C_{L0D} = f(\lambda, C_v) \cdot \tau^{1,1} \quad (3.13)$$

Adicionalmente, Savitsky (1964) realizó un análisis con los datos obtenidos en pruebas hidrodinámicas de planeo sin considerar los efectos hidrostáticos y tomando como referencia la Ecuación 3.13, estableciendo la siguiente relación:

$$C_{L0D} = c \cdot \lambda^{1/2} \cdot \tau^{1,1} \quad (3.14)$$

donde,

- c es una constante.
- λ se expresa en la ecuación 3.4.
- τ es el ángulo de trim.

Por otro lado, utilizando el principio de Arquímedes en un casco prismático con ángulo de astilla muerta nula, ancho entre codillos b y ángulo de trim τ ; se obtendrá la siguiente ecuación que describe la sustentación hidrostática:

$$L_{0H} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot b^3 \cdot (\lambda - 0,30)^2 \cdot \tan \tau \quad (3.15)$$

Por consiguiente, relacionando las ecuaciones 3.11 y 3.15, y asumiendo que $(\lambda - 0.30)^2$ puede ser sustituido por $D \cdot \lambda^n$, el coeficiente de sustentación hidrostática para una superficie plana (C_{L0H}) se determina por:

$$C_{L0H} = \frac{D \lambda^n}{C_v^2} \tan \tau \quad (3.16)$$

Sumando las ecuaciones 3.14 y 3.16 y asumiendo que entre $\tan \tau$ y $\tau^{1.1}$ casi no hay diferencia, el coeficiente de sustentación total para cascos prismáticos con ángulo de astilla muerta nulo (C_{L0}) es definido por la siguiente ecuación empírica:

$$C_{L0} = \tau^{1.1} \cdot \left(c \cdot \lambda^{1/2} + \frac{D \lambda^n}{C_v^2} \right) \quad (3.17)$$

Savitsky (1964) evaluó los datos obtenidos en la literatura existente, obteniendo valores para las constantes c , D y n de la Ecuación 3.17. Como resultado de este análisis, el autor obtuvo la siguiente relación:

$$C_{L0} = \tau^{1.1} \cdot \left(0,012 \cdot \lambda^{1/2} + \frac{0,0055 \lambda^{5/2}}{C_v^2} \right) \quad (3.18)$$

donde, τ está en grados sexagesimales.

De acuerdo a Savitsky, la ecuación 3.17 es aplicable para $0,60 \leq C_v \leq 13,00$, $2^\circ \leq \tau \leq 15^\circ$ y $\lambda \leq 4$.

En el caso de las superficies prismáticas con $\beta \neq 0$, el incremento del ángulo de astilla muerta reducirá el coeficiente de sustentación. El aumento de β generará una

disminución del área donde la presión de sustentación es ejercida, en consecuencia, la fuerza de sustentación disminuirá con el incremento de β . Debido a esto, una ecuación para calcular el coeficiente de sustentación en superficies prismáticas ($C_{L\beta}$) es:

$$C_{L\beta} = C_{L0} - 0,0065 \cdot \beta \cdot C_{L0}^{0,60} \quad (3.19)$$

c) Cálculo de la resistencia al avance total. La resistencia hidrodinámica total (R_T) de cascos de planeo está conformada por la resistencia debida a la presión viscosa (R_p), la resistencia por fricción (R_f) y a la resistencia debida al *spray* (R_s), siendo:

$$R_T = R_p + R_f + R_s \quad (3.20)$$

En el estudio expuesto por Savitsky, el último término de la Ecuación 3.20 no es considerado, describiendo la resistencia total apenas por las partes debidas a la fricción y la presión viscosa. La R_p es un componente de la fuerza normal N_T , siendo N_T la suma vectorial de las fuerzas E , N_V y N_H (ver Figura 2.2). Adicionalmente, la R_f es producto de la fuerza fricción D_f que es tangente al fondo del casco (Figura 2.7). Por lo tanto, del diagrama de cuerpo libre presentado en la Figura 2.7, se obtiene que:

$$R_T = \Delta \tan \tau + \frac{D_f}{\cos \tau} \quad (3.21)$$

donde,

- $\Delta \tan \tau = R_p$
- $\frac{D_f}{\cos \tau} = R_f$.

Por otro lado, Savitsky establece la siguiente relación:

$$D_f = \frac{C_f \cdot \rho \cdot V_1^2 \cdot \lambda \cdot b^2}{2 \cdot \cos \beta} \quad (3.22)$$

Finalmente, sustituyendo D_f en la Ecuación 3.21, obtenemos la resistencia total en superficies prismáticas establecida por Savitsky (R_{Sav}) como:

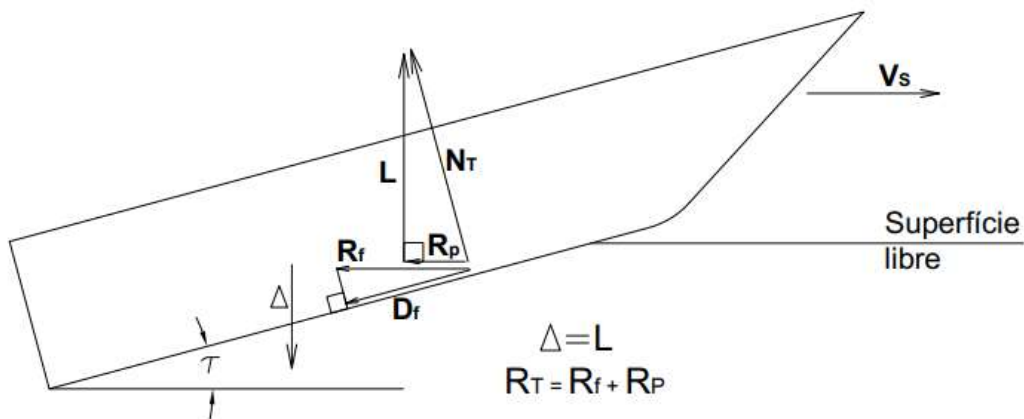
$$R_{Sav} = \Delta * \tan \tau + \frac{\rho * V_1^2 * \lambda * b^2 * C_f}{2 * \cos \beta * \cos \tau} \quad (3.23)$$

donde,

- C_f es el coeficiente de fricción de Schoenherr, no obstante, se pueden utilizar fórmulas más precisas como las indicadas por Harvald (1983) y Molland et al. (2011).
- En este caso, para calcular C_f se usa $Rn = (V_1 \cdot \lambda \cdot b) / \nu$, donde, Rn es el número de Reynolds y ν es la viscosidad cinemática del agua.
- V_1 es la velocidad que actúa en el fondo del casco que normalmente es menor que la velocidad de la embarcación V_S . Asimismo, esta velocidad se utiliza para calcular el C_f mediante el número de Reynolds.

Figura 2.7

Diagrama de Cuerpo Libre de un Casco Prismático en Planeo



En planeo, debido a las altas presiones que existen en el fondo del casco, la velocidad del flujo de agua incidente en esta área (V_1) es menor que la velocidad de la embarcación (V_S). Aplicando el principio de Bernoulli entre la superficie libre y el fondo del casco, se obtiene:

$$V_1 = V_S \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot P_d}{\rho \cdot V_S^2}\right)^{0.5} \quad (3.24)$$

donde,

P_d es la presión dinámica en el fondo del casco, definida como:

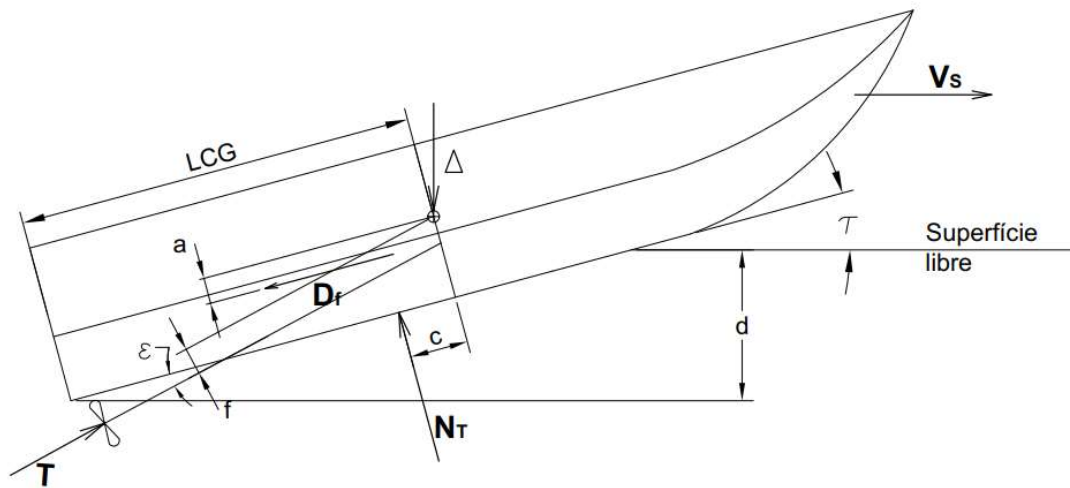
$$P_d = \frac{\Delta_d}{\lambda \cdot b^2 \cdot \cos \tau} \quad (3.25)$$

También, se observa que P_d depende de la carga dinámica (Δ_d). Esta carga se estima utilizando la componente hidrodinámica de la Ecuación 3.12.

Para estimar el equilibrio dinámico y el desempeño de las embarcaciones de planeo, Savitsky estableció un procedimiento de cálculo iterativo. Este procedimiento iterativo evalúa varios valores del ángulo de trim hasta satisfacer la condición del equilibrio dinámico. El equilibrio dinámico se analiza a través del diagrama de cuerpo libre de la embarcación, el cual es mostrado en la Figura 2.8.

Figura 2.8

Diagrama de Cuerpo Libre de una Embarcación Operando en Altas Velocidades



Nota: Figura adaptada de Savitsky (1964).

2.2 Influencia de la interacción casco-hélice en el desempeño propulsivo

Optimizar el sistema de propulsión de las embarcaciones de alta velocidad es un gran desafío para el diseñador o el armador debido a las características hidrodinámicas complejas de este tipo de embarcaciones. Estas características hidrodinámicas afectan el desempeño del casco, como se vio en la sección 2.1, y el desempeño de la hélice.

La hélice es un componente importante del sistema de propulsión, por eso, conocer su desempeño detalladamente ayuda a alcanzar las condiciones deseadas de operación. Asimismo, minimiza la potencia requerida por la hélice (DHP), aprovechando eficientemente la potencia proporcionada por el motor (BHP).

Como cualquier máquina, el desempeño del propulsor depende de las condiciones de operación a las que está sujeto. En el caso de las embarcaciones de alta velocidad, la hélice está expuesta a variaciones de velocidad y dirección en el flujo debido a la ubicación de la hélice en la popa de la embarcación, afectando a su velocidad de avance (velocidad del fluido incidente en la hélice). Por otro lado, la operación del propulsor a popa de la embarcación genera variaciones de presión en esta región, aumentando la resistencia. Adicionalmente, debido a la inclinación del eje y del casco (trim) apenas una parte del empuje generado por la hélice se utiliza para el desplazamiento de la embarcación. Estos fenómenos son productos de la interacción casco-hélice.

Por consiguiente, para realizar un análisis correcto, es importante comprender los efectos que influyen en el desempeño de la hélice en cascos de alta velocidad, tales como las variaciones de la velocidad de avance de la hélice, variaciones de la resistencia y efectos derivados de la inclinación del eje.

2.2.1 Variaciones de la velocidad de avance del propulsor

Idealmente, la velocidad del flujo que entra en la hélice (velocidad de avance) debería ser igual a la velocidad de la embarcación, no obstante, la interacción casco-hélice produce una diferencia entre estas velocidades (debido al efecto de capa límite). El fenómeno, producto de la interacción casco-hélice, que ocasiona una diferencia entre la velocidad de avance de la hélice (V_a) y la velocidad de la embarcación (V_S) se llama estela. Matemáticamente, la estela es representada por $V_S - V_a$. Si dividimos la estela por V_S o V_a , obtenemos el coeficiente de Taylor y el coeficiente de Froude, respectivamente. Sin embargo, desde el punto de vista práctico, el coeficiente de estela de Taylor (w) es comúnmente utilizado para caracterizar matemáticamente la estela, por lo tanto,

$$w = \frac{V_S - V_a}{V_S} \quad (3.26)$$

El coeficiente de estela se compone de la sumatoria de los siguientes coeficientes:

- Coeficiente de estela por fricción (w_F), este coeficiente se origina por la fricción en la superficie del casco y por el aumento de espesor de la capa

límite a lo largo del casco, siendo mayor en la región de popa, en consecuencia, genera una variación del flujo de agua en la popa en relación a la proa.

- Coeficiente de estela potencial (w_p), es producto de la perturbación del campo velocidades por la presencia del casco, generando diferencias de presiones entre la proa y la popa.
- Coeficiente de estela por formación de olas (w_w), se manifiesta por el movimiento orbital de las partículas de agua en presencia de una ola (teoría trocoidal), la cual es formada por la embarcación, generando variaciones en la velocidad del flujo, cuyo aumento o disminución de velocidad dependerá si la hélice está en una cresta o valle de la ola.

En las embarcaciones de desplazamiento, estos efectos generan que V_a sea siempre menor que V_s por causa del coeficiente de estela positivo, siendo la diferencia entre ellas casi constante en el régimen de desplazamiento. En contrapartida, en las embarcaciones de alta velocidad, el coeficiente de estela es variable (puede aumentar o disminuir) en relación a la velocidad debido a las extraordinarias características hidrodinámicas que presentan este tipo de cascos en altas velocidades (ver sección 2.1).

Por lo expuesto, el coeficiente de estela es un parámetro hidrodinámico que depende de la velocidad y geometría de la embarcación. Por esta razón, varias expresiones matemáticas, que estiman el coeficiente de estela, están basadas en datos geométricos y velocidad de la embarcación. Cabe indicar que estas expresiones fueron resultado de diversos análisis de regresión. Asimismo, las fórmulas están condicionadas por el número de líneas de propulsión de la embarcación.

Para las embarcaciones de desplazamiento las fórmulas más conocidas son las proporcionadas por Holtrop & Mennen (1982). Los mencionados autores proponen dos métodos para estimar el coeficiente de estela, uno para embarcaciones con una hélice y otro para dos líneas de propulsión. La ecuación 3.27 es proporcionada por Holtrop para

estimar el coeficiente de estela efectiva (incluyendo el efecto del propulsor) en embarcaciones con dos líneas de propulsión.

$$w = 0.3095 \cdot C_B + 10 \cdot C_V \cdot C_B - 0.23 \cdot \frac{D}{\sqrt{B \cdot T_M}} \quad (3.27)$$

donde,

- C_B es el coeficiente de bloque del casco.
- D es el diámetro de la hélice.
- B es la manga del casco.
- T_M es el calado medio del casco.
- C_V es el coeficiente de resistencia viscosa, que se calcula con $C_V = (1 + k) \cdot C_F + C_A$, siendo $(1 + k)$ el factor de forma, definido por Molland et al. (2011). El C_F se calcula mediante la expresión dada por la ITTC 57; y el C_A es el coeficiente de correlación.

Esta expresión también puede ser utilizada para calcular el coeficiente de estela total en las embarcaciones de alta velocidad. En este trabajo, esta ecuación se utiliza para estimar el w en el régimen de desplazamiento para cascos planeadores.

Para los regímenes de semiplaneo y planeo en los cascos planeadores existen diversas fórmulas que, similar a los métodos para estimar la resistencia, dependen de la serie o de la forma del casco. Por otro lado, son pocos los estudios experimentales realizados sobre el coeficiente de estela en alta velocidad debido a la dificultad y al alto costo para la medición de estos parámetros en ensayos de canal hidrodinámico. En consecuencia, los métodos estadísticos para determinar el coeficiente de estela en embarcaciones de alta velocidad son deficientes debido a los pocos datos disponibles en la literatura. No obstante, las simulaciones computacionales (CFD, BEM, etc.) surgen como una solución a este problema. Actualmente varios autores recomiendan o utilizan estas herramientas computacionales para determinar el coeficiente de estela, proporcionando buenos resultados.

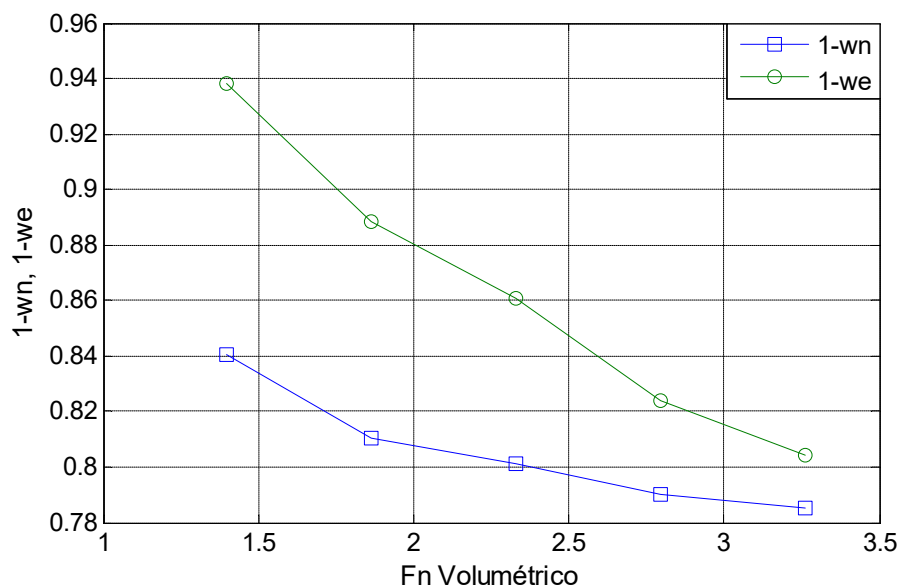
Luca et al. (2014) realizaron una evaluación numérica de las interacciones casco-hélice en series sistemáticas de cascos planeadores con codillo, obteniendo valores del

coeficiente de estela efectiva y del coeficiente de reducción de empuje para $0,50 \leq Fn \leq 1,50$. El análisis numérico se realizó por CFD con el método RANSE (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations*), donde fue empleado un software comercial. Los resultados fueron comparados con datos experimentales encontrados en la publicación de Hadler (1966), validando el método utilizado.

La Figura 2.9 presenta los valores de la razón V_a/V_S , obtenidos de la publicación de Luca et al. (2014), los cuales se expresan por $1 - w_e$ y $1 - w_n$, donde w_e es el coeficiente de estela efectiva y w_n es el coeficiente de estela nominal en altas velocidades.

Figura 2.9

Variación de los Coeficientes de las Estelas Nominal y Efectiva en Relación al Número de Froude Volumétrico



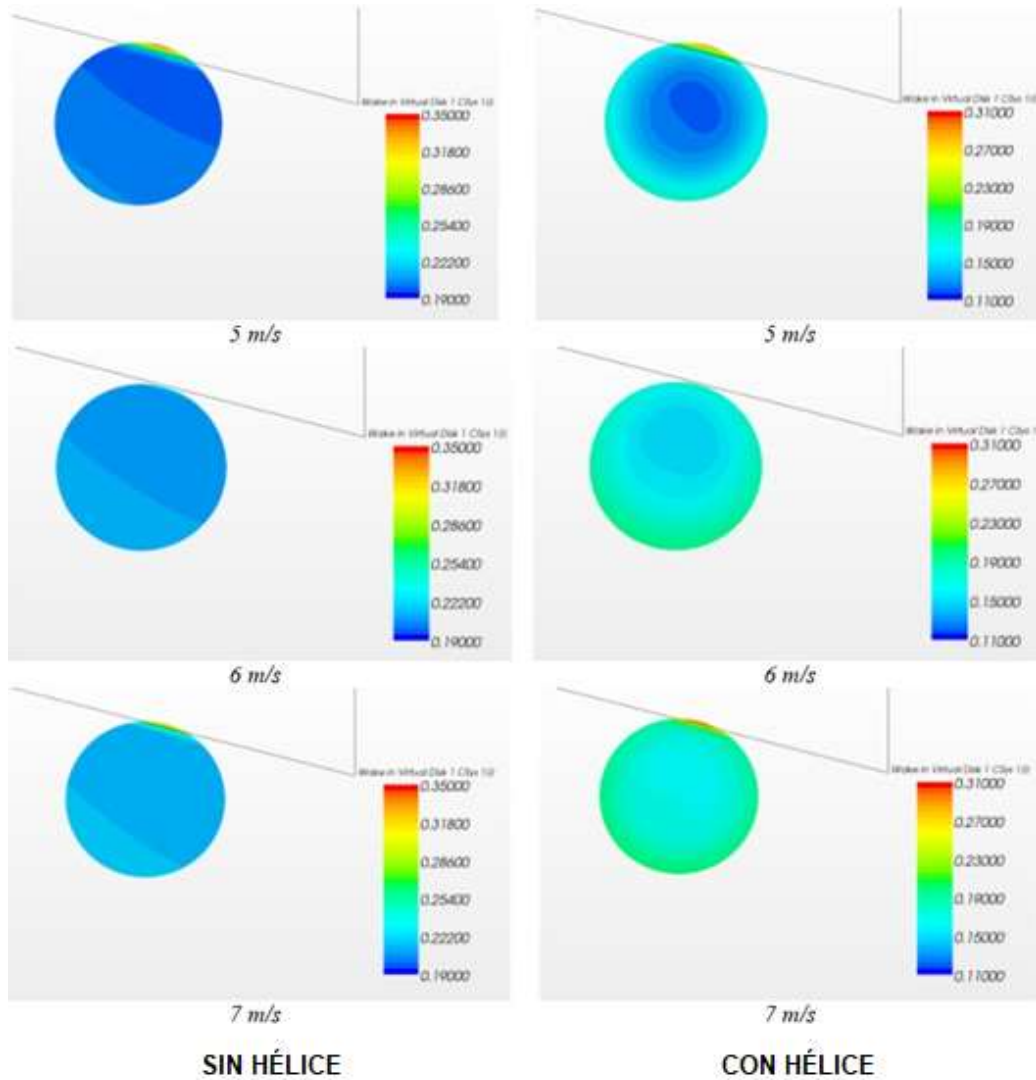
Nota: Gráfico adaptado de la publicación de Luca et al. (2014).

En la Figura 2.9, se observa que el w_n es mayor que w_e ($1 - w_e > 1 - w_n$), a diferencia de las embarcaciones de desplazamiento. Por lo tanto, en altas velocidades, la presencia de las fuerzas generadas por la hélice, disminuye la diferencia entre V_S y V_a , beneficiando al desempeño de la hélice. La interacción de la hélice con el casco genera un campo de velocidades más uniforme, produciendo una menor estela. No obstante, sin la presencia de la hélice, la diferencia del campo de velocidades será abrupta, cuando se analiza para dos hélices. Nótese en la Figura 2.10, que después del análisis por CFD en

una embarcación de planeo, la estela es más uniforme con la hélice actuando (lado derecho de la Figura 2.10) que sin la presencia de ella (lado izquierdo).

Figura 2.10

Diferencia entre el Campo de Velocidades, con Hélice y sin Hélice, en la Estela



Nota: Imagen obtenida de la publicación de Luca et al. (2014).

Para obtener una expresión que describa la variación de la estela efectiva (estela real) en relación a la velocidad, es necesario aplicar un análisis de regresión por mínimos cuadrados a los datos proporcionados por Luca et al. (2014), resultando que:

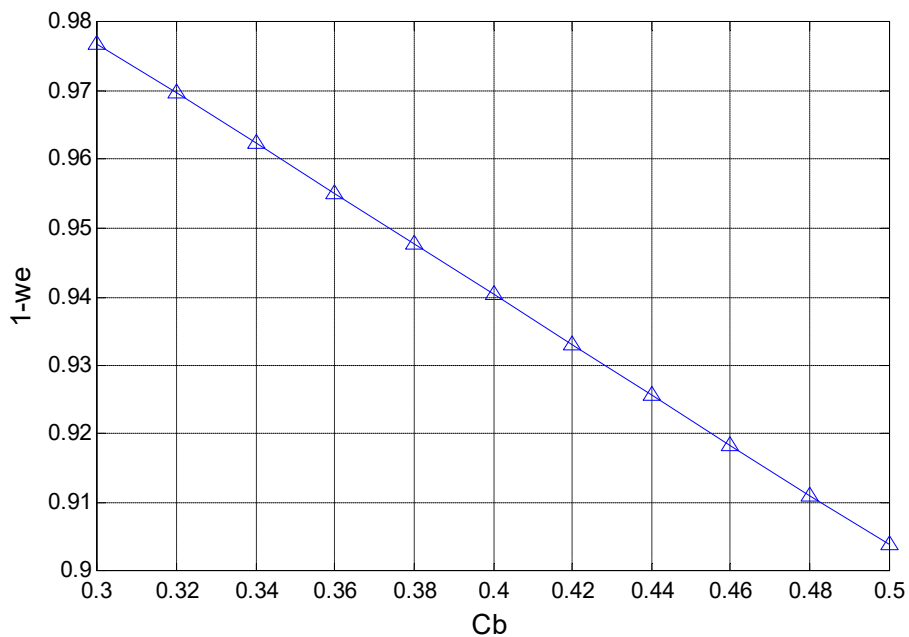
$$1 - w_e = 0.997 \cdot Fn_{\nabla}^{-0.18} \quad (3.28)$$

Para determinar la precisión de la Ecuación 3.28, este modelo matemático fue evaluado con el coeficiente de correlación R^2 (coeficiente estadístico), resultando un $R^2 = 0,993$. Este resultado confirma la alta precisión de la expresión propuesta.

Otro factor que ejerce una gran influencia en el coeficiente de estela es el coeficiente de bloque (C_b) del casco, porque es la forma del casco que alterará el campo de velocidades en el contorno de la hélice. De la ecuación propuesta por Holtrop (Ecuación 3.27), se observa que el coeficiente de estela es linealmente dependiente de C_b . Manteniendo las otras variables constantes, siendo C_b la única variable, es posible obtener la relación entre el w_e y el C_b (ver Figura 2.11).

Figura 2.11

Variación del Coeficiente de Estela en Función del Coeficiente de Bloque



Después del análisis de regresión lineal realizado con los datos de la Figura 2.11, se obtiene la siguiente ecuación:

$$1 - w_e = 1.086 - 0.365 \cdot C_b \quad (3.29)$$

Esta ecuación posee un $R^2 = 1.0$, validando el modelo propuesto.

De las Ecuaciones 3.28 y 3.29, una expresión para calcular el coeficiente de estela efectiva es propuesto a continuación:

$$1 - w_e = \sqrt{1.083 \cdot Fn_{\nabla}^{-0,18} - 0.364 \cdot C_b \cdot Fn_{\nabla}^{-0,18}} \quad (3.30)$$

La Ecuación 3.30 expresa la relación entre el w_e , C_b y Fn_{∇} para embarcaciones planeadoras con dos hélices, que operan en el rango de $1.20 \leq Fn_{\nabla} \leq 3.50$.

2.2.2 Variación de la resistencia al avance

En el diagrama de cuerpo libre de la Figura 2.1 se observa, a simple vista, que el empuje debería ser teóricamente igual a la resistencia al avance para que la embarcación alcance la velocidad deseada. Sin embargo, semejante a la sección anterior, la interacción casco-hélice genera una resistencia adicional, por lo cual, si la hélice fuera proyectada apenas para igualar la resistencia, no se conseguiría la velocidad de diseño de la embarcación.

Esta resistencia adicional genera la sensación de que el empuje sufre una reducción. Por esta razón, el coeficiente que representa este fenómeno se llama coeficiente de reducción de empuje (t), que se expresa como:

$$t = \frac{T - R_T}{T} \quad (3.31)$$

Este fenómeno es ocasionado por la variación del campo de presiones que es generado por las fuerzas del propulsor en la región de popa de la embarcación, lo que significa que el coeficiente de reducción de empuje tiene características hidrodinámicas. Asimismo, similar a la estela, este coeficiente tiene tres componentes: coeficiente de reducción de empuje friccional (t_F), potencial (t_P) y por generación de olas (t_w).

Existen varios tipos de métodos estadísticos que estiman t , incluyendo sus tres componentes. Entre de los más utilizados, el método de Holtrop & Mennen (1982) es el más empleado por los buenos resultados que proporciona para los cascos de desplazamiento. Holtrop & Mennen proponen dos expresiones para calcular el t , una para embarcaciones con una línea de propulsión y otra para embarcaciones con dos líneas. La Ecuación 3.32 representa este último caso.

$$t = 0.325 \cdot C_b - 0.1885 \cdot \frac{D}{\sqrt{B \cdot T_M}} \quad (3.32)$$

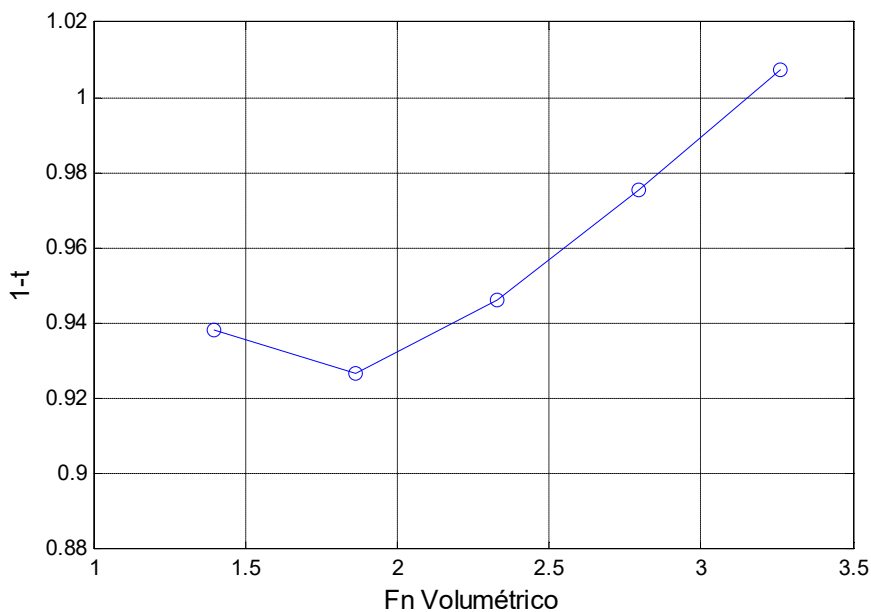
Las variables dependientes de la Ecuación 3.32 representan los mismos parámetros geométricos de la Ecuación 3.27. Nótese que esta fórmula no depende de la

velocidad, por lo tanto, el coeficiente de reducción será constante en el régimen de desplazamiento.

En el caso de los cascos planeadores, Luca et al. (2014), además de evaluar numéricamente el coeficiente de estela (visto en la sección 3.2.1), también analizaron el coeficiente de reducción de empuje por CFD, obteniendo resultados aproximados a los datos experimentales. De los resultados, representados en la Figura 2.12, obsérvese que t varía en relación al Fn_{∇} en altas velocidades, diferente del comportamiento de este en el régimen de desplazamiento.

Figura 2.12

Variación del Coeficiente de Reducción de Empuje en Relación al Número de Froude Volumétrico



Nota: Gráfico adaptado de la publicación de Luca et al. (2014).

Realizando un análisis de regresión con los datos mostrados en la Figura 2.12, la Ecuación 3.33 es obtenida, la cual representa la dependencia de t en relación al Fn_{∇} . Esta formulación tiene un alto grado de precisión, presentando un $R^2 = 0,999$.

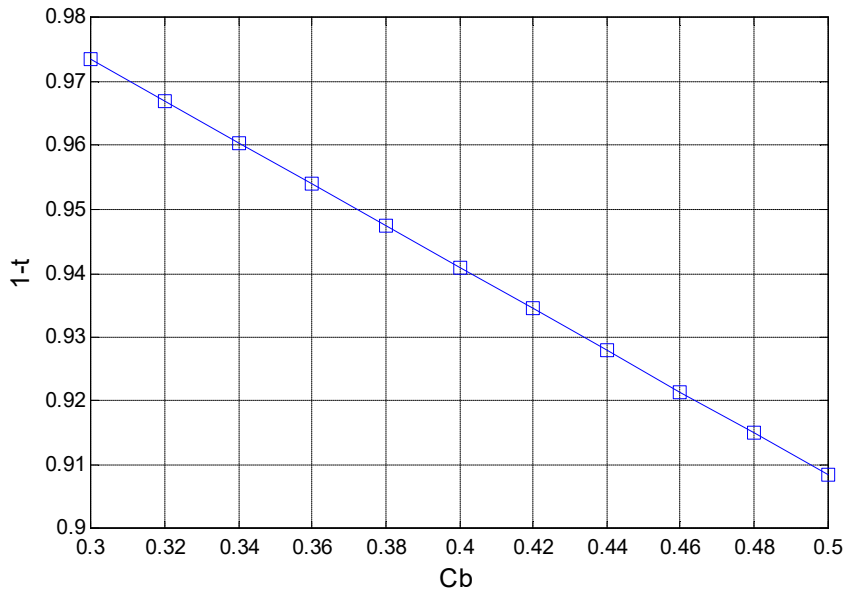
$$1 - t = 1.279 - 0.472.Fn_{\nabla} + 0.196.Fn_{\nabla}^2 - 0.023.Fn_{\nabla}^3 \quad (3.33)$$

Como se mencionó anteriormente, este coeficiente es un parámetro hidrodinámico, por consiguiente, también dependerá de la forma geométrica del casco debido a la alteración del flujo por la forma del casco. La Ecuación 3.32 refleja lo indicado, además,

obsérvese que existe una dependencia lineal del t en relación al C_b en esta expresión. Gráficamente, esta dependencia lineal se muestra en la Figura 2.13.

Figura 2.13

Variación del Coeficiente de Reducción de Empuje en Función del Coeficiente de Bloque



Nota: La Figura 2.13 fue obtenida utilizando la Ecuación 3.32

A través de un análisis de regresión con los datos de la Figura 2.13, la relación entre t y C_b es representada matemáticamente por la Ecuación 3.34. Esta ecuación posee un $R^2 = 1,00$, validando el modelo propuesto.

$$1 - t = 1.071 - 0.325 \cdot C_b \quad (3.34)$$

Por lo tanto, a partir de las Ecuaciones 3.33 y 3.34, se propone la siguiente expresión matemática para calcular el coeficiente de reducción de empuje en cascos planeadores con dos propulsores en regímenes de alta velocidad.

$$1 - t = \sqrt{(1.071 - 0.325 \cdot C_b) \cdot (1.279 - 0.472 \cdot Fn_{\nabla} + 0.196 \cdot Fn_{\nabla}^2 - 0.023 \cdot Fn_{\nabla}^3)} \quad (3.35)$$

La Ecuación 3.35 es aplicable para $1.20 \leq Fn_{\nabla} \leq 3.50$.

2.2.3 Efectos del flujo oblicuo en el propulsor

Las embarcaciones de alta velocidad propulsadas por un sistema convencional se caracterizan por tener el eje de propulsión inclinado. La inclinación del eje evita problemas

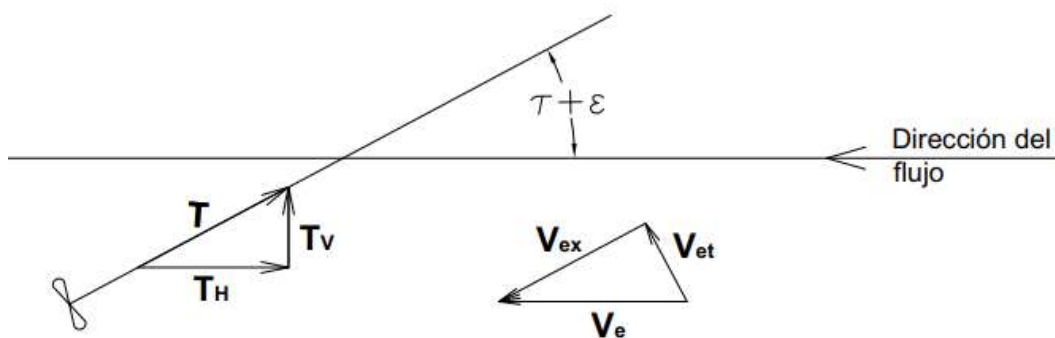
de desempeño que son causados por la falta de profundidad en el propulsor (cavitación, ventilación, etc.).

Por otra parte, a la inclinación del eje se sumará la variación del ángulo de trim, característico de este tipo de embarcaciones, generando un flujo oblicuo en la hélice. En la sección 2.1 se vio que el ángulo de trim está relacionado con la velocidad de la embarcación, por lo tanto, el efecto del flujo oblicuo en la hélice también variará en función de la velocidad (F_n).

Debido a este fenómeno, no todo el empuje generado por la hélice se utiliza para vencer la resistencia al avance. Otro componente del empuje se aprovecha para sustentar a la embarcación. En la Figura 2.8, se observa la diferencia de direcciones entre el vector de empuje y el vector de resistencia. Por este motivo, se vuelve necesario realizar una descomposición trigonométrica, con el fin de conocer cuánto del empuje generado por la hélice se emplea para vencer a la resistencia.

Figura 2.14

Diagrama Vectorial del Empuje (T) y la Velocidad de Avance de la Hélice (V_a)



Partiendo de la Figura 2.14, las expresiones para las componentes vertical y horizontal del empuje pueden establecerse como sigue:

- Componente vertical del empuje: $T_V = T \cdot \sin(\tau + \epsilon)$
- Componente horizontal del empuje: $T_H = T \cdot \cos(\tau + \epsilon)$

donde, la componente horizontal es responsable del desplazamiento de la embarcación.

Seguidamente, aplicando la Ecuación 3.31, se obtiene:

$$T = \frac{R_T}{(1 - t) \cdot \cos(\tau + \varepsilon)} \quad (3.36)$$

De acuerdo con la Ecuación 3.36, es necesario sobredimensionar el empuje por causa del factor $\cos(\tau + \varepsilon)$. Esto se debe a la inclinación del eje y del trim, factores característicos en este tipo de embarcaciones.

Para embarcaciones con más de una hélice, la Ecuación 3.37 representa el empuje para cada línea de propulsión, siendo N_p el número de líneas.

$$T_S = \frac{R_T}{N_p \cdot (1 - t) \cdot \cos(\tau + \varepsilon)} \quad (3.37)$$

Por otro lado, la condición de operación de la hélice también es afectada por el flujo oblicuo, específicamente; porque solo una parte de la velocidad de estela es aprovechada por la hélice, disminuyendo el desempeño.

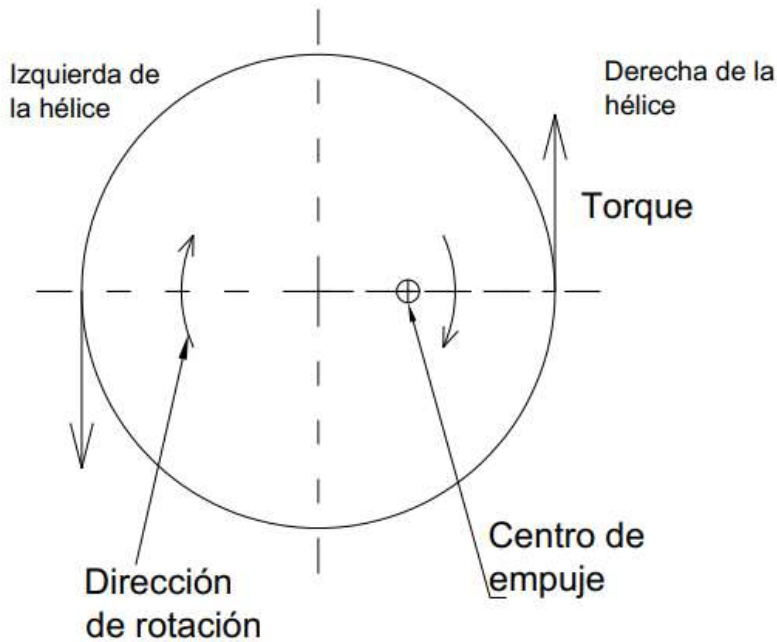
Para conocer el flujo aprovechado por la hélice, una descomposición vertical es realizada (utilizando como referencia la Figura 2.14). Las expresiones para las componentes de la velocidad de estela son:

- Componente axial de la velocidad de estela: $V_{ex} = V_e \cdot \cos(\tau + \varepsilon)$.
- Componente transversal de la velocidad de estela: $V_{et} = V_e \cdot \sin(\tau + \varepsilon)$.

Cuando la hélice gira en sentido horario visto de popa a proa, la componente transversal (V_{et}) incrementa la velocidad del flujo en el perfil de la pala en lado estribor y disminuye la velocidad en el lado babor. La variación de estas velocidades producirá mayor empuje hacia el lado derecho del círculo formado por la hélice, moviendo el centro de aplicación del empuje hacia el lado derecho, Figura 2.15.

Figura 2.15

Efectos en la localización del empuje debido a la velocidad tangencial V_{et}



Por otra parte, la velocidad efectiva de avance de la hélice (V_a), es la componente axial V_{ex} ; para este tipo de embarcaciones. Utilizando la Ecuación 3.26, V_a se expresa como:

$$V_a = V_S \cdot (1 - w_e) \cdot \cos(\tau + \varepsilon) \quad (3.38)$$

De la Ecuación 3.38, se puede entender que, en las embarcaciones de alta velocidad con eje inclinado, la hélice dispone de un menor flujo axial en comparación con las embarcaciones de desplazamiento, afectando el desempeño de la hélice. Asimismo, a diferencia del empuje, esta expresión puede ser utilizada para embarcaciones con más de una línea de propulsión.

Otro factor referente a la interacción casco-hélice es la eficiencia del casco (η_H). Este parámetro relaciona la potencia requerida por la embarcación para su movimiento (EHP) y la potencia entregada por el sistema de propulsión (THP), como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$\eta_H = \frac{EHP}{THP} = \frac{R_T \cdot V_S}{T \cdot V_a} \quad (3.39)$$

En un sistema de propulsión convencional sin inclinación del eje, la eficiencia del casco es:

$$\eta_H = \frac{1 - t}{1 - w_e} \quad (3.40)$$

Utilizando las Ecuaciones 3.36 y 3.38 en la Ecuación 3.39, se obtiene la siguiente expresión para la eficiencia del casco en líneas de propulsión con eje inclinado.

$$\eta_H = \frac{R_T \cdot V_S}{\frac{R_T}{(1 - t) \cdot \cos(\tau + \varepsilon)} \cdot V_S \cdot (1 - w_e) \cdot \cos(\tau + \varepsilon)} = \frac{1 - t}{1 - w_e} \quad (3.41)$$

En conclusión, a pesar que la inclinación del eje afecta el desempeño del propulsor debido a la reducción de la velocidad de avance y a la mayor demanda de empuje, este no afecta a la eficiencia del casco η_H .

2.3 Desempeño del sistema de propulsión

Los principales componentes principales del sistema propulsivo convencional son el motor y la hélice, debido a la capacidad de entregar y demandar potencia, respectivamente. La caja reductora, el eje propulsor y los elementos de acoplamiento también son parte del sistema, no obstante, estos cumplen una función de transmisión de potencia. Por este motivo, el objetivo de optimizar un sistema de propulsión es la obtención de una mejor integración de las características y rendimientos de la hélice y del motor.

La optimización del sistema permitirá que, en la fase de diseño, el proyectista escoja la mejor combinación hélice-motor. También, permite mejorar el desempeño propulsivo de la embarcación cuando esta ya está en operación. Normalmente, este análisis se enfoca en la hélice por ser menos costosa su mejora o sustitución. Para mejorar el desempeño de una embarcación, previamente, un análisis de desempeño propulsivo es requerido para identificar el problema y encontrar una solución adecuada y más viable económicamente. La eficiencia propulsiva (η_T) es el factor que permitirá determinar si el sistema propulsivo instalado o seleccionado (en la fase preliminar del proyecto) es el mejor, es decir, el de mayor eficiencia entre otras combinaciones posibles. Una forma de expresar η_T es:

$$\eta_T = \eta_o \cdot \eta_{rr} \cdot \eta_H \cdot \eta_s = \frac{EHP}{BHP} \quad (3.42)$$

donde,

- η_o es la eficiencia de la hélice en aguas abiertas.
- η_{rr} es la eficiencia rotativa de la hélice.
- η_s es la eficiencia de transmisión, que comprende las pérdidas en el eje y en la caja reductora.

Es importante entender que el propulsor es quien controla la cantidad de potencia a ser entregada por el motor (BHP). Una hélice con geometría adecuada aprovecha eficientemente la potencia entregada por el motor. La potencia transmitida a la hélice (DHP) es recibida por la misma en forma de torque (Q_p) y rotación (n_p), transformando la potencia DHP en potencia de empuje (THP) que es la encargada de desplazar a la embarcación. La potencia THP será transmitida a la embarcación como empuje (T) y velocidad (V_a).

La Ecuación 3.44 indica que la potencia THP está destinada a producir mayor empuje o velocidad, dependiendo del tipo de embarcación. En el caso de las embarcaciones de alta velocidad, la hélice debe transmitir la potencia THP de modo que genere más velocidad, minimizando el empuje.

$$DHP = 2 \cdot \pi \cdot n_p \cdot Q_p \quad (3.43)$$

$$THP = T \cdot V_a \quad (3.44)$$

$$BHP = Q_M \cdot n_M \quad (3.45)$$

La Ecuación 3.43 indica que, según las características de la hélice, esta demanda mayor torque o rotación. Dependiendo del caso, se selecciona una caja reductora que relacione el torque y la rotación del motor (Q_M y n_M respectivamente) con el torque y la rotación entregada a la hélice (Q_p y n_p respectivamente).

La gran influencia de la hélice en el sistema propulsivo determina la importancia de conocer el comportamiento del propulsor y establecer expresiones que permitan determinar cuánto de potencia necesita la hélice para desplazar la embarcación en la velocidad deseada o proyectada.

2.3.1 Desempeño de la hélice

El factor más importante a determinar en el desempeño de la hélice es la relación entre la potencia recibida (DHP) y la entregada (THP) por la misma. Esta relación es representada por la eficiencia del propulsor (η_p), la cual es expresada en la Ecuación 3.46. La hélice óptima es aquella que presenta la mayor eficiencia en las condiciones de servicio de la embarcación.

$$\eta_p = \eta_o \cdot \eta_{rr} = \frac{THP}{DHP} = \frac{T \cdot V_a}{2 \cdot \pi \cdot n_p \cdot Q_p} \quad (3.46)$$

Las características geométricas de la hélice óptima dependen de la velocidad en la cual está operando la embarcación. El principal factor geométrico a definir en la hélice es el diámetro (D). Mayores eficiencias son alcanzadas con el aumento del diámetro. Sin embargo, este factor estará limitado por restricciones derivadas de la condición de navegación (calado y trim), de espacio (distancia entre casco y hélice) y de vibración. En la sección 2.1 se observó que las condiciones de navegación (calado y trim) varían en relación a la velocidad de la embarcación, influyendo en la determinación del diámetro máximo. Asimismo, cuanto mayor sea el margen entre la superficie libre y el contorno de la hélice, menos expuesta estará la hélice a la emersión. Como conclusión, el diámetro óptimo será el diámetro máximo.

Según Pinto (1995), para un diámetro definido, una hélice con menor número de palas (z) y menor razón de áreas ($BAR = A_E/A_O$) tiene una mayor eficiencia debido a la menor área de contacto entre la hélice y el agua, la cual es responsable de las pérdidas por resistencia friccional, cuando se mantienen constantes los demás parámetros. Adicionalmente, Pinto (1995) indica que cuanto menor la rotación del propulsor (n_p), el diámetro puede aumentarse, incrementando la eficiencia. Esta condición es difícil de alcanzar en las embarcaciones de alta velocidad porque su sistema propulsivo opera con altas rotaciones.

Por lo expuesto, se observa que la eficiencia de la hélice está relacionada con sus características geométricas (z , D , y BAR), la rotación y la velocidad de operación.

Existen estudios de series sistemáticas de hélices que relacionan el desempeño de la hélice con los parámetros mencionados. Entre las series más empleadas en las embarcaciones de alta velocidad están la serie Gawn y la serie B, siendo la serie B la menos utilizada en este tipo de embarcaciones. En las publicaciones de Bernitsas et al. (1981) y Radojic et al. (2009) se presentan las curvas de desempeño y las ecuaciones, de cada curva, desarrolladas para la serie B y la serie Gawn en aguas abiertas, respectivamente. Estas expresiones matemáticas y curvas permiten conocer el desempeño de la hélice. Similar a la eficiencia, el empuje y el torque también están asociados a los parámetros geométricos, a la rotación y la velocidad en estas series, siendo:

$$T = K_T \cdot \rho \cdot n_p^2 \cdot D^4 \quad (3.47)$$

y

$$Q_p = K_Q \cdot \rho \cdot n_p^2 \cdot D^5 \quad (3.48)$$

donde,

- K_T es el coeficiente de empuje.
- K_Q es el coeficiente de torque.
- ρ es la densidad del agua.

Estos coeficientes (K_T y K_Q) están en función de z , del paso (P), de D , de BAR , de n_p y de V_a . Por lo tanto, el torque puede expresarse como:

$$T = f(\text{geometría propulsor}, V_a, n_p) \quad (3.49)$$

De las Ecuaciones 3.46, 3.47 y 3.48, la eficiencia de la hélice (en estas series) en aguas abiertas se establece como:

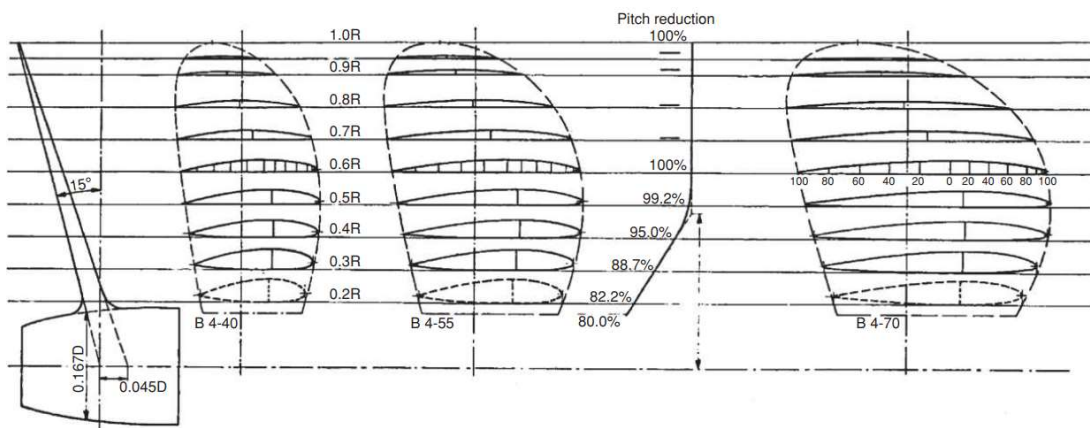
$$\eta_o = \frac{J \cdot K_T}{2 \cdot \pi \cdot K_Q} \quad (3.50)$$

Donde,

- $J = \frac{V_a}{n_p \cdot D}$, es el coeficiente de avance de la hélice.

a) **Serie B (Wageningen).** La serie B es la serie más empleada en la industria naval. Comúnmente, estos tipos de hélices se instalan en embarcaciones de desplazamiento, e.g. barcos portacontenedores, tanqueros, quimiqueros, remolcadores, etc. No obstante, según Faltinsen (2005) y Peck & Moore (1974), algunas embarcaciones de alta velocidad utilizan este tipo de propulsores, siempre y cuando la velocidad no exceda de 25 nudos, porque en velocidades mayores el riesgo de cavitación aumenta, afectando considerablemente su desempeño. Una pala típica de esta serie se muestra en la Figura 2.16.

Figura 2.16
Diagrama de Pala Típica de la Serie B



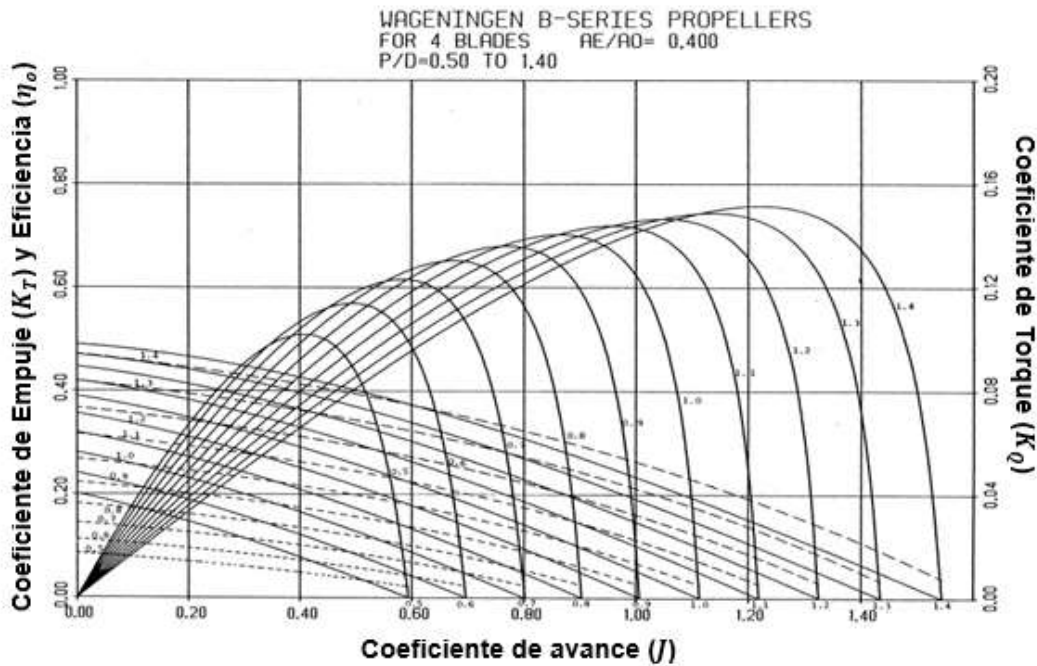
Nota: Este gráfico representa a la pala de una hélice de la serie B con $BAR = 0.40$ y $z = 4$. Fuente Molland et al. (2011).

En esta serie, se desarrollaron hélices con las siguientes características:

- $0.30 \leq BAR \leq 1.05$
- $2 \leq z \leq 7$
- $0.60 \leq P/D \leq 1.40$.

Bernitsas et al. (1981) realizaron pruebas en aguas abiertas para cada hélice, con el fin de obtener las curvas de desempeño de cada una, según las características geométricas de cada hélice. En la Figura 2.17, se presenta una curva de desempeño típica de esta serie, donde, en la abscisa está J y en la ordenada se determinan η_o , K_T y K_Q .

Figura 2.17
Gráfica de Desempeño Típico de la Serie B



Nota: Este gráfico representa las curvas de desempeño de una hélice de la serie B con $BAR = 0.40$ y $z = 4$. Fuente Bernitsas et al. (1981).

Asimismo, un análisis de regresión fue realizada con los datos adquiridos en las pruebas experimentales, obteniéndose fórmulas polinomiales que describen K_T y K_Q , las cuales se expresan en las siguientes ecuaciones:

$$K_T = \sum_{n=1}^{39} C_n \cdot (J)^{s_n} \cdot (P/D)^{t_n} \cdot (BAR)^{u_n} \cdot (z)^{v_n} \quad (3.51)$$

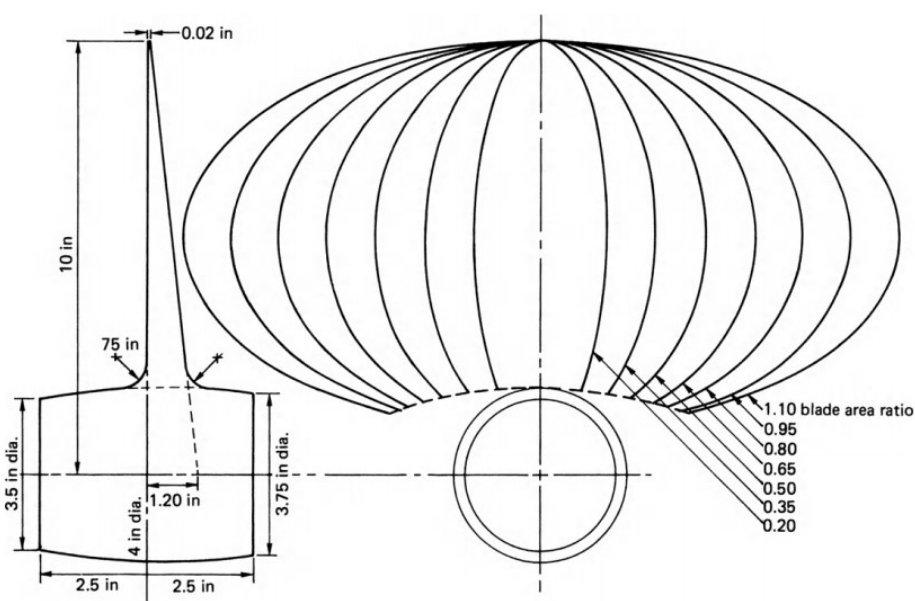
$$K_Q = \sum_{n=1}^{47} C_n \cdot (J)^{s_n} \cdot (P/D)^{t_n} \cdot (BAR)^{u_n} \cdot (z)^{v_n} \quad (3.52)$$

En las Ecuaciones 3.51 y 3.52, C_n , s_n , t_n , u_n y v_n son coeficientes polinomiales, cuyos valores se indican en el Anexo A.

Cuando $R_n \geq 2 \cdot 10^6$ (R_n , número de Reynolds), K_T y K_Q son corregidos debido al aumento de la turbulencia en la pala. Sin embargo, según Pinto (1995), esta corrección apenas genera una variación máxima del 2% de la eficiencia calculada.

- b) **Serie Gawn.** Las hélices de la serie Gawn son recomendadas para embarcaciones de alta velocidad (e.g. ferries, warships, patrulleras, pilot boat, etc.) debido a los bajos niveles de cavitación que presentan este tipo de hélices. Según Radojcic et al. (2009), las palas de este de este tipo de propulsores son de fácil fabricación y reparación, además, tienen un adecuado comportamiento operacional en condiciones de cavitación. Una pala típica de esta serie se muestra en la Figura 2.18.

Figura 2.18
Esquema de Pala Típica de la Serie Gawn



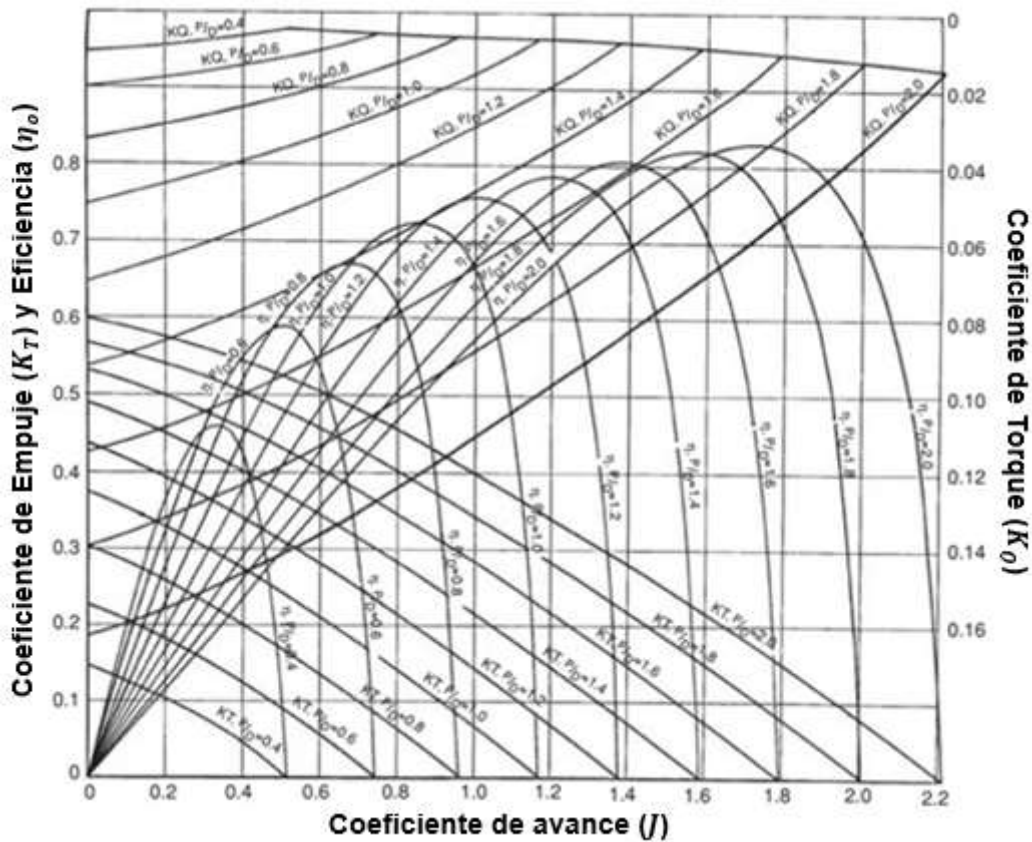
Nota: Este gráfico representa a la pala de una hélice de la serie Gawn. Fuente Carlton (2012).

Las hélices de esta serie tienen entre tres a cuatro palas. También presentan las siguientes características:

- $0.20 \leq BAR \leq 1.10$
- $0.40 \leq P/D \leq 2.00$

Análogamente a la serie B, según Carlton (2012), los modelos de la serie Gawn fueron evaluados en aguas abiertas, obteniéndose sus curvas de desempeño. De igual forma, las pruebas fueron realizadas en altas rotaciones en un túnel de cavitación para evaluar el efecto de la cavitación. Las curvas típicas de desempeño de esta serie se muestran en la Figura 2.19, donde, en la abscisa está J y en la ordenada se encuentran η_o , K_T y K_Q .

Figura 2.19
Gráfica de desempeño típico de la Serie Gawn



Nota: Este gráfico representa las curvas de desempeño de una hélice de la serie Gawn. Fuente Carlton (2012).

Algunos investigadores desarrollaron sus propios modelos matemáticos para describir K_T y K_Q de acuerdo con sus curvas de desempeño, siendo el modelo de Blount & Hubble (1981) el más confiable (ver sección 1.1). Las ecuaciones presentadas por Blount & Hubble, para determinar K_T y K_Q , tienen la misma configuración que las ecuaciones 3.51 y 3.52, respectivamente. Sin embargo, los valores de los coeficientes son diferentes. En el Anexo B se muestran los valores de los coeficientes polinomiales de la serie Gawn.

c) **Determinación de la potencia requerida por la hélice (DHP).** Matemáticamente, la hélice puede ser considerada como una función que, según sus características geométricas, proporciona el empuje necesario para desplazar a la embarcación a una determinada velocidad, empleando la velocidad V_a y la rotación n_p como datos de entrada, ver expresión 3.49.

No obstante, al momento de evaluar la potencia generada por el motor, o seleccionar un sistema de propulsión, se genera un caso inverso a lo expresado por la Ecuación 3.49. En otros términos, a partir del dato de salida de la función, calcular uno o más datos de entrada. De la Ecuación 3.49, el dato de entrada que está relacionado con la potencia BHP es la rotación. Por lo tanto, solucionar la Ecuación 3.53 se vuelve necesario para responder a esta pregunta.

$$n_p = f(\text{geometría propulsor}, V_a, T) \quad (3.53)$$

Para una hélice de la serie B, las fórmulas que relacionan las variables de la Ecuación 3.53 son las ecuaciones 3.47 y 3.51, obteniéndose:

$$K_T = \frac{T}{\rho * n_p^2 * D^4} = \sum_{n=1}^{39} C_n \cdot (J)^{s_n} \cdot (P/D)^{t_n} \cdot (BAR)^{u_n} \cdot (z)^{v_n} \quad (3.54)$$

Fijando n_p como única variable dependiente, la Ecuación 3.54 puede expresarse como:

$$U \cdot \frac{1}{n_p^2} = \sum_{n=1}^{39} V_n \cdot \left(\frac{1}{n_p}\right)^{s_n} \quad (3.55)$$

donde,

$$U = \frac{T}{\rho * D^4} \quad (3.56)$$

y

$$V_n = C_n \cdot \left(\frac{V_a}{D}\right)^{s_n} \cdot (P/D)^{t_n} \cdot (BAR)^{u_n} \cdot (z)^{v_n} \quad (3.57)$$

De la Tabla A.1, los coeficientes s_n son valores enteros entre 0 y 3, lo cual indica que la Ecuación 3.55 es un polinomio de tercer grado cuya variable es $1/n_p$. En

consecuencia, al desarrollar el polinomio de la Ecuación 3.55 y sustituyendo el término U/n_p^2 en el segundo miembro de la ecuación, se obtiene la siguiente expresión:

$$0 = \alpha \cdot \left(\frac{V_a}{D}\right)^3 \cdot \left(\frac{1}{n_p}\right)^3 + \left[\beta \cdot \left(\frac{V_a}{D}\right)^2 - U \right] \cdot \left(\frac{1}{n_p}\right)^2 + \gamma \cdot \frac{V_a}{D} \cdot \frac{1}{n_p} + \theta \quad (3.58)$$

donde,

- α es la suma de los coeficientes de $(J)^3$
- β es la suma de los coeficientes de $(J)^2$
- γ es la suma de los coeficientes de J
- θ es la suma de los coeficientes independientes.

La solución de la Ecuación 3.58 proporciona tres valores para $1/n_p$. Sin embargo, cada curva de desempeño de la hélice tiene un límite superior para J (ver figuras 3.17 y 3.19), siendo cero el límite inferior. De este modo, el valor de n_p (entre los 3 valores calculados) que proporcione un J dentro de los límites de la curva de desempeño, será la rotación indicada.

Con el valor de rotación y utilizando las ecuaciones 3.48 y 3.52, se obtiene el torque requerido por la hélice y, consecuentemente, utilizando la Ecuación 3.43 se obtendrá la potencia DHP. Adicionalmente, la eficiencia de la hélice en aguas abiertas se calcula empleando la Ecuación 3.50.

En la sección 2.2, se observó que la presencia del casco altera el flujo que entra en la hélice, generando que la eficiencia real de la hélice sea menor que su eficiencia en aguas abiertas. Razón por la cual, la eficiencia η_o será corregida empleando la eficiencia rotativa relativa η_{rr} , Ecuación 3.46. Según Hadler (1966), los valores para η_{rr} están normalmente entre 0.97 y 1.05 para embarcaciones de alta velocidad con eje inclinado. Por otra parte, Molland et al. (2011) mencionan que esta eficiencia depende de varios parámetros, siendo el diámetro de la hélice, el paso y la forma del casco; los de mayor influencia en este factor.

Hadler también menciona que las pérdidas en la transmisión están entre 1% y 2.5% del BHP ($0.975 \leq \eta_s \leq 0.99$). De este modo, la potencia entregada por el motor se estima aplicando la siguiente expresión:

$$BHP = \frac{DHP}{\eta_s} \quad (3.59)$$

2.3.2 Cavitación en la hélice

Las condiciones críticas (altas velocidades, fluctuación de presiones y variaciones de calado y trim) en las cuales la hélice, en las embarcaciones de alta velocidad, está sometida, motivan la necesidad de analizar los niveles de cavitación en las hélices de este tipo de embarcaciones. En la sección anterior se estableció que el desempeño de la hélice depende de sus características geométricas y viceversa. En otras palabras, las características geométricas o restricciones de algunos parámetros de la hélice están en función del desempeño de la hélice.

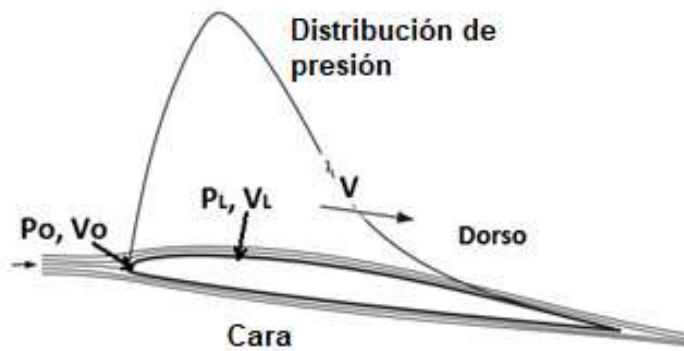
No obstante, las características geométricas de la hélice también se restringen con el objetivo de evitar altos niveles de cavitación, disminuyendo las pérdidas en el desempeño del propulsor.

Desde el punto de vista físico, la cavitación es el fenómeno que ocurre cuando la presión en alguna sección (o algún punto) de la pala decrece hasta ser igual o menor que la presión de vapor de agua (p_v), transformando el fluido, en esta sección, en vapor. El vapor generado transita por otras áreas del fluido en forma de burbujas. Cuando las burbujas pasan por regiones de mayor presión, estas colapsan e implosionan.

La formación de vapor y colapso de las burbujas alteran el flujo a lo largo de la superficie de la pala, modificando también las propiedades del perfil efectivo de la pala. En consecuencia, el empuje y el torque sufren reducciones y la eficiencia disminuye. Adicionalmente, el colapso de las burbujas genera erosiones en la pala y en el casco (en caso de que el casco esté considerablemente próximo a la hélice), causando daños en la estructura. Por otro lado, las variaciones en el flujo, causadas por el efecto de la cavitación, producen vibraciones en la estructura de la pala y en la región de popa del casco; lo cual puede generar fisuras. Una hélice con adecuadas características geométricas puede evitar estos efectos.

Figura 2.20

Distribución de la Presión y del Fluido en una Sección de la Pala



Nota: Imagen adaptada de Molland et al. (2011).

Analizando la sección de la pala de la Figura 2.20, se observa que la disminución de la presión ocurre en el dorso de la pala, alcanzando el menor valor en la región de mayor espesor. Conforme a lo mencionado anteriormente, para evitar la cavitación, la presión en cualquier punto de esta sección debe ser mayor que la presión de vapor, por lo tanto:

$$p_L \geq p_v \quad (3.60)$$

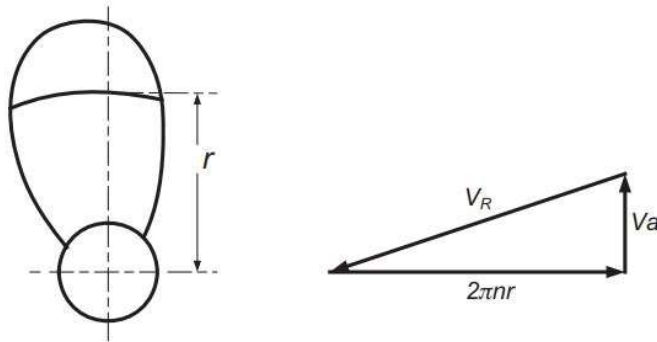
Utilizando como referencia la presión hidrostática absoluta (p_o) para calcular la presión por carga estática ($p_o - p_v$), y comparando estas magnitudes con la presión de carga dinámica (q), obtenemos:

$$\frac{p_o - p_L}{q} \leq \frac{p_o - p_v}{q} \quad (3.61)$$

Donde,

- p_v depende de la temperatura del agua. En la publicación de Faltinsen (2005), se encuentran valores de esta presión para cada temperatura.
- $q = 0.5 \cdot \rho \cdot V_R^2$
- V_R es la velocidad media del fluido en el contorno de la sección de la pala, también llamada velocidad relativa.

Figura 2.21
Velocidad Relativa en una Sección de la Pala



Fuente: Molland et al. (2011).

De la Figura 2.21, la velocidad relativa es la resultante de la suma vectorial de la velocidad de avance de la hélice y la velocidad rotacional a una determinada distancia del centro de la hélice (radio, r). De esta forma, para una sección de pala, la velocidad relativa puede expresarse como:

$$V_R = \sqrt{V_a^2 + (2 \cdot \pi \cdot n \cdot r)^2} \quad (3.62)$$

La presión estática en cada sección de la pala (p_o), independientemente del radio, será calculada en el centro de la hélice. De acuerdo a Carlton (2012), esta presión (p_o) es la suma de la presión atmosférica (p_{Atm}) y la presión hidrostática en el centro de la hélice; siendo:

$$p_o = p_{Atm} + \rho \cdot g \cdot h_{prop} \quad (3.63)$$

El primer miembro de la Inecuación 3.61, es conocido como coeficiente de distribución de presión ($\Delta p/q$), y el segundo miembro es llamado número de cavitación (σ). Por lo tanto, cuanto mayor sea el número de cavitación, menor es el riesgo de cavitación en la sección de la pala.

$$\frac{\Delta p}{q} \leq \sigma \quad (3.64)$$

Sin embargo, para evaluar la cavitación de la hélice por sección de pala es un proceso demasiado tedioso, que puede involucrar un análisis por elementos finitos o

diferencias finitas. Para un análisis práctico de la cavitación en la hélice es recomendable utilizar valores medios del número de cavitación y del coeficiente de distribución de presión.

El valor medio del número de cavitación en el propulsor (σ_o) puede ser determinado empleando la presión dinámica media, calculándose la velocidad relativa de la sección localizada a $0.7.r$ del centro. De este modo, la Ecuación 3.62 quedará expresada como.

$$V_R = \sqrt{V_a^2 + (0,7.\pi.D.n)^2} \quad (3.65)$$

Similar a la sección de pala, la presión estática media en el propulsor es calculada en su centro.

El término Δp medio representa la diferencia de presiones entre el borde de ataque y el dorso de la pala. Asumiendo que la presión en el borde ataque es igual a la presión en la cara de la pala, el término Δp puede expresarse como:

$$\Delta p = \frac{T}{A_p} \quad (3.66)$$

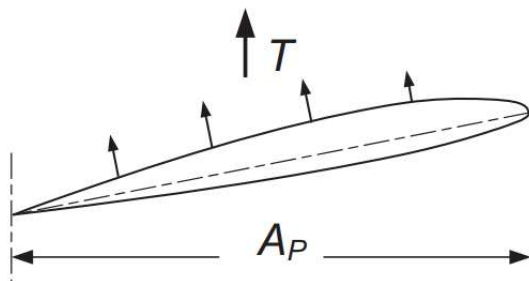
donde, A_p es el área proyectada de la hélice (ver Figura 2.22).

Dividiendo la Ecuación 3.66 entre la presión por carga dinámica q , se obtiene:

$$\tau_o = \frac{\Delta p}{q} = \frac{T}{0,5.\rho.V_R^2 A_p} \quad (3.67)$$

donde, el término τ_o es conocido como coeficiente de carga del empuje.

Figura 2.22
Presión Media en la Hélice



Fuente: Molland et al. (2011).

Para calcular A_p , Gawn & Burrill (1957) establecieron una relación empírica entre A_p y A_E , la cual se muestra en la siguiente expresión:

$$A_p = A_E * (1.067 - 0.229 * (P/D)) \quad (3.68)$$

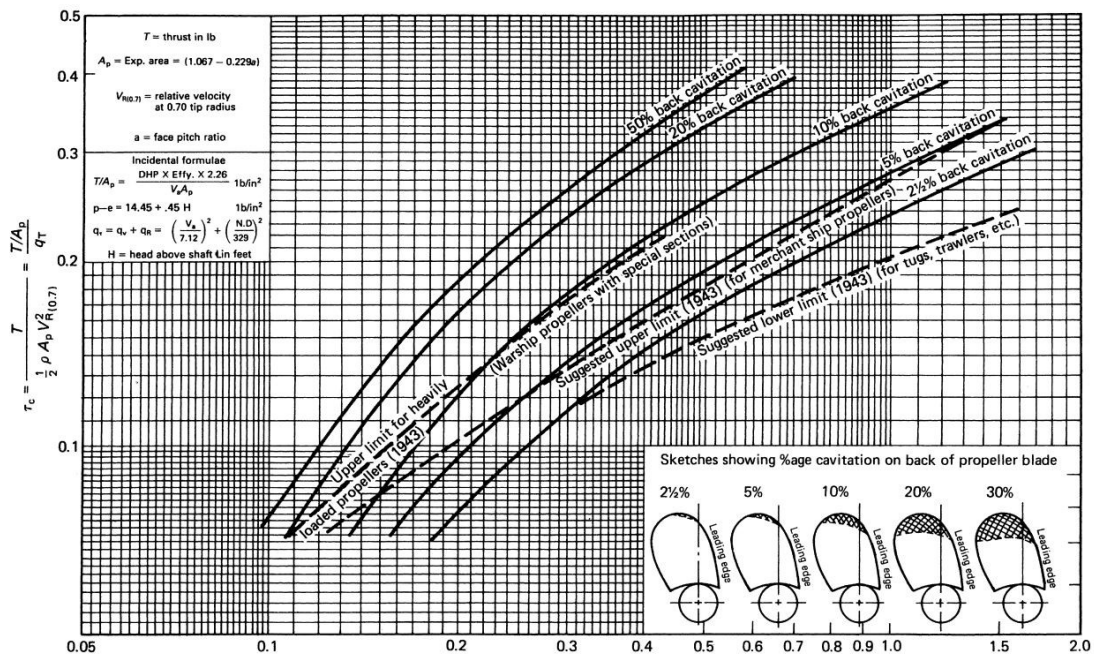
En conclusión, para evitar la cavitación en la hélice, se debe cumplir la siguiente condición:

$$\tau_o \leq \sigma_o \quad (3.69)$$

Sin embargo, cabe indicar que la Inecuación 3.69 no se cumplirá en toda el área de la pala debido a que τ_o y de σ_o en la hélice fueron determinados a partir de valores medios de presión y velocidad, existiendo zonas de la pala donde estos coeficientes de cavitación serán distintos. Por tal motivo, el fenómeno de cavitación podrá estar presente sobre todo en casos críticos donde $\tau_o \approx \sigma_o$, siendo $\tau_o = \sigma_o = \tau_c$ la condición más crítica. El porcentaje del área de pala, que está sujeta a cavitación, depende de factores geométricos, tales como la forma de la pala; la cual varía en cada tipo o serie de hélice.

Con el objetivo de establecer restricciones para cada tipo de embarcación y disminuir el riesgo de daños por cavitación, Burrill desarrolló un diagrama, llamado diagrama de Burrill (Figura 2.23) para verificar si la hélice está dentro de los límites de cavitación permitidos, basándose en τ_c y σ_o .

Figura 2.23
Diagrama de Burrill



Fuente: Carlton (2012)

El gráfico de la Figura 2.23 fue producto de pruebas realizadas en aguas abiertas con varios propulsores en un túnel de cavitación. Cada curva del diagrama representa el límite de cavitación para diferentes tipos de embarcaciones. Molland et al. (2011) recomiendan que, en el caso de las embarcaciones de alta velocidad, el límite utilizado sea la curva de 10% de cavitación o la curva para hélices de barcos de guerra (*warship propellers with special sections*).

Para fines prácticos, un análisis de regresión fue realizado con los valores límites de cavitación para embarcaciones de alta velocidad, resultando:

$$\tau_c = 0.43(\sigma_o - 0.02)^{0.71} \quad (3.70)$$

y

$$\tau_c = 0.1427 \cdot \ln(\sigma_o) + 0.3526 \quad (3.71)$$

donde la Ecuación 3.70 representa los límites de cavitación para hélices de barcos de guerra y la Ecuación 3.71 representa una cavitación máxima de 10%.

Según Molland et al. (2011), la disminución o descomposición del empuje, por efecto de la cavitación, no aparecerá hasta que la cavitación desarrollada en el dorso de la pala no supere el 10% aproximadamente.

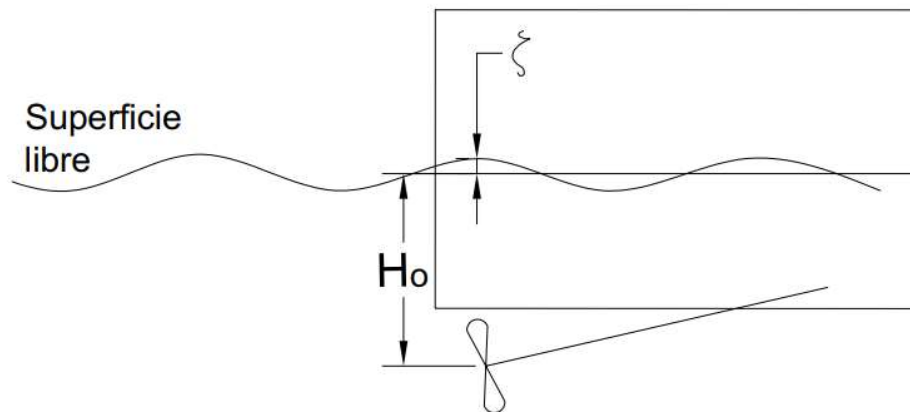
a) Profundidad del propulsor. En la Ecuación 3.63, se observa que la cavitación en la hélice depende de su profundidad. Cuanto mayor la profundidad de la hélice, menor es el nivel de cavitación. En el caso de las embarcaciones de desplazamiento, la profundidad de la hélice (h_{prop}) se calcula a través de la siguiente expresión (ver Figura 2.24):

$$h_{prop} = \zeta + H_o \quad (3.72)$$

Donde, ζ es la amplitud de onda y H_o la profundidad de la hélice en la condición inicial ($V_S = 0$).

Figura 2.24

Esquema de Ubicación de la Hélice en el Régimen de Desplazamiento



En el caso de las embarcaciones de alta velocidad, como se vio en la sección 2.1, la profundidad de la hélice varía en cada condición de operación (velocidad alcanzada) debido a los efectos de planeo, los cuales generan variaciones en el calado y en el ángulo de trim.

La Figura 2.25 muestra un casco planeador con popa espejo en una determinada condición de operación, con un ángulo de trim τ y un calado específico. La combinación de estos parámetros define una longitud de quilla mojada L_K . Al realizar un análisis geométrico del esquema mostrado en la Figura 2.25, se obtiene una expresión para el cálculo de la profundidad de la hélice en altas velocidades.

$$h_{prop} = (L_K - e) \cdot \sin \tau - d \cdot \cos \tau \quad (3.73)$$

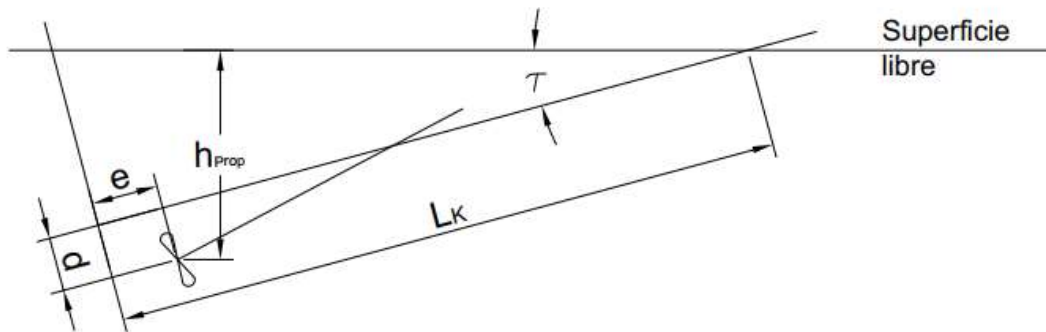
donde,

- d es la diferencia entre la profundidad de la hélice y el calado ($H_o - T_M$), cuando $V_S = 0$.
- e es la distancia longitudinal entre la popa y la hélice.

Adicionalmente, de las ecuaciones 3.6 y 3.9, se puede obtener una expresión para calcular L_K , la cual se muestra a continuación:

$$L_K = b \cdot \lambda + \frac{b}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\tan \beta}{\tan \tau} \quad (3.74)$$

Figura 2.25
Esquema de Ubicación de la Hélice en Altas Velocidades



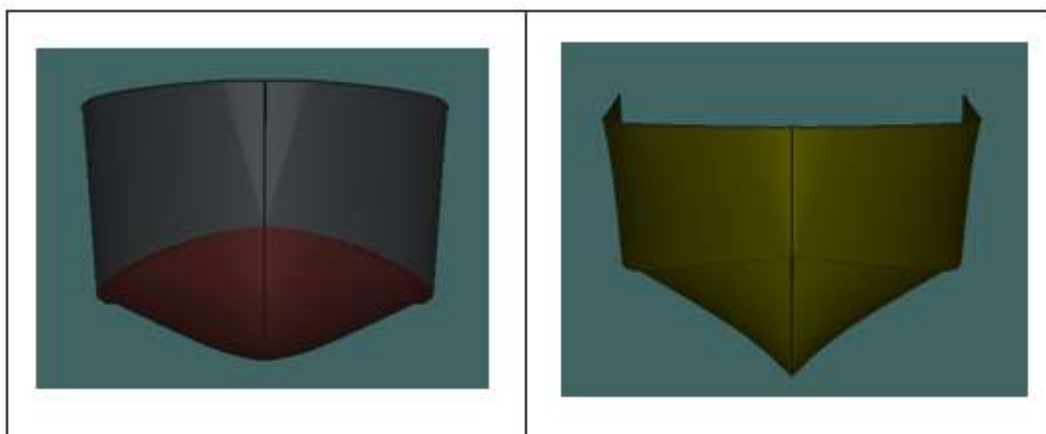
En altas velocidades, la ola generada en el contorno del casco es mínima, a diferencia del régimen de desplazamiento (ver sección 2.1). Por lo tanto, es posible omitir la amplitud de ola en el cálculo de la profundidad de la hélice.

2.4 Marco conceptual

2.4.1 Cascos de alta velocidad

Los cascos de alta velocidad, por su forma, se dividen en cascos prismáticos (casco con codillos y astilla muerta constante), cascos con codillo y astilla muerta variable, cascos redondos con codillos y cascos redondos sin codillo (*round bilge vessels*). Los dos primeros tipos de casco son característicos de una embarcación de planeo y los otros de una embarcación de semiplaneo, ver Figura 2.26.

Figura 2.26
Ejemplos de Tipos de Casco de Alta Velocidad



Nota: Lado derecho se muestra un casco típico de semiplaneo. Lado izquierdo muestra un casco típico de planeo.

2.4.2 Casco planeador

Los cascos planeadores son los que están diseñados hidrodinámicamente para operar en el régimen de planeo. La distribución de presión hidrodinámica que actúa en el fondo del casco planeador genera que este tipo de cascos alcance la condición de planeo plenamente desarrollado, diferente de los cascos de semiplaneo, que están diseñados para operar en el régimen de semiplaneo.

2.4.3 Desempeño propulsivo

Son las características de operación del sistema de propulsión en una embarcación. Estas características pueden ser el torque generado por el motor, rotación del eje, potencias en la línea de propulsión (BHP, DHP, THP y EHP), índices de cavitación y parámetros de operación de la hélice como torque, empuje y eficiencia. Sin embargo, la característica más importante del desempeño propulsivo es la eficiencia propulsiva o eficiencia total de propulsión, la cual es el producto de todas las eficiencias de la línea de propulsión, permitiendo evaluar y optimizar la condición energética del sistema de propulsión.

2.4.4 Comportamiento hidrodinámico

El comportamiento hidrodinámico representa la combinación de parámetros hidrodinámicos cuando la embarcación opera a una cierta velocidad. Es decir, para una determinada velocidad, la embarcación tendrá un ángulo de trimado, calado, resistencia al avance, profundidad de hélice, coeficientes de interacción casco-hélice, longitud de onda formada, etc. Estos parámetros podrán variar de acuerdo a la velocidad que navegue la embarcación, observándose variaciones más significativas en altas velocidades. Cabe recordar que el comportamiento hidrodinámico afectará desempeño propulsivo de la embarcación, razón por la cual, se deberá realizar un adecuado análisis de este factor para estimar y optimizar el desempeño propulsivo. Asimismo, existen diferentes tipos de cascos para cada función que deba cumplir la embarcación, siendo los comportamientos hidrodinámicos de cada tipo de casco diferentes entre sí.

2.4.5 Número de Froude volumétrico

Es un coeficiente hidrodinámico de velocidad que, similar al coeficiente de Taylor y en número de Froude, relaciona las fuerzas de inercia y de gravedad; utilizando el volumen sumergido de la embarcación en vez de la eslora de flotación. Sin embargo, este coeficiente no permite establecer límites de los regímenes hidrodinámicos. El número de Froude volumétrico se expresa como:

$$Fn_{\nabla} = \frac{V_S}{\sqrt{g \cdot \nabla^{1/3}}} = Fn \cdot \sqrt{\frac{L_{wl}}{\nabla^{1/3}}} \quad (3.75)$$

Donde,

- ∇ es el volumen sumergido del casco cuando $V_S = 0$.
- V_S es la velocidad de la embarcación.
- g es la gravedad.

2.4.6 Ventilación en la hélice

Es el fenómeno que se genera cuando parte o toda de la hélice emerge del agua, es decir no está completamente sumergida. Normalmente, esto ocurre cuando la embarcación está en una zona de poca profundidad u opera a altas velocidades. La ventilación genera consecuencias negativas en la embarcación como pérdida de empuje, pérdida de velocidad, aumento de ruido, aumento de niveles de vibración, daños internos en el motor y daños a la hélice por causa de las erosiones.

CAPITULO III

Desarrollo del Trabajo de Investigación

Como se mencionó en el capítulo de Generalidades, uno de los objetivos del presente trabajo es desarrollar una herramienta computacional que permita una evaluación general y práctica del desempeño del sistema propulsivo de las embarcaciones de alta velocidad, específicamente los cascos planeadores, el cual pueda estimar la rotación y potencia BHP requerida por la hélice, además de indicar el nivel de cavitación de la hélice. El algoritmo de este programa computacional fue desarrollado con el *software* LabVIEW® (Figura 3.1), que, a diferencia de otras plataformas de programación, utiliza un lenguaje de programación gráfica. Este programa unifica los métodos y teorías desarrollados en el capítulo 2.

Figura 3.1
Software LabVIEW



Este algoritmo, a partir de los datos geométricos de la embarcación y de la hélice (datos de entrada), estima la potencia BHP, la eficiencia total (η_T) y el nivel de cavitación en relación a un rango de velocidades (resultados del algoritmo). Estos resultados se expresan en gráficos que describen el comportamiento de la potencia BHP y la eficiencia η_T en relación a la velocidad, permitiendo identificar el comportamiento de estos factores

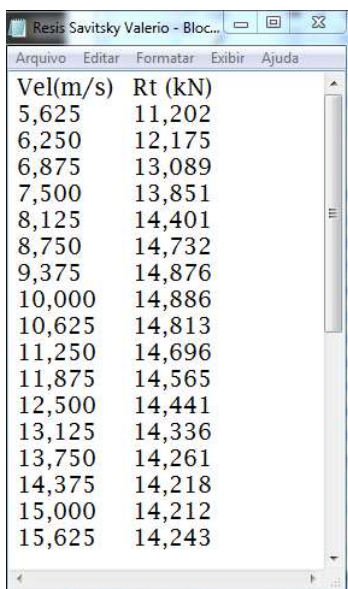
en el régimen de desplazamiento ($Fn < 0.40$) y en altas velocidades ($Fn \geq 0.40$). Adicionalmente, para verificar el buen desempeño de la hélice, el programa muestra el riesgo de cavitación a través de un gráfico.

3.1 Estimación de la resistencia al avance y factores hidrodinámicos

En los cascos de planeo, el método implementado para calcular la resistencia en el régimen de desplazamiento es el método propuesto por Holtrop, limitando su aplicación hasta $Fn = 0,40$ ($Q_t = 1,34$). En altas velocidades ($Fn > 0,40$), una rutina que lee y procesa valores de la resistencia, contenida en archivos de texto, es implementada (Figura 3.3). En el presente trabajo, se obtendrán los valores de resistencia a través del método de Savitsky debido a su aceptable precisión en este tipo de cascos. La Figura 3.2 muestra el formato del archivo que es leído y procesado por el algoritmo. Para estimar la resistencia en una velocidad específica, un procesamiento de cálculo por interpolación es implementado en esta rutina.

Figura 3.2

Formato del archivo procesado por el algoritmo para calcular la resistencia.

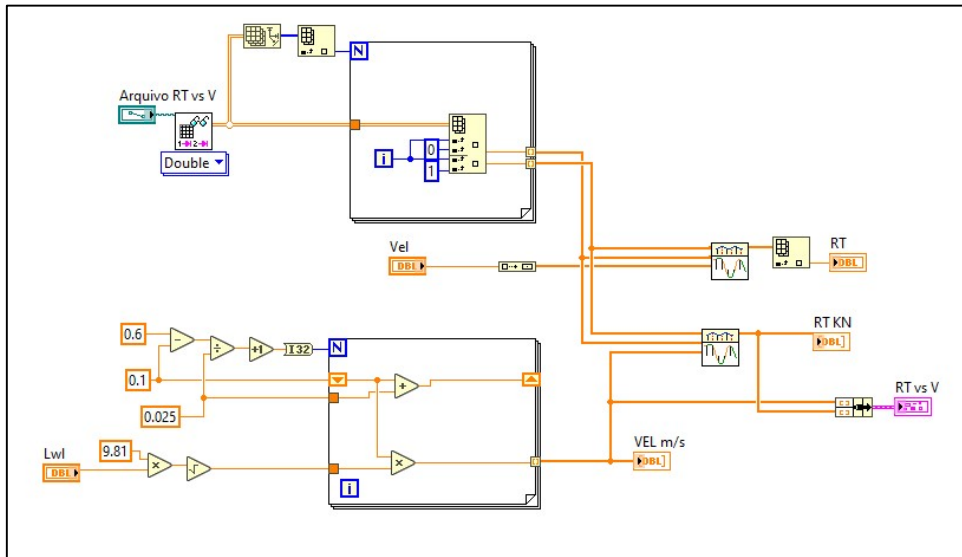


Vel(m/s)	Rt (kN)
5,625	11,202
6,250	12,175
6,875	13,089
7,500	13,851
8,125	14,401
8,750	14,732
9,375	14,876
10,000	14,886
10,625	14,813
11,250	14,696
11,875	14,565
12,500	14,441
13,125	14,336
13,750	14,261
14,375	14,218
15,000	14,212
15,625	14,243

En la Figura 3.3, se muestra el diagrama de bloques (algoritmo en LabVIEW) implementado para calcular la resistencia en todo el rango de velocidades y en una velocidad específica, mediante la lectura y procesamiento de archivo de datos.

Figura 3.3

Diagrama de bloques para el cálculo de la resistencia al avance.



Para determinar el trim dinámico en altas velocidades en los cascos de planeo, semejante al cálculo de la resistencia, se implementa una rutina que lee y procesa archivo de datos, donde están los ángulos de trim e sus respectivas velocidades. El formato que debe tener el archivo de datos, para ser procesado por el algoritmo, se muestra en la Figura 3.4. Para calcular el trim en una velocidad específica, el algoritmo interpola los valores de trim adquiridos.

Figura 3.4

Formato del archivo procesado por el algoritmo para estimar el trim dinámico.

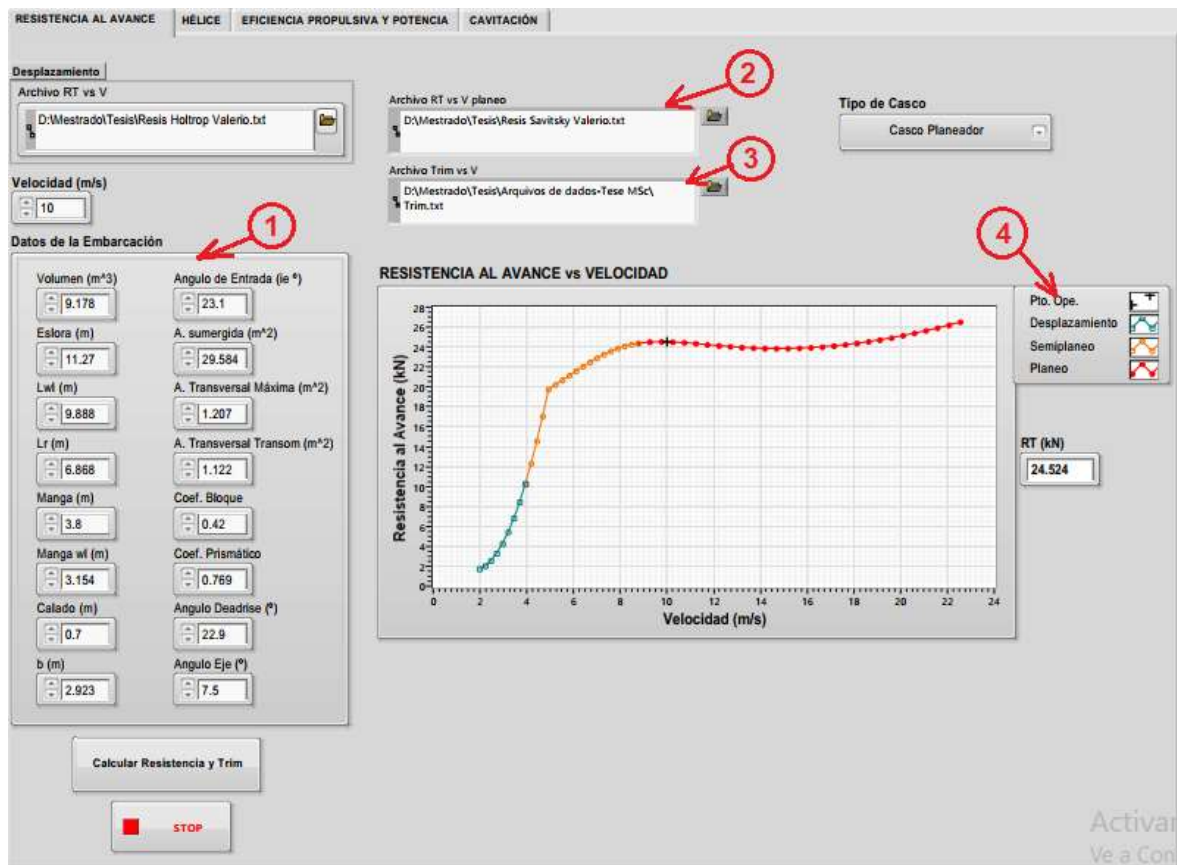
Trim - Bloco de notas

Vel(m/s)	Trim(°)
5.625	4.523
5.938	4.699
6.250	4.874
6.563	5.043
6.875	5.200
7.188	5.339
7.500	5.456
7.813	5.548
8.125	5.613
8.438	5.652
8.750	5.665
9.063	5.656
9.375	5.626
9.688	5.579
10.000	5.518
10.313	5.445
10.625	5.363

Para generar los valores de trim en archivo de texto, se pueden utilizar softwares comerciales como el Maxsurf Resistance, el cual tiene implementado el método de Savitsky para cálculo de trim y resistencia.

La Figura 3.5 muestra los resultados de la resistencia estimada por el programa en forma de gráfico. Este gráfico permite analizar la resistencia en los regímenes de desplazamiento, semiplaneo y planeo. Los tres regímenes se diferencian según la leyenda indicada en el ítem 4 de la Figura 3.5.

Figura 3.5
Ventana de resultados del cálculo y análisis de la resistencia al avance.



Nota: Esta ventana muestra los valores y gráfica de resistencia al avance. El gráfico y los valores mostrados son apenas un ejemplo.

Para calcular la resistencia en un casco planeador utilizando el algoritmo, el archivo de datos, que contiene los valores de resistencia en altas velocidades, debe ser insertado en el ítem 2 de la Figura 3.5. Adicionalmente, los siguientes parámetros deben ser ingresados en el ítem 1 de la Figura 3.5, a fin de que el algoritmo calcule la resistencia del casco planeador en el régimen de desplazamiento:

- Eslora entre perpendiculares.
- Eslora de flotación.
- Calado.
- Manga de flotación.
- Volumen.
- Área de espejo de popa.
- Centro de carena longitudinal relativo a popa.
- Área transversal máxima.
- Coeficiente prismático.
- Mitad del ángulo de entrada en la línea de agua (i_e).
- Coeficiente de bloque.
- Superficie mojada.

El archivo de datos del trim se inserta en el ítem 3 de la Figura 3.5. A partir de estos datos, el algoritmo calculará el trim en diferentes velocidades, conforme lo mencionado anteriormente.

Paralelamente a la estimación de la resistencia al avance, los coeficientes de estela y de reducción de empuje son calculados a través de la implementación del método de Holtrop, para $Fn_{\nabla} < 1,20$, en el algoritmo. Por otra parte, para velocidades mayores ($Fn_{\nabla} \geq 1,20$), las Ecuaciones 3.30 y 3.35 son utilizadas en el algoritmo para calcular el w y el t , respectivamente. Para que el algoritmo realice este cálculo, además de los datos utilizados en el cálculo de la resistencia por Holtrop, la eslora y la manga moldeada deberán ser ingresadas en el programa (ítem 1 de la Figura 3.5).

En la Figura 3.6, se muestra el diagrama de bloques implementado para calcular el coeficiente de estela en altas y bajas velocidades. Por otro lado, en la Figura 3.7, se muestra el diagrama de bloques implementado para calcular el coeficiente de reducción de empuje.

Figura 3.6

Diagrama de bloques implementado para cálculo de estela total.

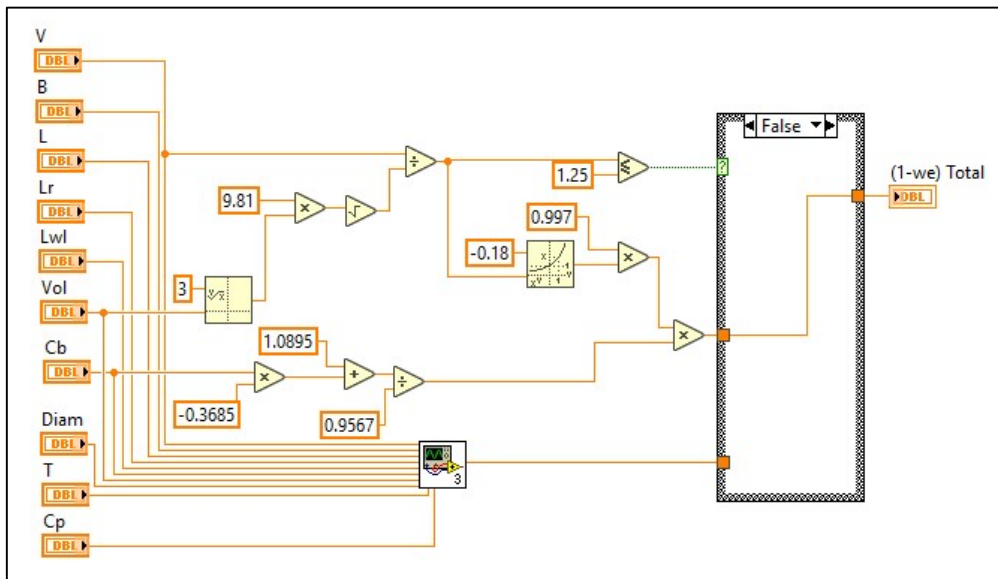
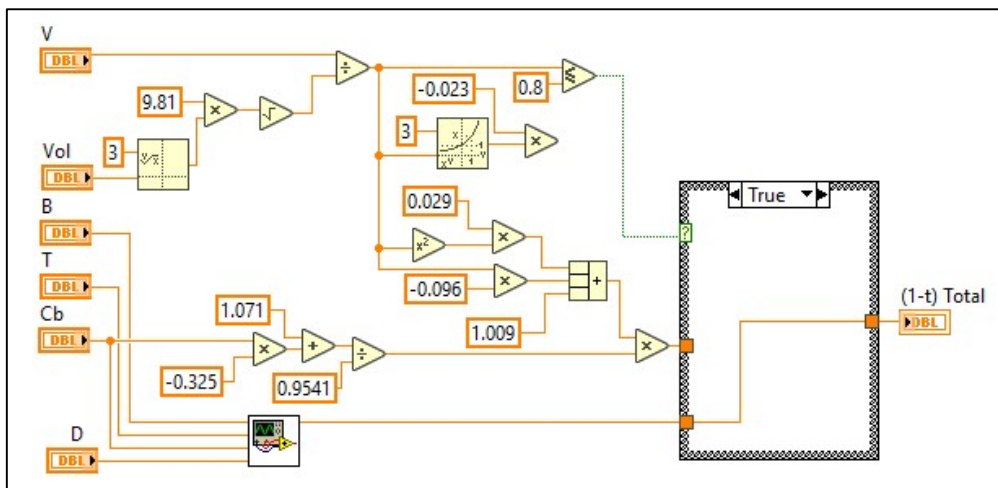


Figura 3.7

Diagrama de bloques implementado para cálculo del coeficiente de reducción de empuje.



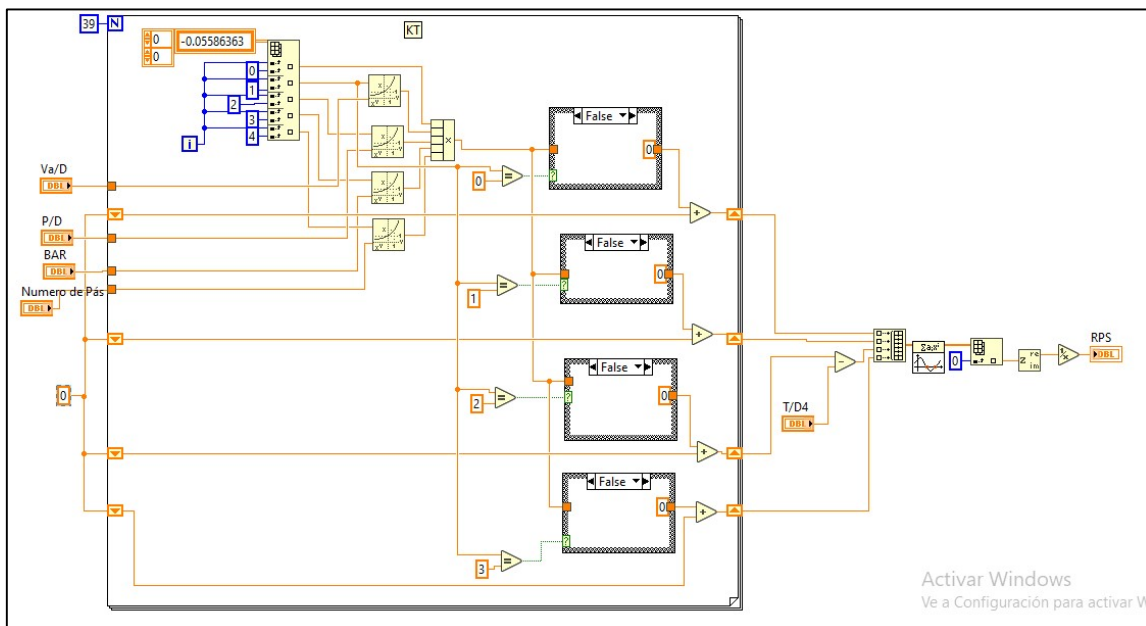
Seguidamente, el empuje (T) y la velocidad de avance (V_a) son calculados, utilizando como datos de entrada la resistencia calculada, los coeficientes de la interacción casco-hélice, el ángulo de trim y el ángulo del eje. Para realizar este cálculo, las ecuaciones 3.37 y 3.38 son implementadas en el algoritmo. La ecuación 3.37 utiliza $N_p = 2$ debido a que esta tesis es enfocada en embarcaciones con dos ejes de propulsión. Cabe indicar que el ángulo del eje debe ser ingresado en el ítem 1 de la Figura 3.5.

3.2 Metodología de cálculo de la RPS, torque y potencia de la hélice

Conforme a lo mencionado en el capítulo 1, hélices de la serie Gawn y serie B son utilizadas en este trabajo. Por lo tanto, se desarrolló una rutina que calcula eficiencia η_o , rotación (n_p) y torque (Q), a partir de los datos geométricos de la hélice para cada serie mencionada. Estas dos rutinas emplean la Ecuación 3.58 para calcular la rotación del propulsor, debido a que los polinomios característicos de las dos series tienen la misma forma polinómica, variando solo sus coeficientes. El algoritmo desarrollado para implementar de la Ecuación 3.58 en el programa se muestra en la Figura 3.8. Posteriormente, con los parámetros de desempeño de la hélice (K_T , K_Q - J) ya calculados, el torque y la eficiencia del propulsor se estiman fácilmente.

Figura 3.8

Algoritmo iterativo implementado para calcular las revoluciones de la hélice a una velocidad determinada.



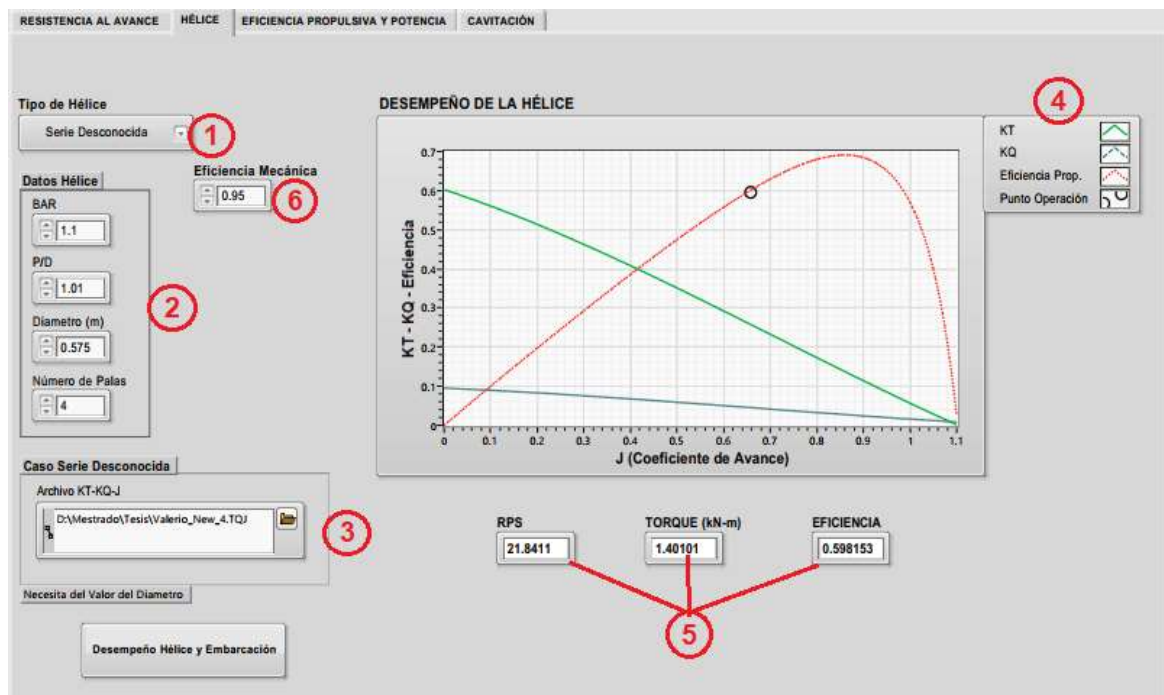
Adicionalmente, otra rutina, para estimar η_o , n_p y Q , es implementada para casos donde la serie de la hélice es desconocida. En este caso, un archivo de datos con los valores K_T , K_Q - J de la hélice debe ser insertado en el programa.

La Figura 3.9 muestra el gráfico de desempeño de la hélice junto con su punto de operación calculado, donde, las gráficas de K_T , K_Q y de η_o son representadas según la

leyenda, indicada en el ítem 4 de la Figura 3.9. Además, los valores de la rotación (RPS), del torque y de la eficiencia de la hélice, calculados para una determinada velocidad, son mostrados en el ítem 5 de la Figura 3.9.

En el ítem 1 de la Figura 3.9, la serie de la hélice es seleccionada, donde se puede elegir entre la serie B, la serie Gawn y serie desconocida (en caso la serie de la hélice no sea conocida). En el ítem 2 de esta figura, los datos de entrada son digitados cuando la serie de la hélice es la serie B o la serie Gawn. En caso la serie de la hélice sea desconocida, los datos de J , K_T y K_Q son insertados a través de un archivo de texto en el ítem 3 de esta figura.

Figura 3.9
Ventana de resultados del cálculo y análisis del desempeño de la hélice.



Nota: Esta ventana muestra los valores y gráfica del desempeño del propulsor a una determinada velocidad. El gráfico y los valores mostrados son apenas un ejemplo.

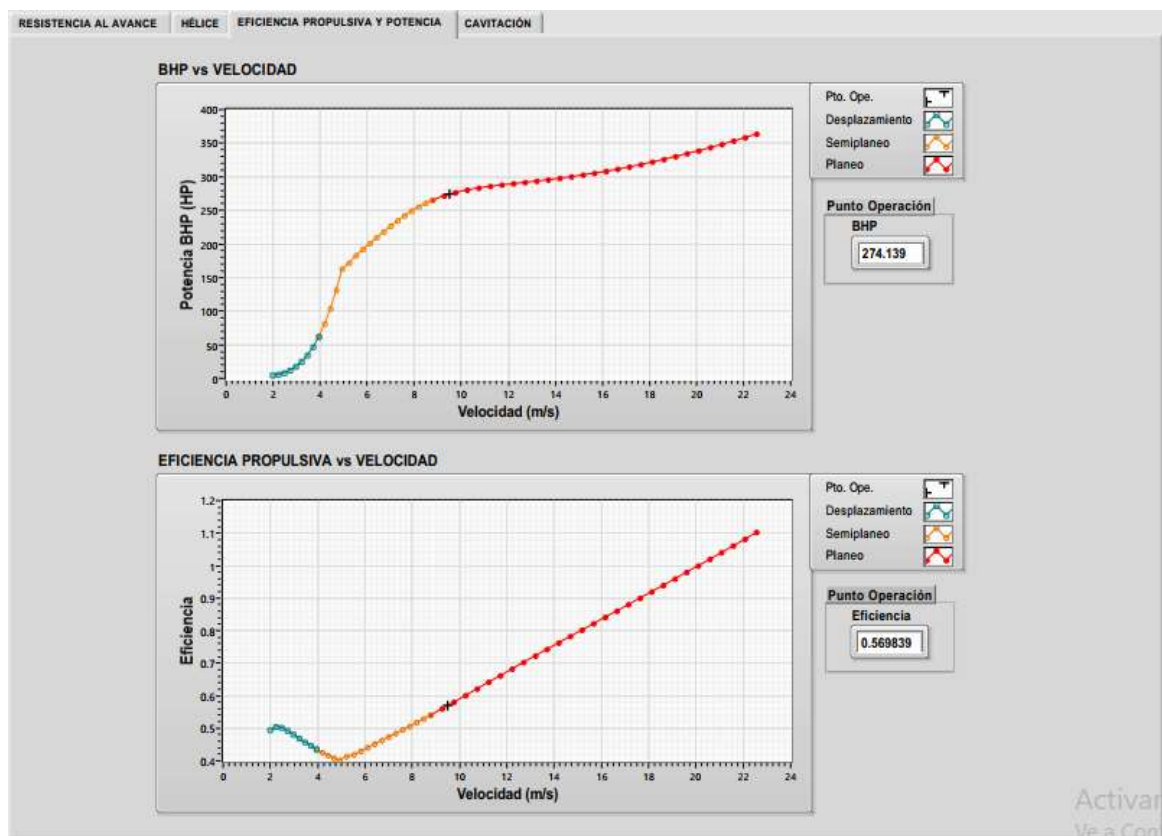
3.3 Metodología de cálculo del desempeño propulsivo y la cavitación

Finalmente, la potencia BHP y la eficiencia total (del sistema de propulsión) son estimadas a partir de los valores calculados anteriormente. Para calcular la potencia BHP, las Ecuaciones 3.43 y 3.59 se implementan en el algoritmo, donde el valor de la eficiencia

de transmisión (o eficiencia mecánica) queda a criterio del usuario. El valor de la eficiencia mecánica se introduce en el ítem 6 de la Figura 3.9. Por otro lado, la Ecuación 3.42 esta implementada en el algoritmo para calcular la eficiencia total. Análogamente a la resistencia, la potencia BHP y el rendimiento η_T fueron calculados para velocidades que varían desde el desplazamiento hasta altas velocidades, tal como se muestra en la Figura 3.10. Los regímenes hidrodinámicos están representados según la leyenda mostrada en esta figura.

Figura 3.10

Ventana de análisis del comportamiento de la potencia y la eficiencia propulsiva.

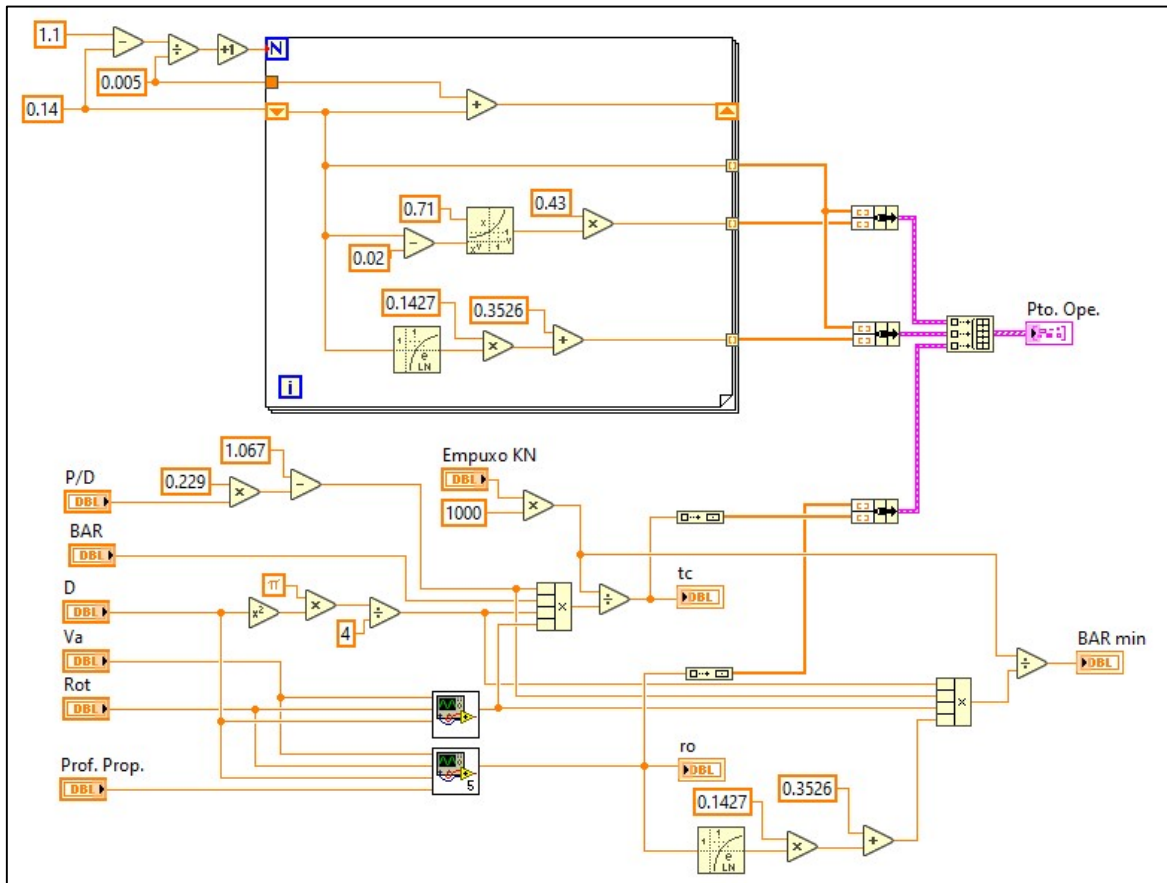


Nota: Esta ventana muestra los valores y gráfica del comportamiento de la potencia y la eficiencia. Los gráficos y los valores mostrados son apenas un ejemplo.

Semejante a la ventana que muestra la resistencia (Figura 3.5), en los gráficos de la Figura 3.10, se muestra el comportamiento de la potencia y de la eficiencia total en los tres regímenes hidrodinámicos, de acuerdo a la leyenda adjunta en cada gráfico. No obstante, los valores de la potencia BHP y de la eficiencia η_T para una determinada velocidad (punto de operación) también se muestran en esta ventana (indicadores adjuntos a los gráficos).

Para el análisis de cavitación, los coeficientes τ_o y σ_o , se calculan para cada velocidad, a través de la implementación de las fórmulas, establecidas en la sección 2.3.2, en el algoritmo (ver Figura 3.11).

Figura 3.11
Implementación del algoritmo para el cálculo de los niveles de cavitación.



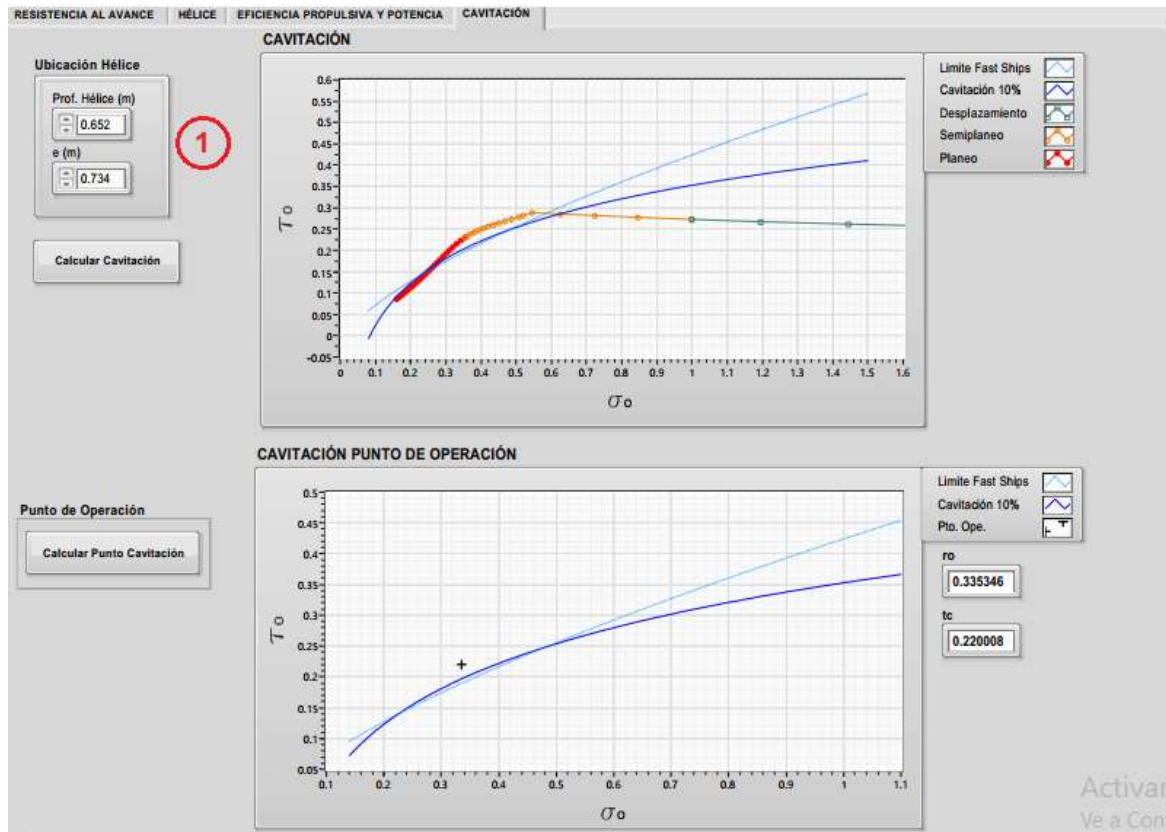
Nota: El algoritmo permite calcular los niveles de cavitación en los tres regímenes hidrodinámicos. A su vez, permite estimar la cavitación en un determinado punto de operación.

Para simular las variaciones del σ_o , por causa de las variaciones de profundidad de la hélice en este tipo de embarcaciones, la Ecuación 3.73 se implementa en el algoritmo. Para estimar la profundidad en cada punto de operación en altas velocidades, el ángulo de astilla muerta y la manga entre codillos se ingresan en el ítem 1 de la Figura 3.5, entre tanto, la profundidad inicial ($V_S = 0$) es digitada en el ítem 1 de la Figura 3.12.

Los valores de los coeficientes de cavitación se muestran en un gráfico, acompañados por las curvas que establecen los valores límites de los niveles de cavitación en embarcaciones de alta velocidad.

Figura 3.12

Ventana de análisis de los niveles de cavitación de la hélice.



Nota: Los gráficos y los valores mostrados son apenas un ejemplo.

En la Figura 3.12, las curvas de los límites de cavitación, para embarcaciones de alta velocidad y para una cavitación máxima de 10%, son representadas según la leyenda mostrada en los gráficos. Estas curvas son estimadas utilizando las Ecuaciones 3.70 y 3.71. Los coeficientes de cavitación, calculados en velocidades de desplazamiento y altas velocidades, están caracterizados según la leyenda mostrada en el gráfico de “CAVITACIÓN” de la Figura 3.12. Si estos valores calculados exceden los límites establecidos (curvas límite), el nivel cavitación de la hélice es mayor que lo permisible, siendo no recomendable para garantizar el buen desempeño de la hélice.

3.4 Flujo de la metodología de cálculo implementado en el algoritmo

El proceso de cálculo descrito anteriormente es mostrado resumidamente en el flujo de la figura 3.13. Los datos geométricos del casco requeridos por el algoritmo para realizar este cálculo son:

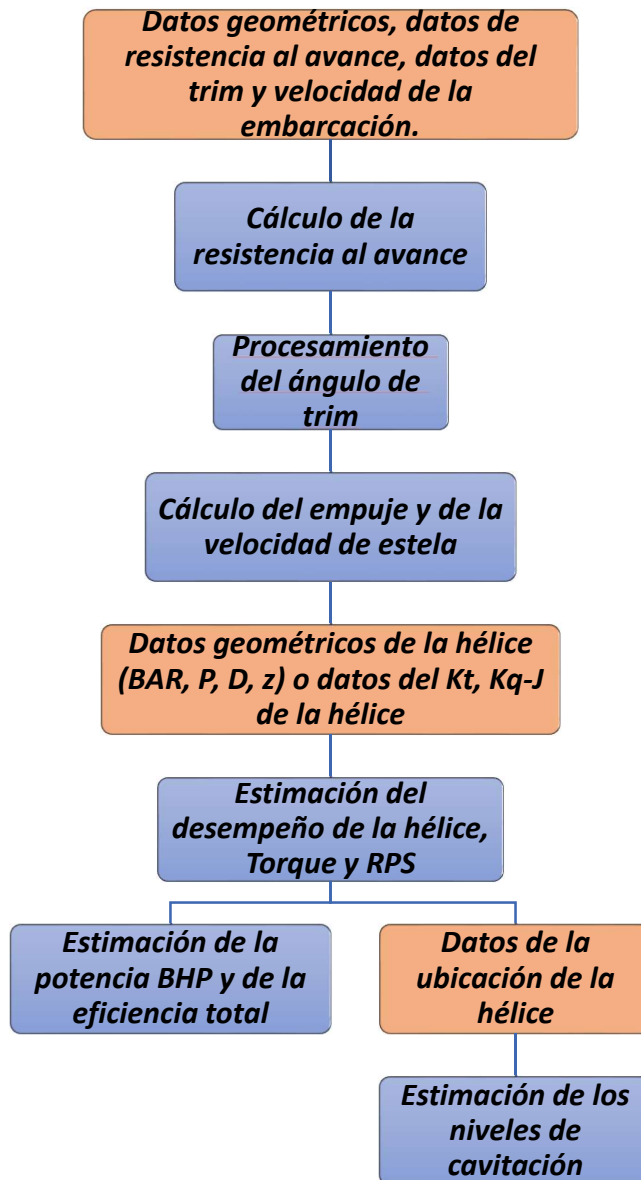
- Calado.
- Volumen.
- Eslora total.
- Manga
- Eslora en la línea de agua.
- Manga en la línea de agua.
- Mitad del ángulo de entrada en el plano de flotación.
- Superficie mojada.
- Área máxima transversal.
- Área de popa espejo.
- Coeficiente de bloque.
- Coeficiente prismático.
- Ángulo de astilla muerta.
- Ángulo del eje.
- Manga entre codillos.

Por otra parte, los datos de la hélice requeridos por el algoritmo son:

- Tipo de hélice.
- Diámetro.
- Razón P/D.
- Número de palas (z).
- Razón de área (BAR).

Figura 3.13

Flujograma de la metodología de cálculo implementada en LabVIEW.



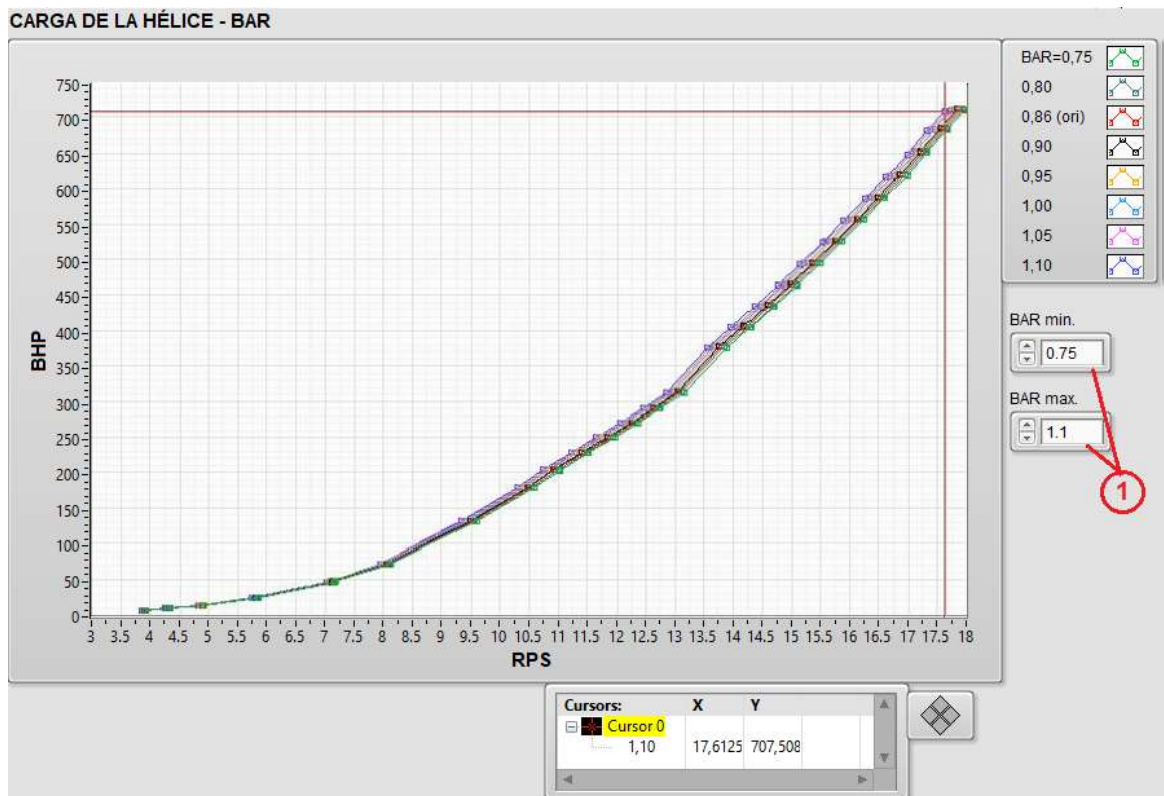
3.5 Optimización de la Propulsión mediante las Curvas de Carga

La presente tesis propone optimizar el sistema de propulsión mediante el análisis de las curvas de carga de la hélice. Para tal efecto, una rutina que calcula y muestra las curvas de carga es implementada en el algoritmo, la cual utiliza como datos de entrada la rotación (RPS o RPM) y la potencia BHP en diferentes velocidades. Las curvas de carga mostradas por el algoritmo serán para diferentes valores de P/D, BAR y diámetro, a fin de realizar un estudio adecuado, seleccionando la hélice óptima y optimizando el sistema de propulsión.

Las Figuras 3.14, 3.15 y 3.16 muestran las variaciones de la curva de carga de la hélice en relación al BAR, diámetro y razón P/D respectivamente. En el ítem 1 de cada figura, los valores mínimos y máximos, de cada parámetro geométrico, son digitados. A través de estos valores, el algoritmo muestra las curvas de carga de la hélice para los valores comprendidos dentro de este rango.

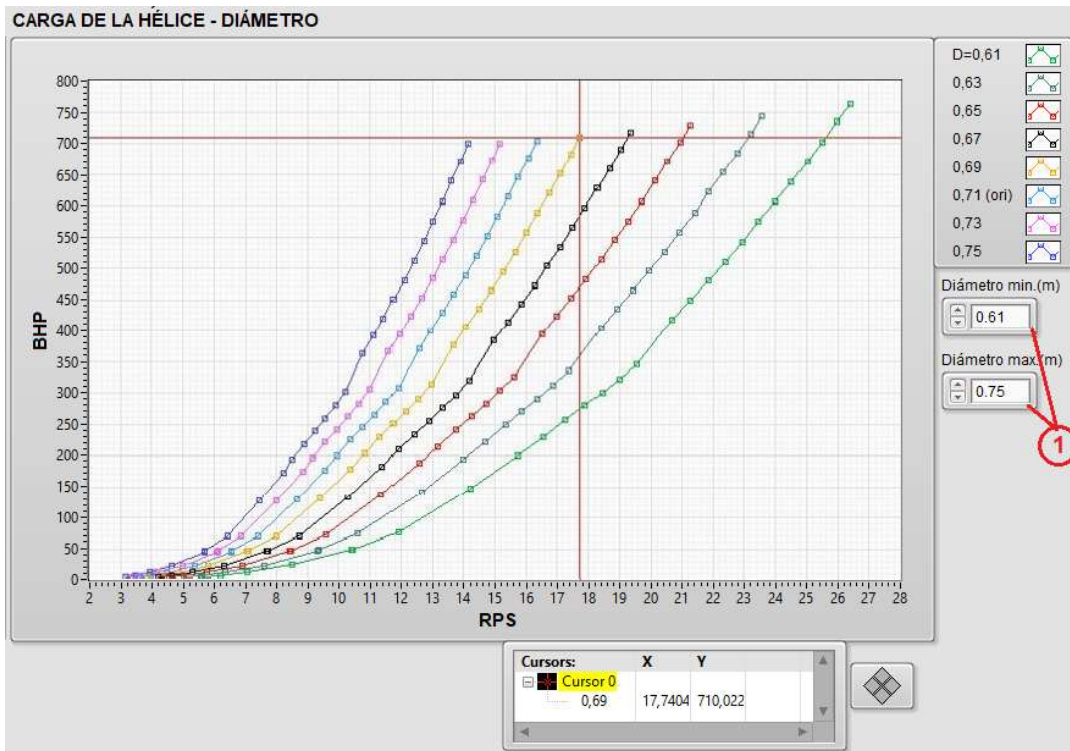
Figura 3.14

Curva de carga de la hélice para diferentes valores de BAR.



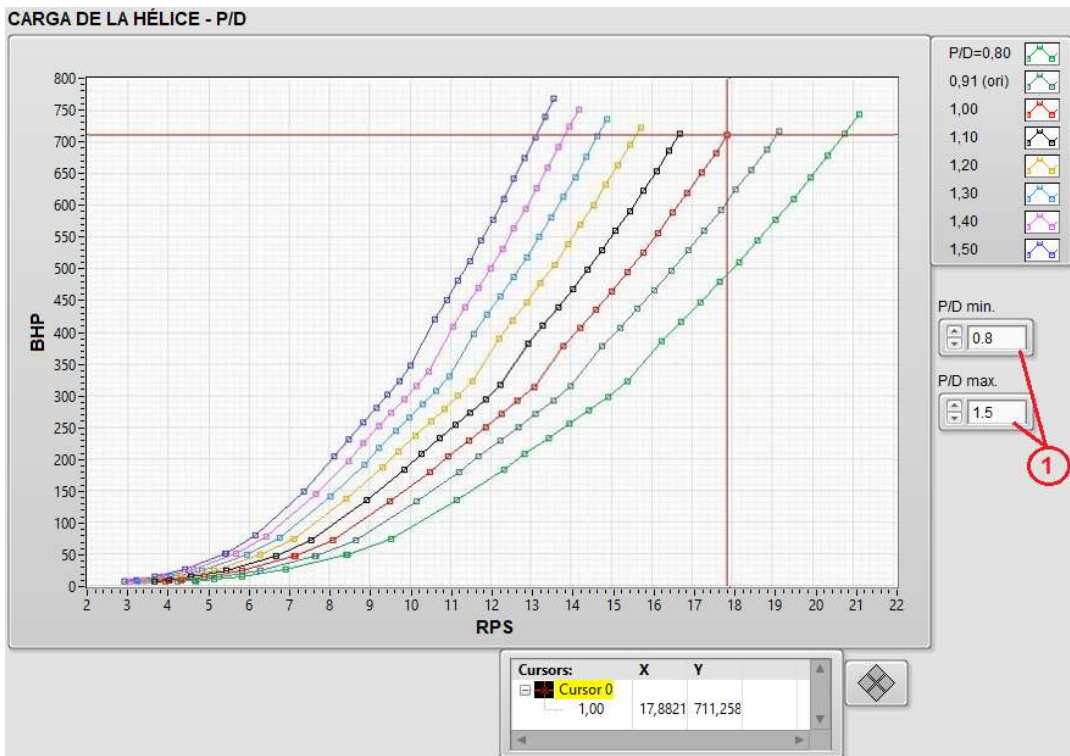
Nota: Los valores y gráficos mostrados son apenas un ejemplo.

Figura 3.15
 Curva de carga de la hélice para diferentes valores de diámetro.



Nota: Los valores y gráficos mostrados son apenas un ejemplo.

Figura 3.16
 Curvas de carga de la hélice para diferentes valores de razón P/D.

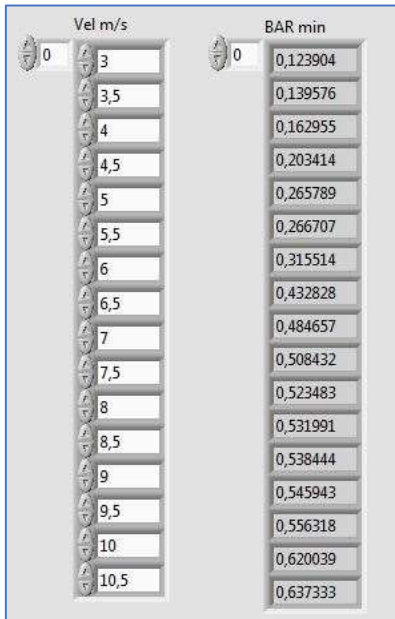


Nota: Los valores y gráficos mostrados son apenas un ejemplo.

Para facilitar la selección de la razón de áreas (BAR) ideal para la hélice, el algoritmo estima el BAR mínimo para evitar la cavitación en diferentes velocidades, utilizando los límites de cavitación de Burrill para las embarcaciones de alta velocidad (sección 2.3.2), ver Figura 3.17.

Figura 3.17

BAR mínimo calculado por el algoritmo en diferentes velocidades.



The image shows a software interface with two columns of data. The left column is labeled 'Vel m/s' and contains values from 3 to 10,5 in increments of 0,5. The right column is labeled 'BAR min' and contains corresponding numerical values. Each value is displayed in a small window with a '0' icon and a '0' value, suggesting it's a control element. The values in the 'BAR min' column increase as the velocity increases.

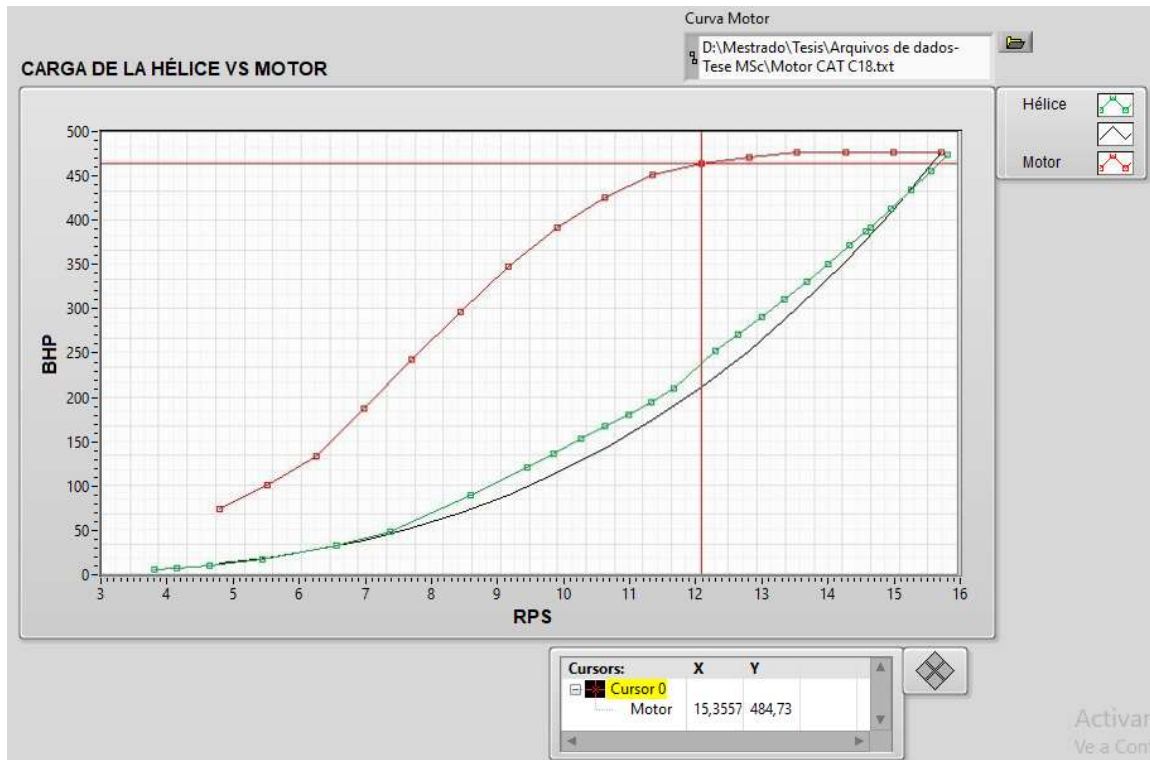
Vel m/s	BAR min
3	0,123904
3,5	0,139576
4	0,162955
4,5	0,203414
5	0,265789
5,5	0,266707
6	0,315514
6,5	0,432828
7	0,484657
7,5	0,508432
8	0,523483
8,5	0,531991
9	0,538444
9,5	0,545943
10	0,556318
10,5	0,620039

Nota: Los valores y gráficos mostrados son apenas un ejemplo.

La curva de carga de la hélice seleccionada es mostrada en un gráfico por el algoritmo (Figura 3.18). Para verificar la correcta selección del sistema de propulsión, la curva del motor seleccionado puede ser insertada mediante un archivo de datos en el ítem 1 de la Figura 3.18.

Figura 3.18

Curva de carga de la hélice versus la curva de motor - seleccionados.



Nota: Los valores y gráficos mostrados son apenas un ejemplo.

CAPITULO IV

Resultados, Contratación de Hipótesis y Discusión de Resultados

4.1 Descripción del caso de estudio

Como caso de estudio, el comportamiento propulsivo de una embarcación tipo *Pilot Boat*, la cual es llamada de “Barco Piloto” (Figura 4.1), fue evaluado; utilizando el algoritmo propuesto en la presente tesis. A su vez, se realizó una prueba de navegación, a fin de medir y obtener valores de torque, rotación y potencia en el eje de la embarcación. Los resultados obtenidos de esta prueba serán utilizados para validar la efectividad del algoritmo propuesto.

Las embarcaciones tipo *Pilot Boat* están diseñadas para el traslado de prácticos y de tripulantes, desde tierra hasta un buque específico, ej.: petroleros, graneleros, containeros, gaseros, plataformas offshore, etc. Debido a esto, estas embarcaciones son parte fundamental en la logística marítima, beneficiando a las actividades portuarias como el puerto de “Chancay”.

Para que este tipo de embarcaciones cumplan su función, deben alcanzar altas velocidades y operar en planeo.

Por esta razón, los *Pilot Boat* poseen un casco en “V” con popa espejo (*transom stern*), estas características favorecen al desarrollo del planeo. Normalmente, este tipo de embarcaciones tiene una razón L/B baja, afectando su estabilidad dinámica longitudinal. Desde el punto de vista propulsivo, el Barco Piloto tiene dos sistemas de propulsión convencionales con caja reductora, cuyo eje tiene una inclinación de 7.5° .

Figura 4.1
Embarcación "Barco Piloto"



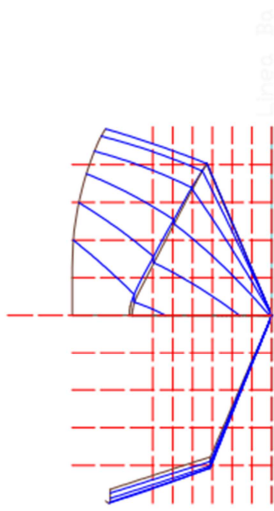
En la siguiente tabla (Tabla 4.1) se muestran las características geométricas y de propulsión de la embarcación Barco Piloto.

Tabla 4.1
Características principales del Barco Piloto

Características principales	Magnitud
Eslora (LOA)	11,27 m
Eslora entre perpendiculares (Lpp)	9,50 m
Manga (B)	3,80 m
Calado (T)	0,70 m
Desplazamiento	10,2 Tn
Motor Principal	2X320 HP (2200 RPM)
Diámetro de la hélice	0,575 m
Fator de caja reductora	1,67:1

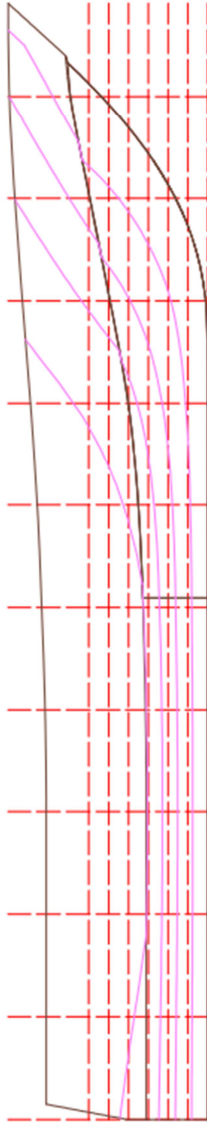
La Figura 4.2 muestra las líneas de forma del Barco Piloto. Estas líneas fueron modeladas partiendo de un modelo padrón (Gemini 37'), ajustando la forma del modelo al casco real en el software "AutoCAD". A partir de las líneas de forma, un modelo 3D del casco fue elaborado en el programa "Maxsurf Modeler". Este procedimiento permitió calcular la resistencia y el ángulo de trim mediante el Maxsurf Resistance.

Figura 4.2
Plano de línea de forma del "Barco Piloto"

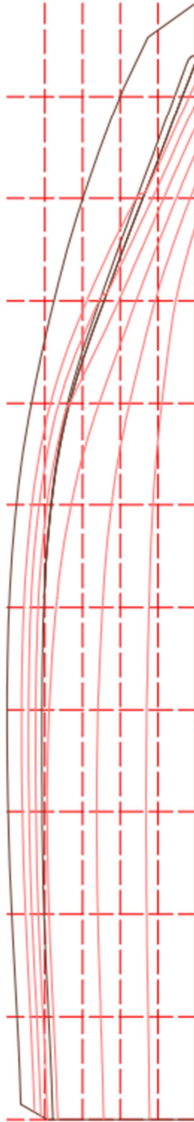


VISTA TRANSVERSAL

Distancia entre cuadernas: 1,033 m
Distancia entre longitudinales: 0,380 m
Distancia entre líneas de agua: 0,200 m



VISTA LONGITUDINAL



VISTA DE PLANTA

4.2 Ensayo experimental para obtener el torque y la rotación

Ensayos en prueba de navegación fueron realizados con el Barco Piloto, a fin de obtener los valores de torque, rotación y potencia del motor (BHP) en diferentes condiciones de operación (velocidades). Estas mediciones son utilizadas para validar el algoritmo desarrollado.

La prueba fue realizada por el personal del laboratorio LEDAV, el cual está ubicado en Río de Janeiro - Brasil. El personal de este laboratorio tuvo a bien compartir esta información para el desarrollo de la presente tesis, contribuyendo con la investigación en el área naval.

En las siguientes líneas se detallará el procedimiento experimental realizado por el personal del laboratorio LEDAV para medir el torque, rotación y potencia.

Para medir el torque en el eje, un sistema de medición para cada eje propulsor (babor y estribor) fue instalado (Figura 4.3). Este sistema de medición consiste en dos sensores de deformación (*strain gauges*), un dispositivo de telemetría, una tarjeta de adquisición de señales (DAQ), un filtro de señales y un programa de procesamiento y análisis de señales, denominado *Sistema de Medição de Eixos Girantes* (SMEG).

Las señales generadas por los *strain gauges* son adquiridas por un sistema de telemetría, y son transmitidas a la tarjeta de adquisición. Posteriormente, estas señales fueron procesadas por el programa SMEG (Figura 4.4), obteniéndose seis valores de torque, uno para cada velocidad.

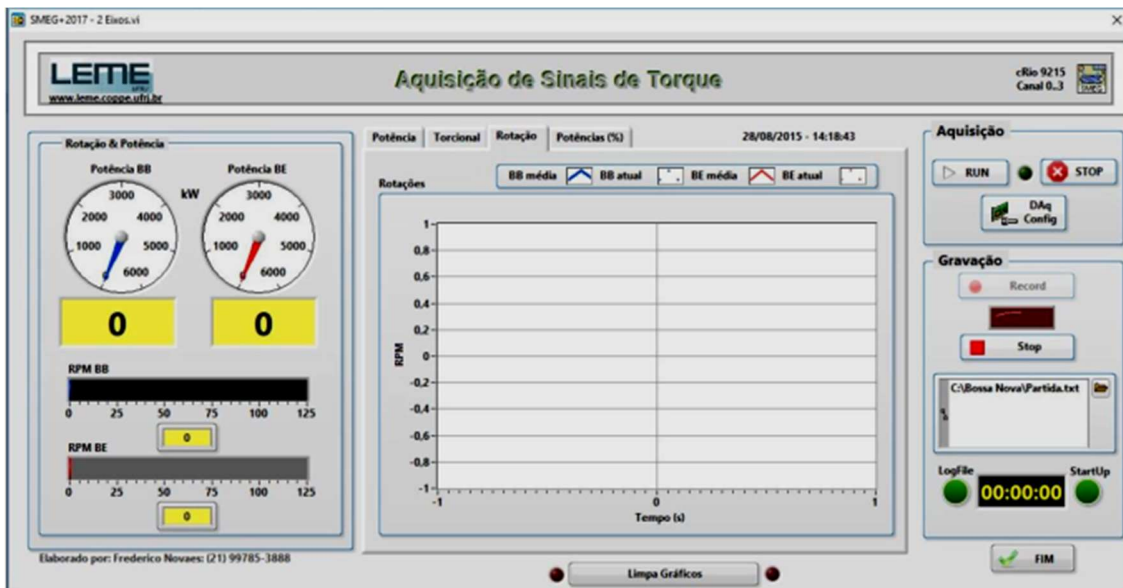
En la medición de la rotación del eje, un sensor óptico fue utilizado. Las señales adquiridas por este sensor son filtradas y transferidas al computador a través de la tarjeta de adquisición. Finalmente, los valores de la rotación son obtenidos mediante el programa SMEG para cada velocidad.

Utilizando la rotación y el torque medidos, la potencia se calculó mediante las Ecuaciones 3.43 y 3.59.

Figura 4.3
Instalación de strain gage y sistema de telemetría



Figura 4.4
Software de adquisición de señales y medición de potencia (SMEG)



4.3 Estimación del desempeño propulsivo

4.3.1 Determinación de las curvas de desempeño de la hélice

Antes de usar el algoritmo, se vuelve necesaria la obtención de las curvas de desempeño de la hélice, debido a la falta de información del tipo de hélice y sus parámetros

geométricos, los cuales son requeridos por el algoritmo. Los datos de desempeño (K_T , K_Q - J) son insertados en el algoritmo para poder realizar el cálculo del desempeño propulsivo.

Similar a los ensayos experimentales, el levantamiento de información geométrica fue proporcionado por el laboratorio LEDAV, la cual es procesada por un programa que determina las curvas de desempeño de la hélice. A continuación, se detalla el procedimiento de medición empleado por personal del laboratorio LEDAV.

Para la obtención de la geometría de la hélice, un escaneo en 3D fue empleado utilizando un *HandyScan* (Figura 4.5). Los puntos de la superficie de la pala, obtenidos por el escaneo, fueron proyectados en un *software* CAD (ver Figura 4.6), donde, las dimensiones de las abscisas e las curvaturas de la pala fueron obtenidas para cada radio. Intersecciones con cilindros en varios radios se realizaron, con el fin de levantar las coordenadas de la cara y el dorso de la pala, permitiendo montar los perfiles (Figura 4.7).

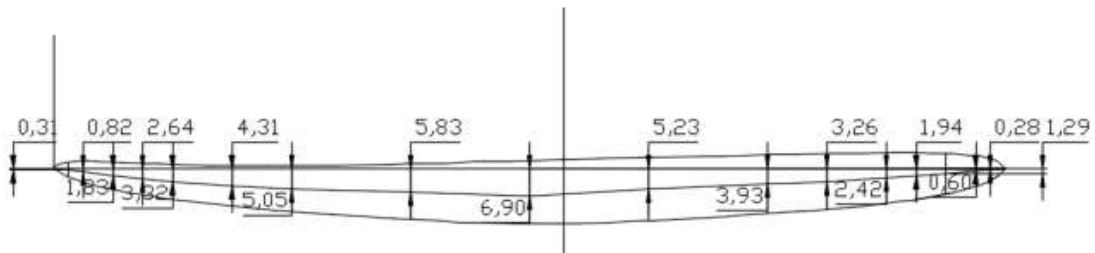
Figura 4.5
Scanner 3D HandyScan



Figura 4.6
Levantamiento de la geometría de la hélice



Figura 4.7
Medición de una sección de la pala



A través de los parámetros geométricos (abscisas y curvatura) medidos en diferentes secciones de la pala, las curvas de desempeño del propulsor fueron desarrolladas utilizando el *software* GeoPro.

Este *software* identifica la geometría de la hélice montando una serie de tablas semejantes a las de una serie sistemática (Figura 4.8). Seguidamente, las curvas de desempeño de la hélice son calculadas por el *software*, el cual utiliza el Método de Paneles, proporcionando las curvas de desempeño K_T , K_Q - J , mostradas en la Figura 4.9. Estas curvas son exportadas en un archivo de texto, el cual es insertado en el algoritmo desarrollado en la presente tesis.

Figura 4.8
 Simulación de la geometría de la pala en el software GeoPro

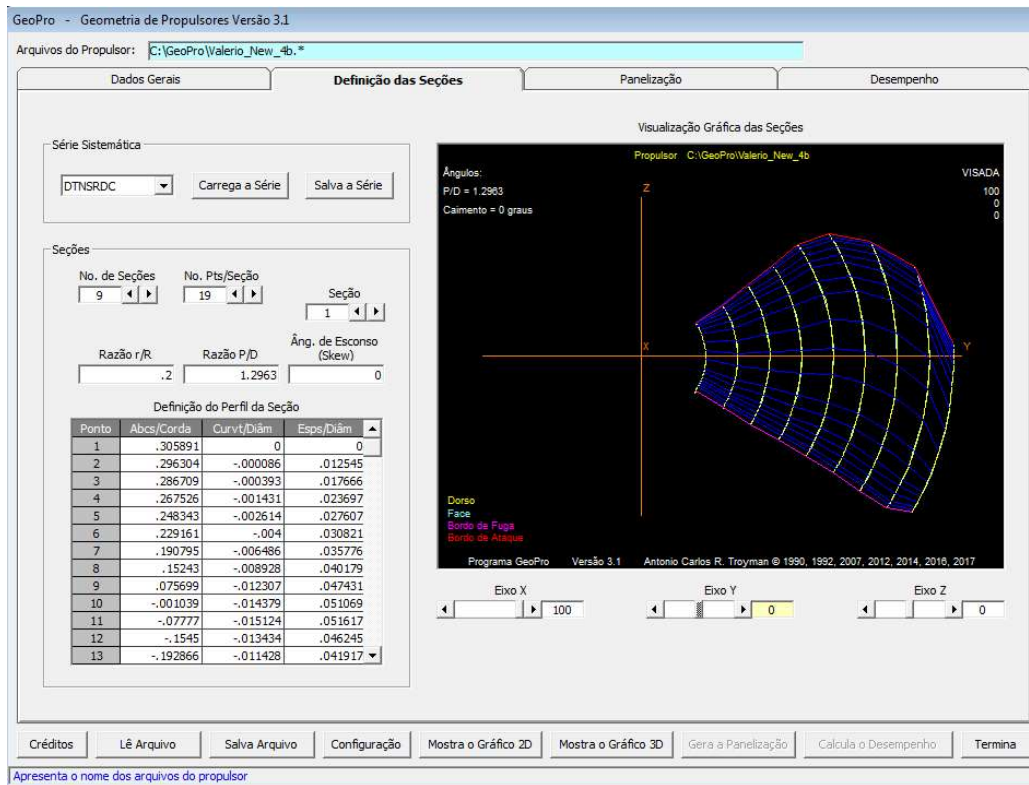
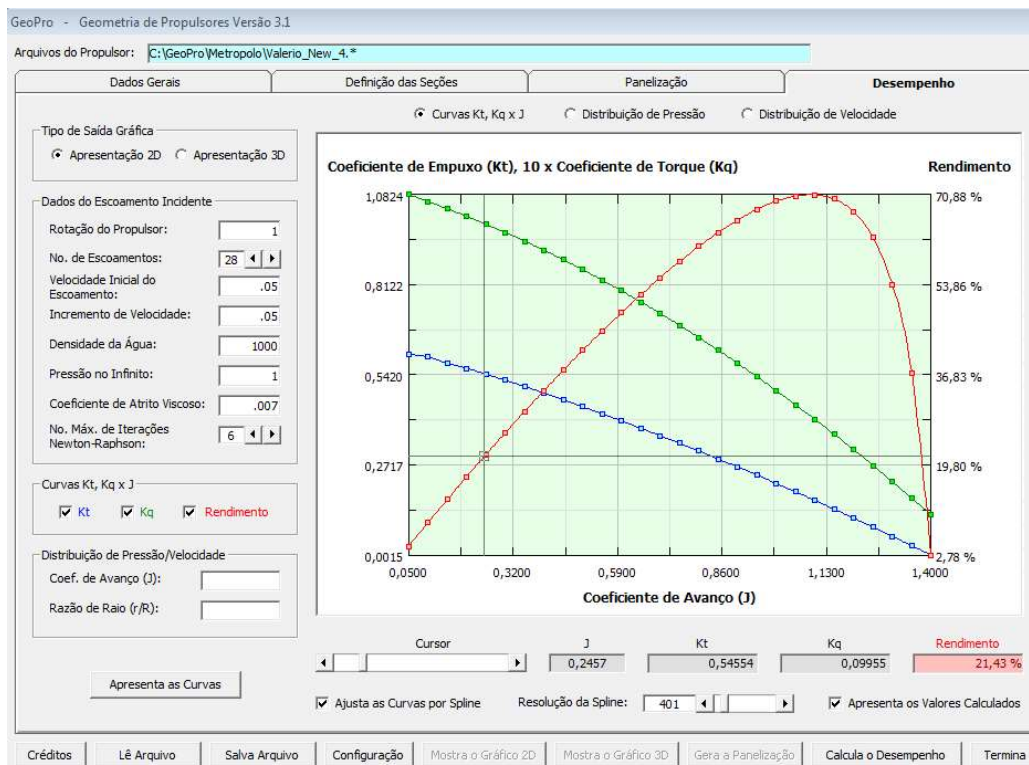


Figura 4.9
 Estimación de las curvas de desempeño de la hélice utilizando el GeoPro



4.3.2 Cálculo de la resistencia al avance y ángulo de trim

Antes de evaluar y analizar el desempeño propulsivo del Barco Piloto, es necesario calcular la resistencia al avance y el ángulo de trim dinámico de esta embarcación. El *software* “Maxsurf Resistance” fue utilizado para calcular la resistencia y el trim dinámico.

El Maxsurf Resistance es un módulo del paquete Maxsurf®. Este *software* contiene diferentes métodos para estimar la resistencia en embarcaciones de desplazamiento, de semi-planeo y planeo, incluyendo los métodos de Savitsky y Holtrop. Previamente a la utilización de este *software*, la forma geométrica del casco es modelada por otro módulo del Maxsurf®, siendo este el Maxsurf Modeler. El casco modelado es transferido mediante formato de archivo IGES al Maxsurf Resistance, donde los parámetros geométricos son reconocidos por el *software* para realizar los cálculos de la resistencia de acuerdo con el método seleccionado. Adicionalmente, requiere algunas características hidrostáticas para realizar el cálculo adecuado.

A partir de las líneas de forma de la embarcación (Figura 4.2), el casco es modelado en el Maxsurf Modeler. Seguidamente, la resistencia del casco se calcula con el Maxsurf Resistance en los regímenes de semi-planeo y planeo, donde los siguientes datos son empleados por el *software*:

Tabla 4.2

Datos de entrada para calcular la resistencia por Savitsky mediante el Maxsurf

Datos	Magnitud
Desplazamiento (Δ)	10,2 Tn
LCG (desde popa)	3,996 m
Manga del plano de flotación (B_{wl})	3,154 m
Calado medio (T_M)	0,70 m
Eslora del plano de flotación (L_{wl})	9,888 m
Ángulo de astilla muerta (β)	22,9°

Para calcular la resistencia por Holtrop, utilizando el algoritmo desarrollado, los siguientes datos son empleados:

Tabla 4.3

Datos de entrada para calcular la resistencia por Holtrop mediante el algoritmo

Datos	Magnitud
Eslora del plano de flotación (L_{wl})	9,888 m
Eslora entre perpendiculares (L_{pp})	9,50 m
Manga del plano de flotación (B_{wl})	3,154 m
Calado (T)	0,70 m
Volumen desplazado (∇)	9,178 m ³
LCB (desde popa)	3,995 m
Coef. sección maestra (C_m)	0,547
Coef. Del plano de flotación (C_{wp})	0,794
Área popa espejo (A_T)	1,122 m ²
Medio ángulo de entrada en el plano de flotación (i_e)	23,1°
Área mojada (S_w)	29,584 m ²

Los resultados, de la resistencia calculada en el régimen de desplazamiento, se exponen en la Tabla 4.4. Por otro lado, la resistencia calculada en los regímenes de semi-planeo y planeo se muestra en la Tabla 4.5. Adicionalmente, estos resultados se presentan gráficamente en la Figura 4.10, a fin de conocer el comportamiento de la resistencia en esta embarcación, donde se puede observar que esta comienza a planear cuando $V_S = 3.93 \text{ m/s}$ ($Q_t = 1.34$).

Tabla 4.4

Resistencia al avance en el régimen de desplazamiento - utilizando Holtrop

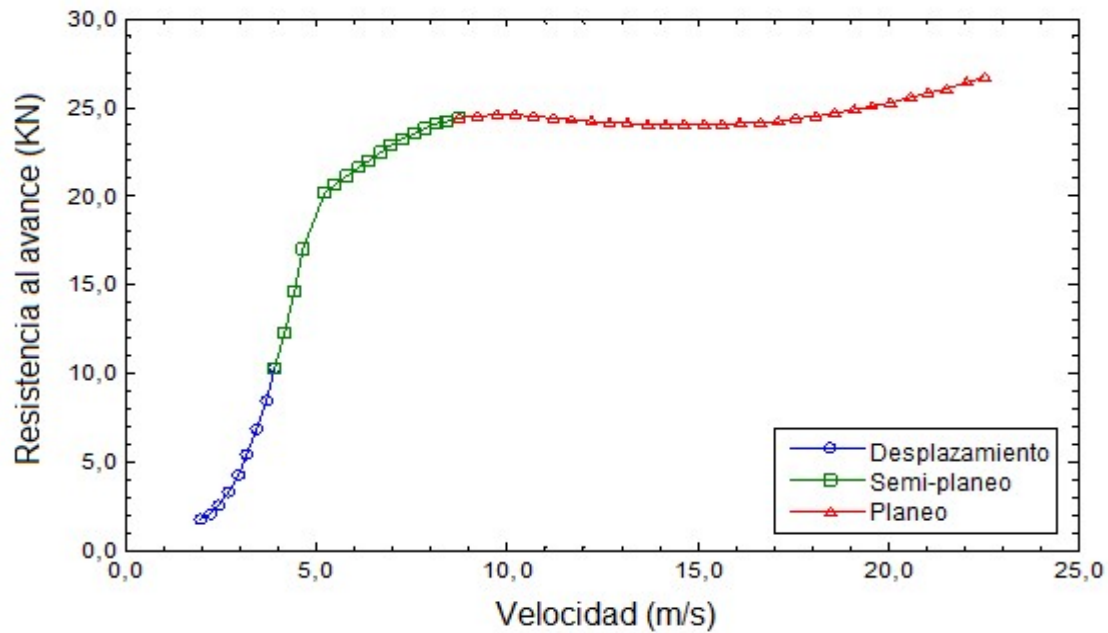
Desplazamiento		
Q_t	V (m/s)	Resistencia al avance (kN)
0,672	1,970	1,733
0,756	2,216	2,038
0,840	2,462	2,561
0,924	2,708	3,301
1,008	2,955	4,259
1,092	3,201	5,435
1,176	3,447	6,827
1,260	3,693	8,438
1,344	3,940	10,265

Tabla 4.5*Resistencia al avance en altas velocidades - utilizando Savitsky (Maxsurf Resistance)*

Semi-planeo - Planeo		
Q_t	V (m/s)	Resistencia al avance (kN)
1,344	3,940	10,265
1,429	4,186	12,311
1,513	4,432	14,573
1,597	4,678	17,054
1,781	5,220	20,203
1,882	5,515	20,659
1,983	5,811	21,116
2,084	6,106	21,572
2,185	6,402	22,021
2,286	6,697	22,455
2,386	6,993	22,861
2,487	7,288	23,231
2,588	7,584	23,558
2,689	7,879	23,837
2,790	8,175	24,067
2,891	8,470	24,247
2,991	8,766	24,383
2,991	8,766	24,383
3,160	9,258	24,520
3,328	9,750	24,567
3,496	10,243	24,549
3,664	10,735	24,490
3,832	11,228	24,405
4,000	11,720	24,311
4,168	12,213	24,217
4,336	12,705	24,132
4,504	13,198	24,060
4,672	13,690	24,007
4,840	14,182	23,974
5,008	14,675	23,962
5,176	15,167	23,972
5,344	15,660	24,005
5,512	16,152	24,062
5,680	16,645	24,140
5,848	17,137	24,242
6,017	17,630	24,365
6,185	18,122	24,510
6,353	18,614	24,675
6,521	19,107	24,860
6,689	19,599	25,065
6,857	20,092	25,289
7,025	20,584	25,531
7,193	21,077	25,791
7,361	21,569	26,068
7,529	22,062	26,363
7,697	22,554	26,672

Figura 4.10

Comportamiento de la resistencia en relación a la velocidad - Barco Piloto

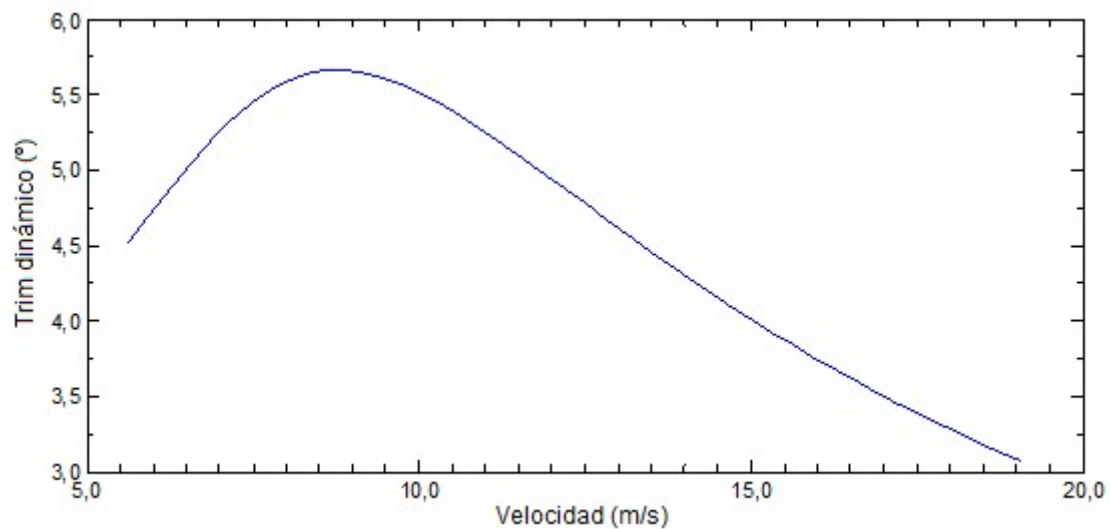


En la Figura 4.10, un aumento considerable de la resistencia es encontrado en el régimen de semi-planeo, específicamente entre 3.93 m/s y 8.77 m/s aproximadamente ($1.34 \leq Q_t \leq 3.00$). En el régimen de planeo (o planeo puro, $Q_t \geq 3.00$) la tendencia de la resistencia disminuye, sin embargo, a partir de 14.67 m/s ($Q_t \approx 5.00$), esta comienza a incrementar (ver también Tabla 4.5), presentando un incremento relativamente bajo en relación a lo expresado en los regímenes de desplazamiento y semi-planeo. Este comportamiento es esperado en las embarcaciones planeadoras.

Además de obtener la resistencia, el ángulo de trim también se calcula con el *software* Maxsurf Resistance mediante el método de Savitsky. En la Tabla 4.6, se muestran los resultados del ángulo de trim calculado. Adicionalmente, estos resultados se expresan gráficamente en la Figura 4.11.

Tabla 4.6*Ángulo de trim dinámico calculado utilizando Savitsky (Maxsurf Resistance)*

Q_t	V (m/s)	Trim (°)	Q_t	V (m/s)	Trim (°)
1,920	5,625	4,523	4,266	12,500	4,780
2,026	5,938	4,699	4,373	12,813	4,679
2,133	6,250	4,874	4,479	13,125	4,579
2,240	6,563	5,043	4,586	13,438	4,479
2,346	6,875	5,200	4,693	13,750	4,382
2,453	7,188	5,339	4,799	14,063	4,286
2,560	7,500	5,456	4,906	14,375	4,193
2,666	7,813	5,548	5,012	14,688	4,101
2,773	8,125	5,613	5,119	15,000	4,012
2,880	8,438	5,652	5,226	15,313	3,926
2,986	8,750	5,665	5,332	15,625	3,841
3,093	9,063	5,656	5,439	15,938	3,759
3,199	9,375	5,626	5,546	16,250	3,680
3,306	9,688	5,579	5,652	16,563	3,603
3,413	10,000	5,518	5,759	16,875	3,528
3,519	10,313	5,445	5,866	17,188	3,456
3,626	10,625	5,363	5,972	17,500	3,386
3,733	10,938	5,274	6,079	17,813	3,318
3,839	11,250	5,180	6,186	18,125	3,252
3,946	11,563	5,083	6,292	18,438	3,188
4,053	11,875	4,983	6,399	18,750	3,126
4,159	12,188	4,882	6,506	19,063	3,066

Figura 4.11*Gráfica de ángulo de trim vs velocidad utilizando Savitsky*

Los valores de resistencia al avance y ángulo de trim obtenidos son guardados en archivos de texto, los cuales son analizados y procesados por el algoritmo desarrollado, a fin de evaluar el desempeño propulsivo de la embarcación, calculando la potencia BHP, la eficiencia propulsiva y la cavitación.

4.3.3 Análisis de resultados

Una rutina fue implementada en el algoritmo para leer y procesar los datos del archivo de texto, proporcionados por el *software* GeoPro, determinando el desempeño de la hélice. Adicionalmente, otra rutina fue implementada para leer y procesar los datos de la resistencia y del trim, los cuales fueron calculados utilizando el *software* Maxsurf®. Por medio de estos procedimientos, el desempeño propulsivo de la embarcación fue estimado utilizando el algoritmo.

El torque, la rotación y la potencia BHP fueron calculados para las velocidades en las que se realizaron los ensayos de medición de torque y rotación. Los resultados obtenidos fueron comparados con los valores medidos en la prueba de mar, verificándose la precisión de cálculo del algoritmo.

En las Tablas 4.7, 4.8 y 4.9, son presentados los valores de la rotación, del torque y de la potencia obtenidos mediante el algoritmo y las mediciones, respectivamente.

Tabla 4.7

Comparación entre la rotación medida en prueba de navegación y la obtenida mediante el algoritmo

Q_t	V (m/s)	Rotación de la hélice (RPS)		
		Medición	Simulación	Error (%) Simulación/Medición
1,054	3,087	7,210	7,791	8,06
1,141	3,344	8,862	8,719	-0,18
1,264	3,704	10,134	10,228	0,93
1,457	4,270	13,068	12,525	-4,16
1,703	4,990	15,424	15,091	-2,16
2,247	6,585	17,584	16,748	-4,75
2,389	7,000	-	17,127	-
2,560	7,500	-	17,551	-

De la Tabla 4.7, se observa que las rotaciones simuladas por el algoritmo presentan una alta precisión cuando se comparan con los valores de la simulación, siendo la diferencia entre estos valores menor que 1 RPS (rev/s). Desde el punto de vista porcentual, el error máximo encontrado es de 8.06% en la velocidad más baja. Este error representa una diferencia de 0.58 RPS. En otras velocidades, la diferencia porcentual fue aceptable. Adicionalmente, el valor negativo del error indica que el algoritmo simuló valores menores que los reales.

Tabla 4.8

Comparación entre el torque medido en prueba de navegación y el obtenido mediante el algoritmo

Q_t	V (m/s)	Torque de la hélice (KN-m)		
		Medición	Simulación	Error (%) Simulación/Medición
1,054	3,087	0,289	0,307	6,41
1,141	3,344	0,440	0,408	-7,31
1,264	3,704	0,586	0,557	-4,82
1,457	4,270	0,947	0,862	-9,01
1,703	4,990	1,332	1,269	-4,79
2,247	6,585	1,474	1,468	-0,40
2,389	7,000	-	1,515	-
2,560	7,500	-	1,565	-

Conforme a la Tabla 4.8, se observan resultados próximos, en el cálculo por el algoritmo (simulación) del torque, encontrándose diferencias que oscilan entre 0.006 y 0.085 KN-m.

Contrario al cálculo de la rotación, los resultados del torque simulado presentan mayores diferencias, la cuales varían entre 0.40% y 9.01%, identificándose la máxima diferencia porcentual en $V_S = 4.27 \text{ m/s}$, velocidad localizada en el comienzo del desarrollo del planeo ($Q_t = 1.46$). En la metodología implementada, el torque es calculado a través de la rotación, por lo tanto, el porcentaje de error de cálculo en la rotación se propagará en el cálculo del torque, incrementándose el error del valor estimado.

Nótese que, semejante a la rotación, un torque sobrestimado es observado en la velocidad más baja. No obstante, en las velocidades restantes, el algoritmo subestimó el torque.

Tabla 4.9

Comparación entre la potencia medida en prueba de navegación y la obtenida mediante el algoritmo

Q_t	V (m/s)	Potencia requerida por la hélice (BHP)		
		Medición	Simulación	Error (%)
				Simulación/Medición
1,054	3,087	17,534	20,999	19,76
1,141	3,344	32,839	31,648	-3,63
1,264	3,704	50,003	47,330	0,06
1,457	4,270	104,266	94,713	-9,16
1,703	4,990	173,154	168,014	-2,97
2,247	6,585	218,448	215,858	-1,19
2,389	7,000	-	227,780	-
2,560	7,500	-	241,076	-

Análogamente a los otros resultados, una sobrestimación de la potencia es identificada en la velocidad más baja (régimen de desplazamiento). Sin embargo, para las demás velocidades, los valores de potencia calculados por el algoritmo son menores que los valores medidos (ver Figura 4.9). En estas velocidades, las diferencias porcentuales presentan una variación entre 1.19 % y 9.16 %, indicando una adecuada precisión en las simulaciones realizadas por el algoritmo.

Para verificar la concordancia entre el comportamiento de los resultados simulados y los resultados medidos, en relación con la velocidad, los valores de rotación, torque y potencia se expresan gráficamente en las Figuras 4.12, 4.13 y 4.14, respectivamente.

Figura 4.12

Gráfico de la rotación medida y la simulada por el algoritmo

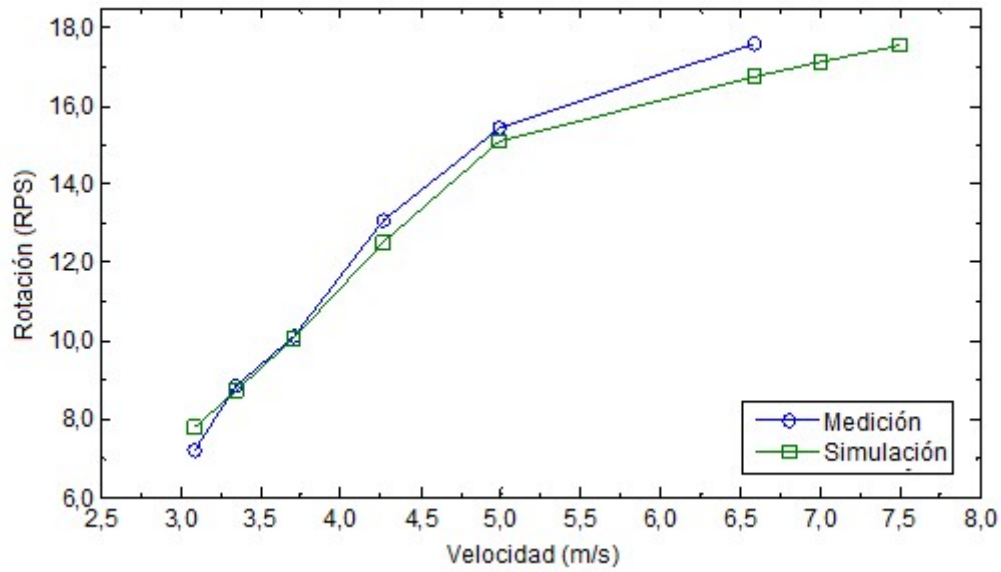


Figura 4.13

Gráfico del torque medido y el simulado por el algoritmo

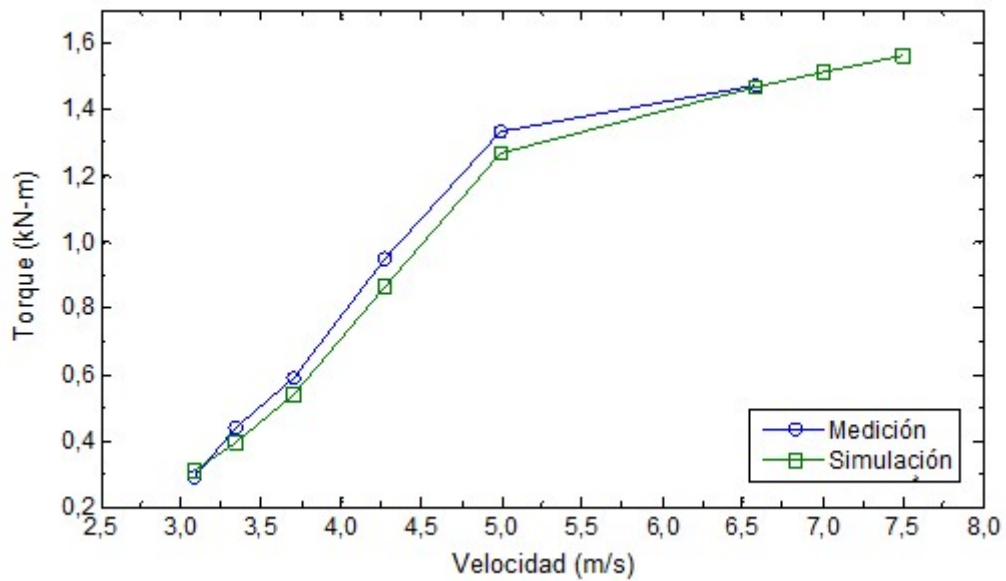
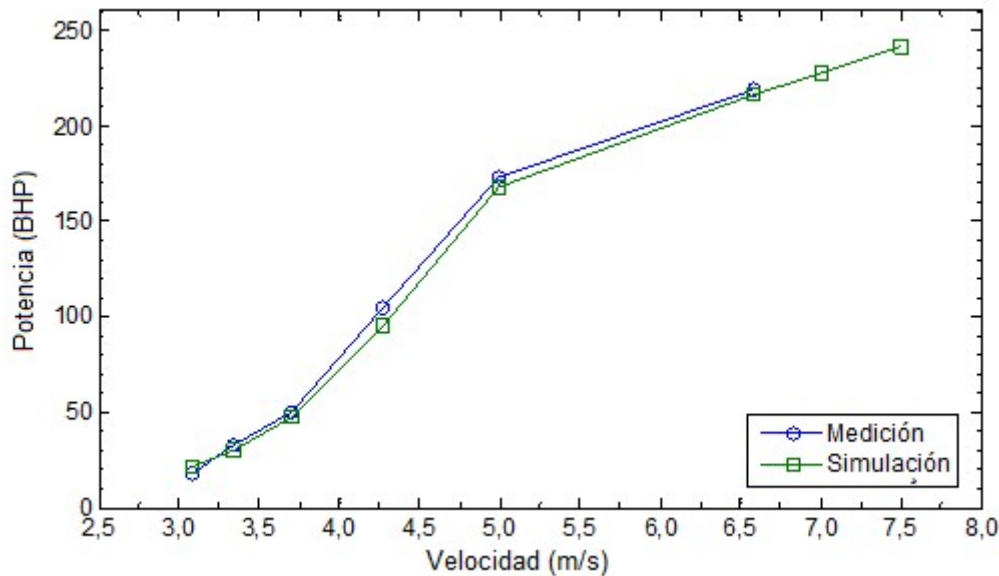


Figura 4.14

Gráfico de la potencia medida y la simulada por el algoritmo



De las figuras presentadas, se puede verificar que el algoritmo estima coherentemente el comportamiento de la rotación, el torque y la potencia, encontrándose una excelente correlación entre la curva simulada y la obtenida por medición; en los tres gráficos.

Una adecuada estimación del comportamiento de estos factores es fundamental para saber si el motor consigue satisfacer la demanda de carga de la hélice, identificándose las velocidades donde un mayor esfuerzo del motor será requerido. Mediante este análisis, la optimización del sistema propulsivo puede ser efectuada.

En general, de los resultados mostrados en las tablas y gráficos, se puede notar que el algoritmo estima con buena concordancia la rotación, el torque y la potencia, identificándose una mayor precisión en el cálculo de la rotación.

Las mayores diferencias encontradas en el torque y en la potencia, en relación a la rotación, ocurren debido a la propagación del error de la rotación en el cálculo del torque y la potencia, a causa de la dependencia de estos factores respecto a la rotación. Adicionalmente, la resistencia puede estar siendo subestimada, generando valores menores de torque y de potencia.

No obstante, para el cálculo de la potencia utilizando el algoritmo, una eficiencia al eje $\eta_s = 0.97$ fue empleada por recomendación de la bibliografía. Sin embargo, debido al estado de conservación y antigüedad de la embarcación, este parámetro puede ser menor a causa de las pérdidas en la línea del eje, generando mayores valores en la medición del torque.

Con el objetivo de cuantificar la influencia del flujo oblicuo, generado por el ángulo de trim y la inclinación del eje (ver sección 2.2.3), en el desempeño propulsivo; la rotación, el torque y la potencia fueron calculados con y sin la influencia de este fenómeno para las mismas velocidades en las que se realizó la prueba de navegación. Los resultados se muestran en las tablas 4.10, 4.11 y 4.12.

Tabla 4.10
Influencia del flujo oblicuo en el cálculo de la rotación

Q_t	V (m/s)	Rotación de la hélice (RPS)		
		Con flujo oblicuo	Sin flujo oblicuo	Diferencia entre las condiciones (%)
1,054	3,087	7,899	7,892	-0,09
1,141	3,344	8,845	8,826	-0,22
1,264	3,704	10,228	10,194	-0,33
1,457	4,270	12,525	12,451	-0,59
1,703	4,990	14,695	14,983	-0,71
2,247	6,585	16,748	16,678	-0,42
2,389	7,000	17,127	17,066	-0,36
2,560	7,500	17,551	17,498	-0,30

Tabla 4.11
Influencia del flujo oblicuo en el cálculo del torque

Q_t	V (m/s)	Torque de la hélice (KN-m)		
		Con flujo oblicuo	Sin flujo oblicuo	Diferencia entre las condiciones (%)
1,054	3,087	0,318	0,316	-0,70
1,141	3,344	0,408	0,402	-1,44
1,264	3,704	0,557	0,547	-1,83
1,457	4,270	0,862	0,838	-2,75
1,703	4,990	1,269	1,228	-3,21
2,247	6,585	1,468	1,421	-3,25
2,389	7,000	1,515	1,466	-3,29
2,560	7,500	1,565	1,512	-3,36

Tabla 4.12
Influencia del flujo oblicuo en el cálculo de la potencia

Q_t	V (m/s)	Potencia requerida por la hélice (BHP)		
		Con flujo oblicuo	Sin flujo oblicuo	Diferencia entre las condiciones (%)
1,054	3,087	20,999	20,882	-0,56
1,141	3,344	31,648	31,124	-1,66
1,264	3,704	50,035	48,955	-2,16
1,457	4,270	94,713	91,560	-3,33
1,703	4,990	168,014	161,464	-3,90
2,247	6,585	215,858	207,980	-3,65
2,389	7,000	227,780	219,501	-3,63
2,560	7,500	241,076	232,273	-3,65

En esta evaluación, nótese que el efecto del flujo oblicuo tiene mayor relevancia en el cálculo de la potencia y del torque que de la rotación, encontrándose errores superiores al 3%. Esta diferencia es mayor en el desarrollo del planeo debido al aumento del ángulo de trim en esta región. El error negativo indica que estos factores fueron subestimados en el cálculo, cuando no se considera el flujo oblicuo.

En las tablas 4.7, 4.8 y 4.9; se evidencia que el algoritmo subestimó los valores del torque, de la rotación y la potencia; en relación a los datos medidos. No considerar el flujo oblicuo, conllevaría a una mayor diferencia entre el valor calculado y el valor real. Lo cual resultaría en la selección de un motor de menor capacidad a lo requerido.

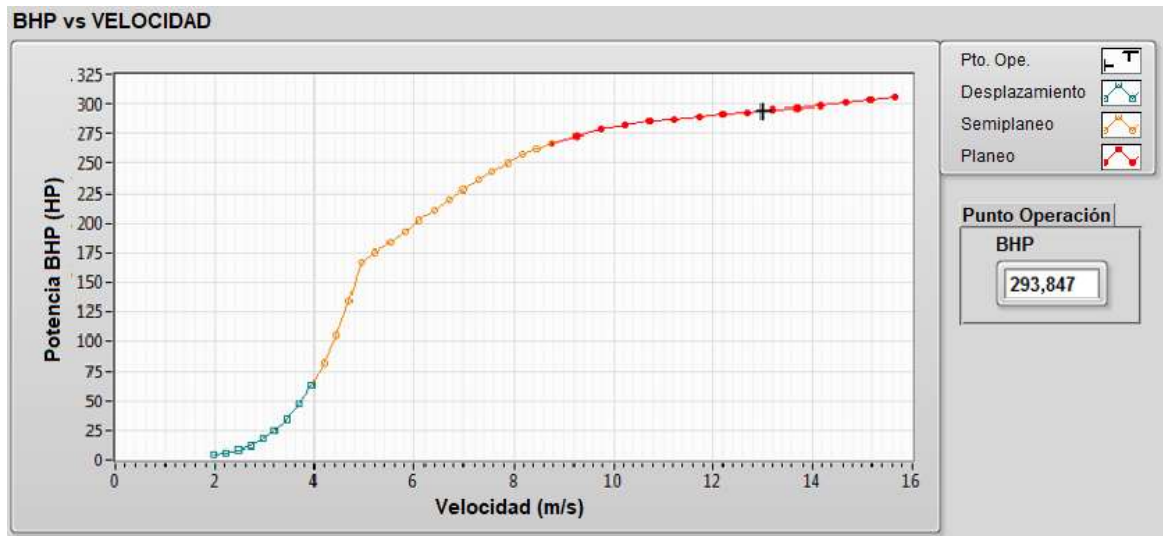
4.4 Análisis del desempeño propulsivo

Para evaluar el desempeño propulsivo del Barco Piloto, los comportamientos de la potencia BHP, de la eficiencia total y de la cavitación fueron simulados y representados gráficamente en los tres regímenes hidrodinámicos, utilizando el algoritmo.

La Figura 4.15 describe el comportamiento de la potencia en relación a la velocidad, donde los regímenes de desplazamiento, semi-planeo y planeo están representados según la leyenda mostrada en el gráfico.

Figura 4.15

Estimación de la potencia BHP en el Barco Piloto - Ventana del algoritmo



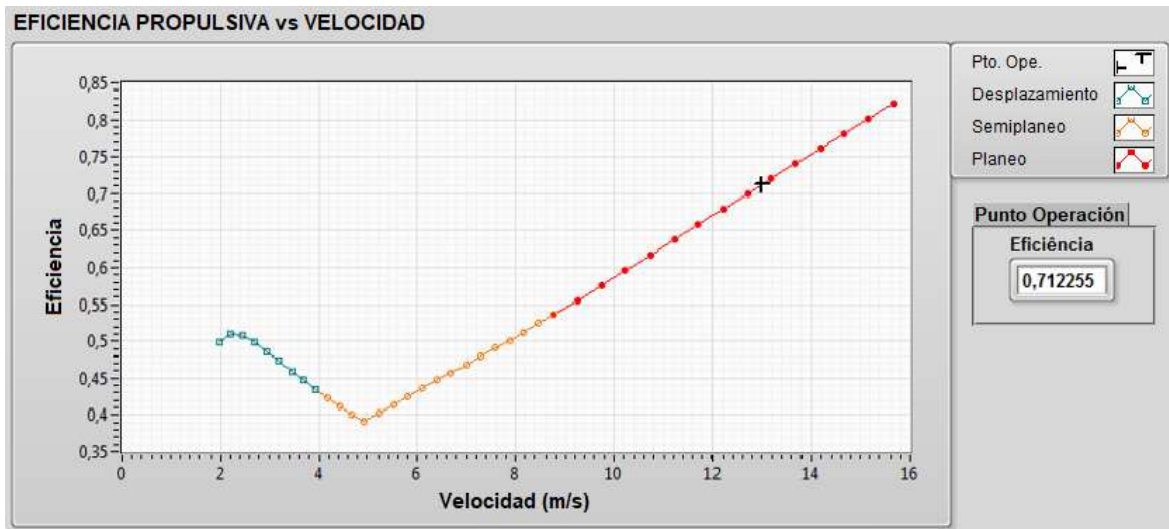
En este gráfico, una inflexión es encontrada en el régimen de semi-plano, indicando una mayor demanda de carga en esta región. La demanda de carga de la hélice será mayor en este régimen que en la velocidad de diseño de la embarcación, generando un mayor esfuerzo del motor en velocidades de transición entre los regímenes de desplazamiento y planeo. Esta característica dificulta que la embarcación alcance las condiciones de planeo puro, pudiendo no operar a la velocidad de diseño.

La tendencia de la potencia, en el régimen de planeo, indica una disminución de la demanda de carga de la hélice, generándose un menor requerimiento de carga en el régimen de planeo.

En la Figura 4.16, se muestra el comportamiento de la eficiencia propulsiva en relación a la velocidad para los tres regímenes hidrodinámicos.

Figura 4.16

Estimación de la eficiencia propulsiva en el Barco Piloto - Ventana del algoritmo

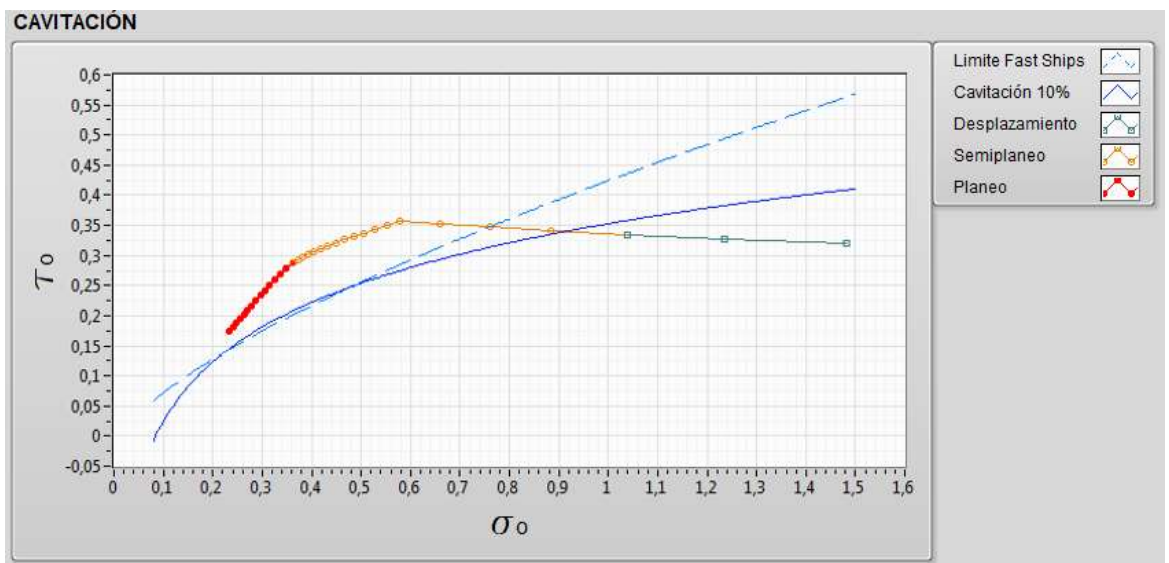


De acuerdo con la Figura 4.16, una disminución de la eficiencia es notado en los regímenes de desplazamiento y de semi-planeo, encontrándose valores mínimos de la eficiencia ($\eta_T = 0.39$) en el régimen de semi-planeo. Sin embargo, la eficiencia aumenta cuando la embarcación alcanza mayores velocidades, indicando un buen desempeño propulsivo en el régimen de planeo.

La Figura 4.17 expresa el nivel de cavitación de la hélice a través de sus coeficientes de cavitación.

Figura 4.17

Estimación de los niveles de cavitación en la hélice original - Ventana del algoritmo



Se puede observar que la hélice presenta niveles de cavitación elevados cuando la embarcación comienza a planear, generando una disminución del empuje de la hélice debido a que el área expuesta a cavitación de la pala supera el 10% (sección 2.3.2). Las características hidrodinámicas de las embarcaciones de alta velocidad pueden generar una reducción en la profundidad de la hélice, aumentando el riesgo a cavitación.

De acuerdo con los resultados presentados, se concluye que la hélice instalada en la embarcación no satisface el requerimiento propulsivo de esta, debido a los altos niveles de cavitación que presenta y a las altas cargas demandadas por la hélice.

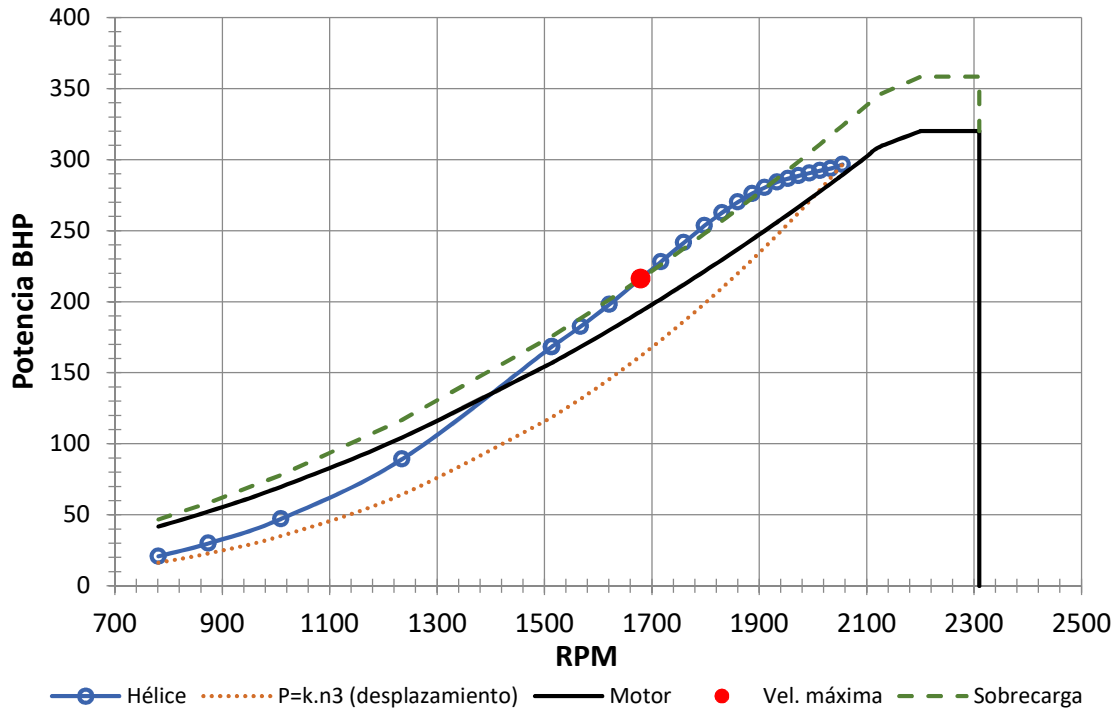
4.5 Optimización del sistema de propulsión

En la prueba de navegación, las mediciones solo se realizaron en las velocidades indicadas en la sección 4.3.3 debido a las limitaciones que presentaron los motores, los cuales no entregaron la potencia requerida por las hélices para alcanzar mayores velocidades. Esto provocó que la embarcación no consiga operar a la velocidad de diseño. La velocidad máxima alcanzada fue de 12.8 kn (6.585 m/s), estando muy por debajo de la velocidad de diseño (26 kn), a la que esta embarcación debería operar, según lo indicado por el armador.

Para analizar el problema de desempeño presentado por la embarcación, los diagramas de carga de la hélice y del motor se muestran en la Figura 4.18, donde la velocidad máxima alcanzada ($V_S = 6.585 \text{ m/s}$) es mostrada en el gráfico (punto rojo). En esta condición, los motores operan a $n = 1650 \text{ RPM}$, $P = 205 \text{ BHP}$ e $Q = 1.42 \text{ kN} - \text{m}$, según lo simulado. El diagrama del motor se obtuvo de la referencia MTU (2018).

Figura 4.18

Diagrama de carga del motor y de la hélice



Nótese que, en la condición máxima alcanzada, la demanda de carga de la hélice está en el límite de la sobrecarga del motor. En estas condiciones el motor no produce más potencia debido a la combustión ineficiente y el aumento de pérdidas en el motor, que ocurren cuando este opera en sobrecarga, generando un sobrecalentamiento del mismo. Si el motor es forzado a aumentar sus revoluciones, este comenzará a expulsar humo producto de la combustión incompleta, lo que puede llegar a interrumpir su funcionamiento; según Jovaj (1982).

Para mejorar el desempeño, cuatro modificaciones al sistema de propulsión son propuestas. Las tres primeras no exigen la alteración de la caja reductora ni del motor.

En las dos primeras modificaciones, variaciones en la geometría de la hélice son propuestas. Estas variaciones consisten en aumentar el paso (P) o disminuir el diámetro (D) debido a la factibilidad desde el punto de vista económico y de la manufactura. Para determinar cuál de las dos opciones genera un mayor desempeño, se presentan las Figuras 4.19 y 4.21; las cuales muestran el comportamiento de la carga requerida por la hélice cuando el P/D y el D son modificados, respectivamente. Adicionalmente, las

variaciones de la eficiencia de la hélice en relación al P/D y al D son mostradas en las Figuras 4.20 y 4.22.

Las ordenadas de las Figuras 4.19 y 4.21 muestran la potencia BHP calculada, y las abscisas muestran en RPS las revoluciones en el eje a la salida de la caja. En el caso del motor, el factor de reducción (de la caja reductora) es utilizado para que las revoluciones tengan la misma condición que la hélice.

Figura 4.19
Variación de la carga de la hélice cuando el P/D es alterado

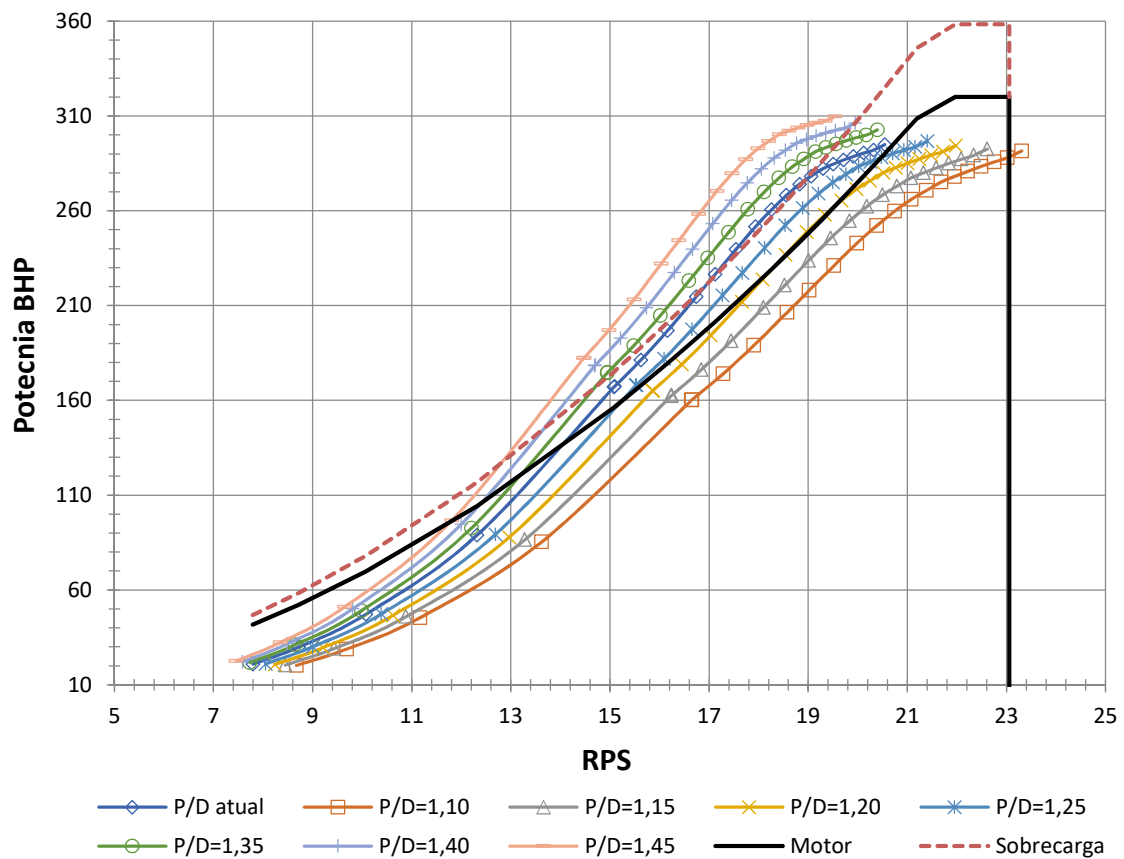


Figura 4.20
Comportamiento de la eficiencia de la hélice en relación al P/D

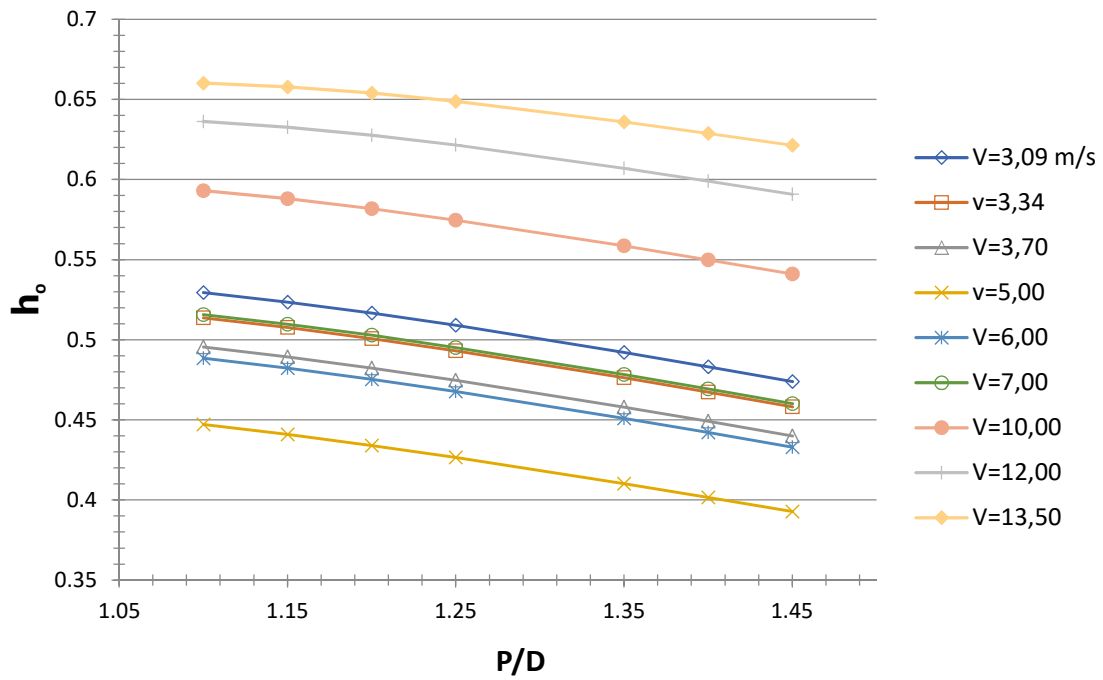


Figura 4.21
Variación de la carga de la hélice cuando el diámetro es alterado

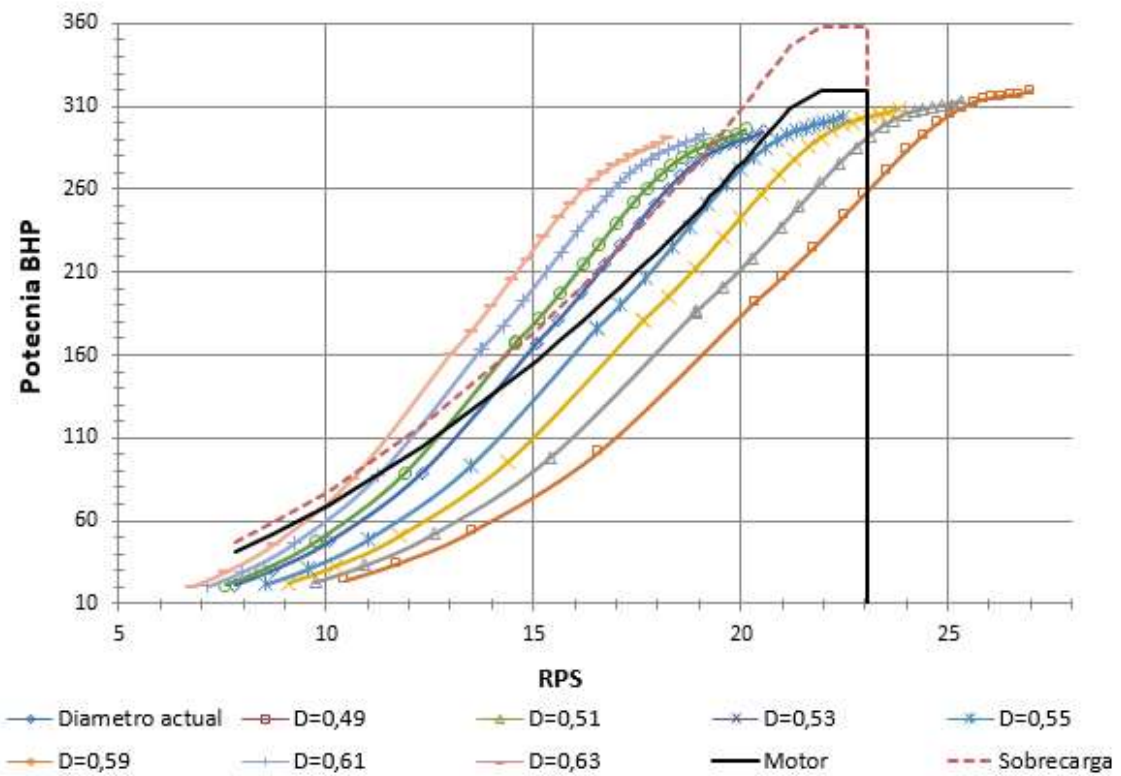
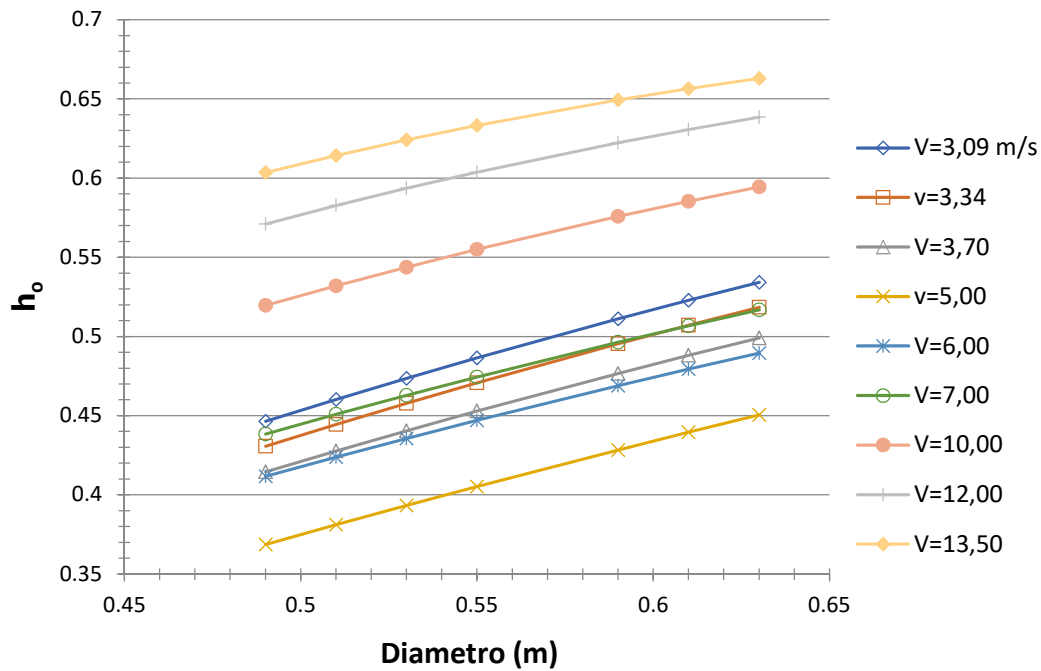


Figura 4.22

Comportamiento de la eficiencia de la hélice en relación al diámetro

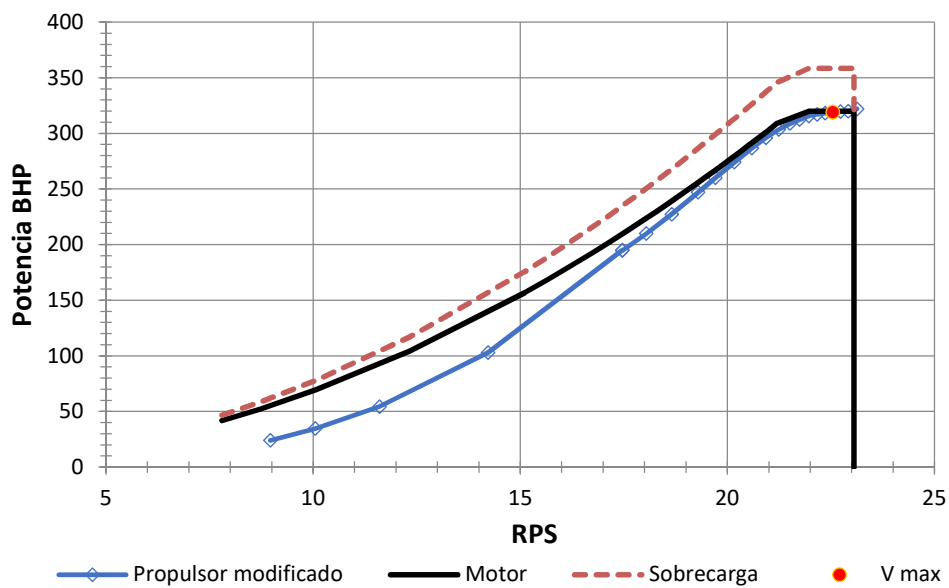


La primera modificación es aumentar el paso de la hélice para que incremente solo el P/D, disminuyendo las rotaciones requeridas por la hélice manteniendo la misma potencia BHP. De la Figura 4.19, se observa que la carga de la hélice aumenta con el aumento del paso, excediendo los límites del motor. Por otro lado, según la Figura 4.20, el aumento de la razón P/D disminuye la eficiencia de la hélice, concluyéndose que esta modificación no es recomendable para mejorar el desempeño propulsivo.

La segunda modificación que consiste en disminuir el diámetro, manteniendo el paso, genera menores cargas requeridas por la hélice; según la Figura 4.21. Sin embargo, la disminución del diámetro resulta en la disminución de la eficiencia de la hélice (ver Figura 4.22). Adicionalmente, cuando el diámetro se reduce, la razón P/D aumenta, incrementando también la carga de la hélice. A pesar de esto, se observa que, de las Figuras 4.19 y 4.21, el diámetro tiene mayor influencia en la carga de la hélice que la razón P/D. Por lo tanto, la embarcación alcanzará mayores velocidades con la disminución del diámetro.

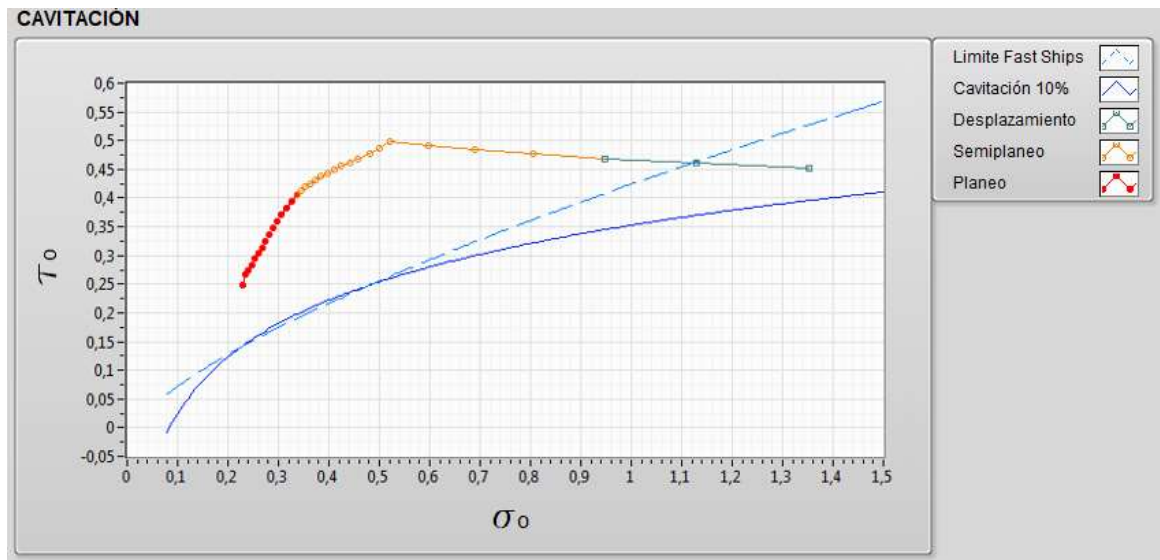
Varias simulaciones fueron realizadas hasta determinar el diámetro ideal, encontrándose la solución óptima cuando $D = 0.52 \text{ m}$, generándose un $P/D = 1.43$. Con esta condición la embarcación alcanzará 24 kn de velocidad. La Figura 4.23 muestra que la curva de carga de la hélice es menor que la curva del motor, hasta $RPS = 22.54$ ($RPM = 2258$) y $BHP=319$, siendo esta condición donde la embarcación alcanzará la velocidad máxima (punto rojo en la Figura 4.23).

Figura 4.23
Curva de carga de la hélice cuando $D=0.52 \text{ m}$



A pesar que la disminución del diámetro (hasta $D = 0.52 \text{ m}$) genera menores cargas en la hélice, obteniéndose una curva de carga menor que la curva de carga del motor (Figura 4.23), es necesario conocer los niveles de cavitación que esta modificación produce. La Figura 4.24 muestra los niveles de cavitación calculados para esta modificación, utilizando el algoritmo.

Figura 4.24
Niveles de cavitación de la hélice cuando $D=0.52\text{ m}$



De las Figuras 4.24 y 4.17, se determina que la disminución del diámetro genera un aumento de los niveles de cavitación, causando pérdida en el empuje y en el torque (sección 2.3.2). Lo cual perjudica al desempeño de la hélice.

Un cambio de la hélice es propuesto como tercera alternativa. Debido a que la serie Gawn presenta mejor desempeño que la serie B, en embarcaciones de alta velocidad; varias hélices de la serie Gawn fueron simuladas.

Para determinar la hélice óptima, los análisis realizados con las Figuras 4.19, 4.20, 4.21 y 4.22 son tomados en cuenta. De acuerdo a estos análisis, se estableció que la hélice requiere menor potencia cuando su diámetro y su razón P/D disminuyen. Sin embargo, su eficiencia (η_o) es mayor cuando el diámetro es máximo y la razón P/D es mínima.

Adicionalmente, la influencia de la razón de áreas (BAR) en la carga requerida por la hélice y en la eficiencia η_o es determinada para la selección de la hélice. Las Figuras 4.25 y 4.26 muestran la influencia de este parámetro geométrico en la carga de la hélice y en su eficiencia, respectivamente. Las rotaciones del motor y de la hélice se estiman en la salida de la caja para una mejor comparación entre las curvas de potencia estimadas.

Figura 4.25

Variación de la carga de la hélice cuando la razón de áreas (BAR) es alterada

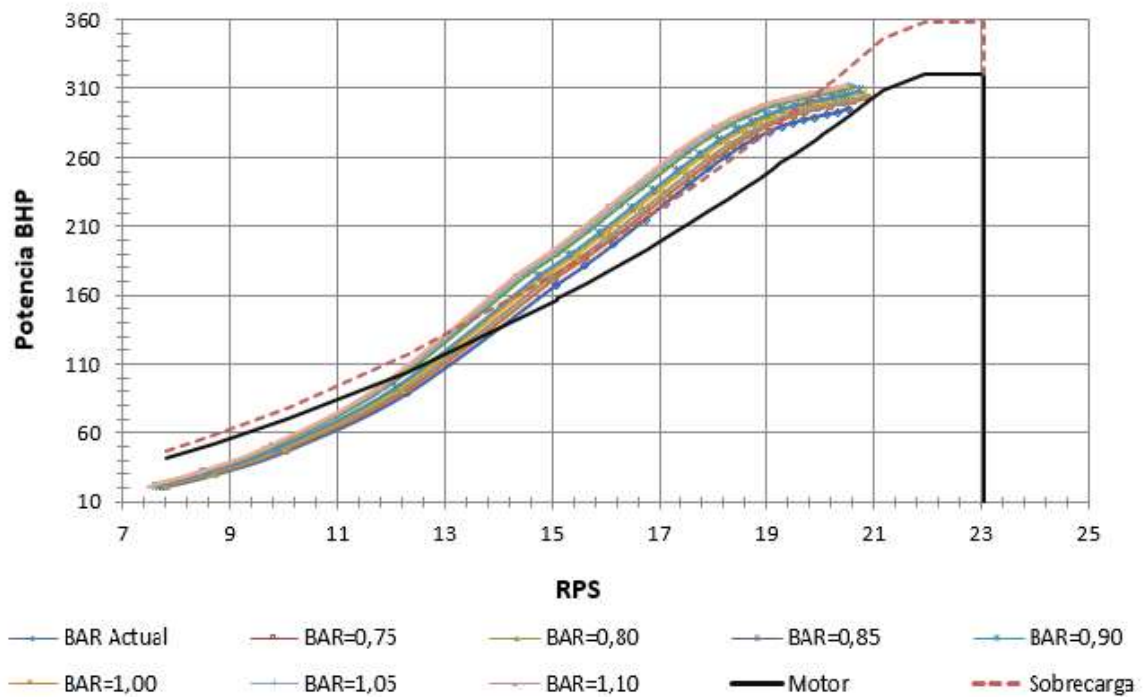
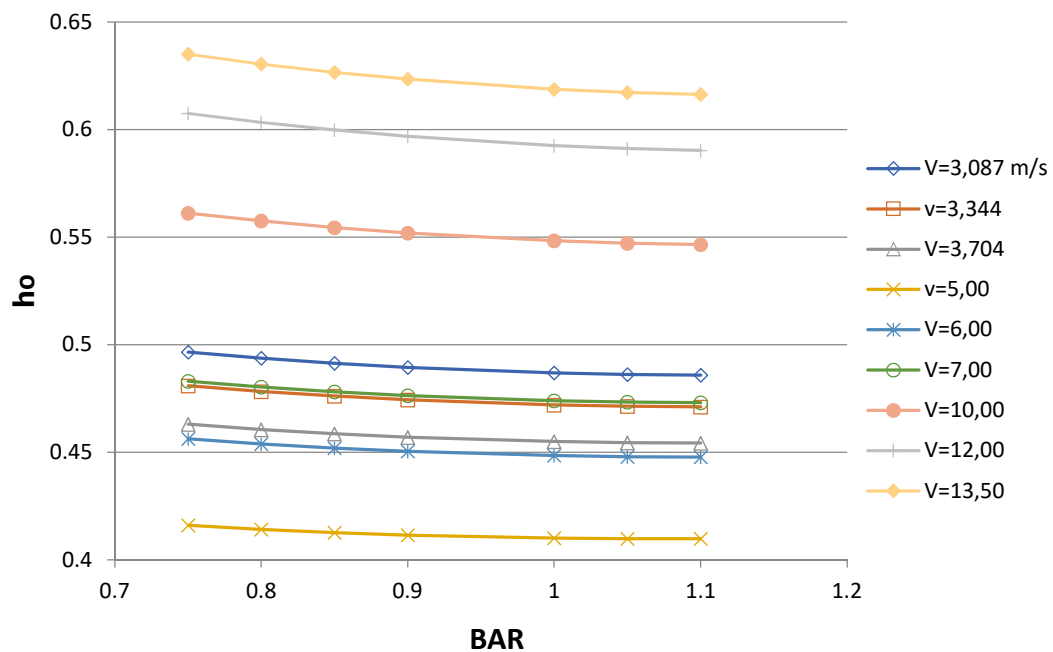


Figura 4.26

Comportamiento de la eficiencia de la hélice en relación a la razón de áreas (BAR)



En las Figuras 4.25 y 4.26, se observa que un aumento de la razón de áreas incrementa la carga requerida por la hélice y disminuye su eficiencia (de la hélice). No

obstante, cuando este parámetro es incrementado de 5% a 7% aproximadamente, su influencia en la potencia requerida es menor en relación a la influencia que tiene el P/D y el D . Una variación entre 4% y 5% genera mayores variaciones en la carga y en la eficiencia de la hélice. Por lo tanto, el D y el P/D poseen mayor relevancia al seleccionar la hélice óptima.

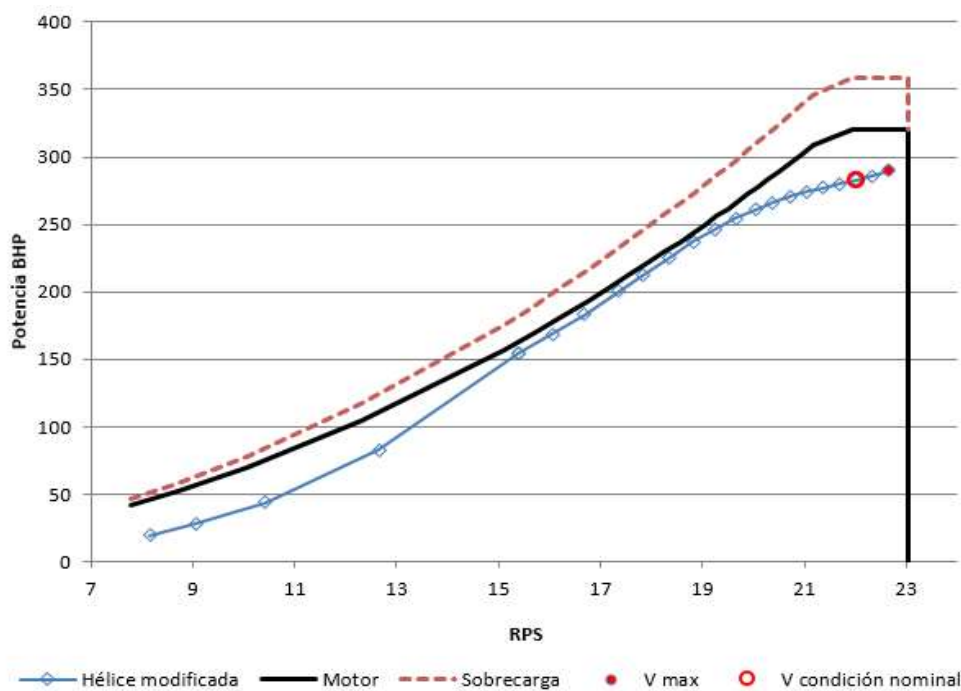
Conociendo la influencia del D y del P/D en el desempeño de la hélice (por lo expuesto anteriormente) y la importancia del BAR en los niveles de cavitación, que disminuyen cuando el BAR incrementa (sección 2.3.2); varias hélices de la serie Gawn fueron simuladas. Adicionalmente, las restricciones impuestas por el motor (curva de carga) limitan la cantidad de hélices adecuadas para esta embarcación, permitiendo seleccionar la hélice óptima. De esta evaluación, las características de la hélice seleccionada son:

- Serie Gawn, $P/D = 1.01$; $D = 0.60$; $BAR = 1.1$ e $z = 4$

La Figura 4.27 muestra la curva de carga de la hélice propuesta como solución, determinándose que esta hélice opera dentro de los límites de la curva del motor.

Figura 4.27

Curva de carga de la hélice en la tercera modificación - Cambio de hélice



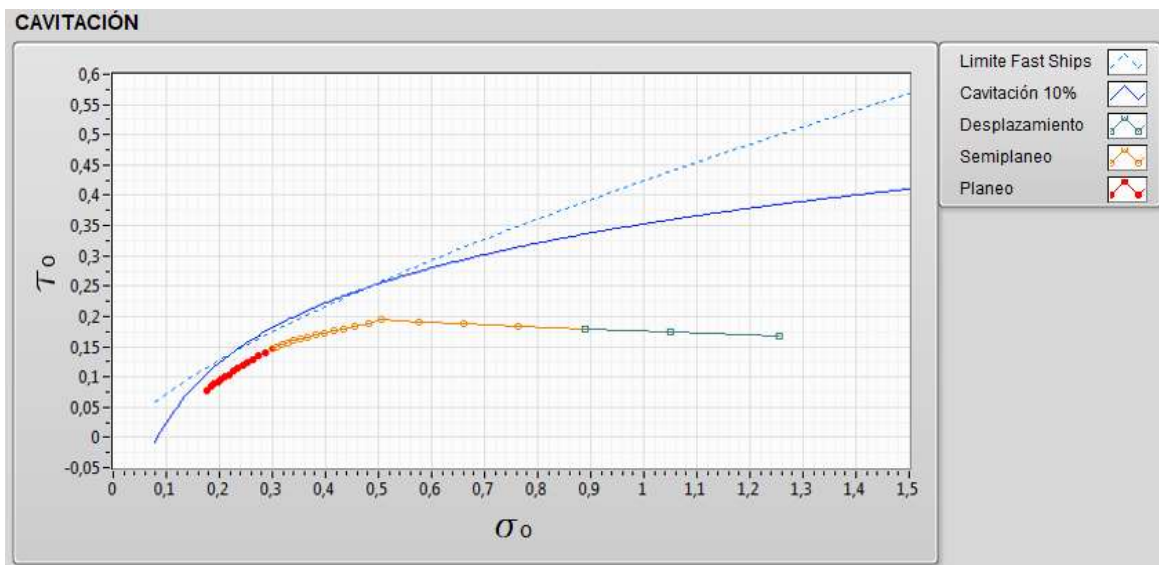
Con esta modificación, la velocidad máxima alcanzada es de 26 kn (V_{max} en la Figura 4.27), operando en la velocidad de diseño. En esta velocidad, a pesar que la potencia BHP requerida por la hélice ($BHP = 290$) es menor a la capacidad del motor ($BHP = 320$), la rotación requerida (2271 RPM) es mayor a la nominal (2200 RPM), lo cual puede generar problemas de vibración y daños por fricción en el motor, de acuerdo a lo indicado por Jovaj (1982).

La embarcación puede alcanzar una velocidad de 24.2 kn, con el motor operando dentro de sus condiciones nominales. En este caso, la rotación y la potencia BHP requeridas por la hélice son 2195 RPM y 284 HP.

Para verificar que los niveles de cavitación estén dentro de lo permitido, estos se muestran en la Figura 4.28, en los tres regímenes hidrodinámicos.

Figura 4.28

Niveles de cavitación en la tercera modificación - Cambio de hélice



De la Figura 4.28, se observa que los niveles de cavitación son menores que los límites establecidos para este tipo de embarcaciones, incluyendo la velocidad de diseño. Por lo tanto, esta modificación del sistema propulsivo es recomendable debido a las menores cargas requeridas por la hélice y a los bajos niveles de cavitación presentados.

En la cuarta modificación, un cambio de la hélice y del factor (de reducción) de la caja reductora es propuesto. Para seleccionar la hélice, se considera la influencia de sus

parámetros geométricos (P/D , D y BAR) en la potencia requerida y en los niveles de cavitación.

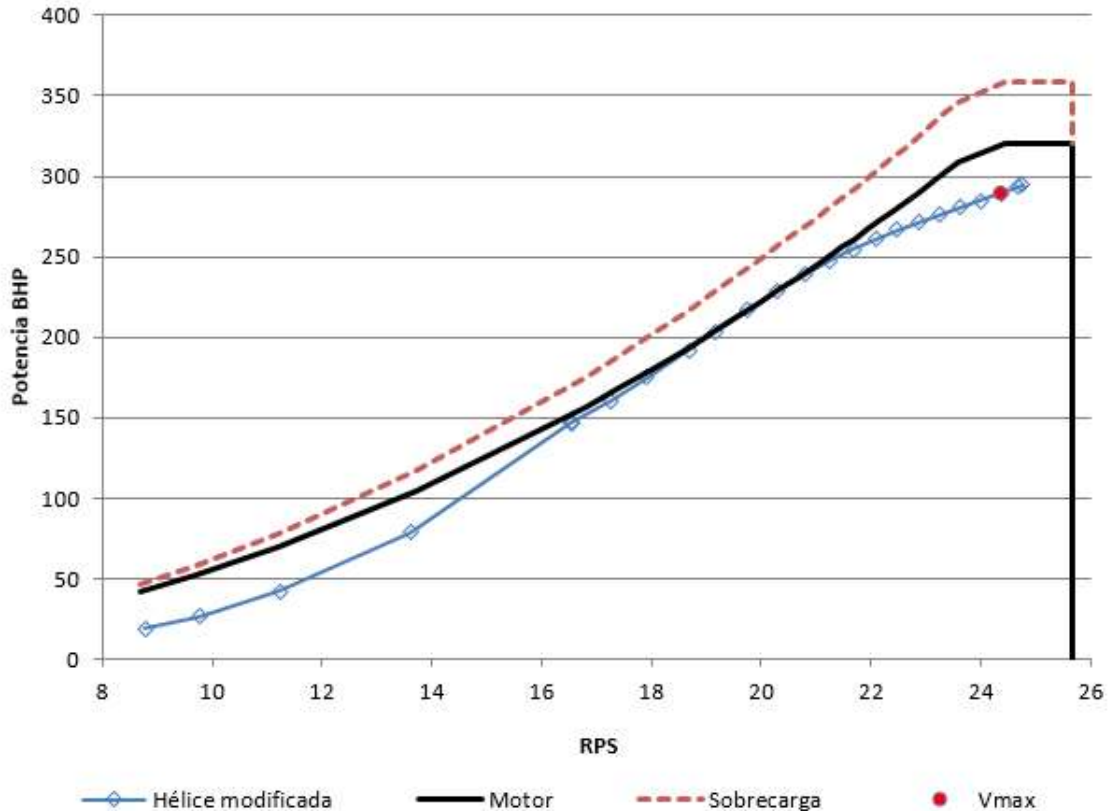
Por otro lado, una disminución del factor de reducción es propuesto para la caja reductora. Esto aumentará la rotación máxima en la salida de la caja. Finalmente, según las simulaciones realizadas, la configuración seleccionada fue:

- Série Gawn, $P/D = 0.83$; $D = 0.63\text{ m}$; $BAR = 0.9$ e $z = 4$.
- $r_{caja\ reductora} = 1.50:1$.

La Figura 4.29 muestra la curva de carga de la hélice, comparándola con la curva del motor. A diferencia de los casos anteriores, para estimar las rotaciones del motor en la salida de la caja (abscisa de la Figura 4.29), el nuevo factor de reducción empleado es de 1.50:1.

Figura 4.29

Curva de carga de la hélice en la cuarta modificación - Cambio de las hélices y las cajas reductoras

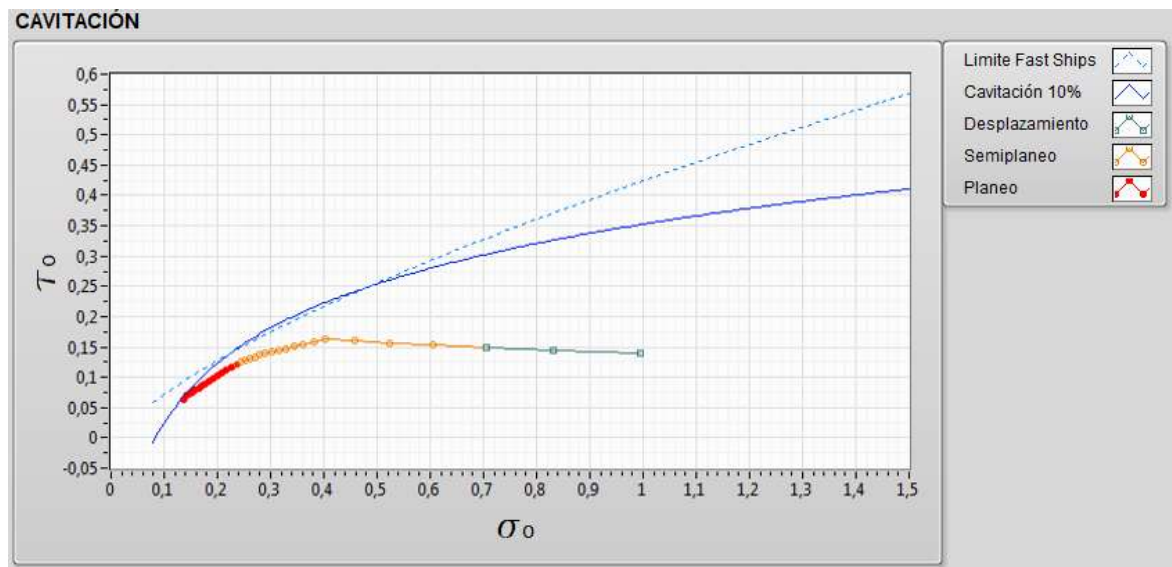


En este gráfico, nótese que la curva de carga de la hélice no excede a la curva del motor, mostrando un desempeño adecuado de la hélice. Con esta nueva modificación, la embarcación alcanzará 26 kn aproximadamente (V_{max} en la Figura 4.29), con los motores operando a 2190 RPM y 289.2 BHP. Estos requerimientos están dentro de la condición nominal del motor (2200 RPM y 320 BHP), operando sin sobrecarga ni exceso de revoluciones.

Se realizó una evaluación de la cavitación de la hélice para la solución propuesta, a fin de verificar si los niveles de cavitación están dentro de lo permitido, garantizando el buen desempeño de la hélice. En la Figura 4.30, los niveles de cavitación son presentados. De este gráfico, se puede constatar que la hélice no será afectada por el fenómeno de la cavitación, siendo el 10% la máxima área de la pala en condición de cavitación.

Figura 4.30

Niveles de cavitación en la cuarta modificación - Cambio de la hélice y de la caja reductora



La Tabla 4.13 presenta un resumen de las modificaciones recomendadas para las dos líneas de propulsión (babor y estribor), que corresponden a la tercera y cuarta modificación propuestas. Estas modificaciones generan niveles de cavitación inferiores a los límites recomendados por el diagrama de Burrill (Figuras 4.28 y 4.30). Sin embargo, la última modificación permite que la embarcación opere en su velocidad de diseño (26 kn), sin que el motor opere en sobrecarga.

Tabla 4.13

Cuadro resumen de las modificaciones recomendadas para el sistema de propulsión del Barco Piloto

	3ra Modificación	4a Modificación
Hélice	Série Gawn, $P/D = 1,01 \times D = 0,60$ $m \times BAR = 1,10 \times z = 4$	Série Gawn, $P/D = 0,83 \times D = 0,63$ $m \times BAR = 0,90 \times z = 4$
Factor de reducción	sin alteración	1,50:1

La elección entre las modificaciones propuestas dependerá también del factor económico. De los procedimientos propuestos, el armador deberá seleccionar el más adecuado, desde el punto de vista económico.

Los análisis realizados para optimizar el desempeño propulsivo de esta embarcación, son producto de las simulaciones desarrolladas con el algoritmo. A pesar que los resultados puedan no ser exactos, se establece el procedimiento que conducirá a un mayor desempeño propulsivo. Este procedimiento consiste en utilizar una hélice de la serie Gawn, y variar los parámetros geométricos de la hélice considerando la influencia de los mismos en la potencia requerida y en la eficiencia, similar a lo desarrollado en cada modificación propuesta. En este caso de estudio, se pudo observar cómo los parámetros geométricos de la hélice influyen en el desempeño de la misma.

Conclusiones

El objetivo de la presente tesis, que es desarrollar un algoritmo que permita calcular y analizar con alta precisión el desempeño propulsivo en embarcaciones de alta velocidad a fin de optimizar su sistema de propulsión, fue alcanzado satisfactoriamente. Esto se debe a los buenos resultados obtenidos al momento de comparar los parámetros propulsivos calculados por el algoritmo, con los valores reales de la embarcación utilizada como caso de estudio, obteniendo errores menores al 5%, 9% y 9.5% en los parámetros de revoluciones, torque y potencia respectivamente. Adicionalmente, las curvas de rotación torque y potencia muestran adecuada coherencia con el comportamiento real.

El método de cálculo implementado en el algoritmo para evaluar el desempeño propulsivo, fue testado con una embarcación planeadora de propulsión convencional (Barco Piloto), comparándose los resultados con los valores medidos en prueba de navegación, donde la rotación presentó un error máximo del 4.75%, mientras que las otras variables (torque y potencia) presentaron errores de hasta 9 %. De esta evaluación, se concluye que el algoritmo estima con buena precisión los valores de torque, rotación y potencia (BHP), calculando los valores de rotación con mayor precisión que los otros parámetros.

Se determinó la influencia del flujo oblicuo en el desempeño propulsivo del Barco Piloto, verificando que la omisión de los efectos del flujo oblicuo genera errores de hasta 0.7%, 3.4% y 3.9% en el cálculo de la rotación, torque y potencia respectivamente. Se observa que este fenómeno afectó en mayor medida al cálculo del torque y la potencia que a la rotación. Esto se debe a que el flujo oblicuo influenció en el empuje, generando una mayor demanda de torque. No considerar este efecto puede inducir a la selección de un motor de menor capacidad.

De acuerdo a los estudios realizados en el Barco Piloto, se demostró que el algoritmo es útil para optimizar el sistema propulsivo, logrando que la embarcación alcance

velocidades de 24 y 26 nudos con las modificaciones recomendadas, a diferencia de la condición inicial donde apenas alcanzó 12.8 kn de velocidad.

En los análisis realizados al caso de estudio, se identificó que la mayor demanda de potencia ocurre en la región de transición entre el desplazamiento y el planeo, donde la eficiencia propulsiva mostró valores de hasta un 40%, mientras que, en el planeo, la eficiencia propulsiva alcanzó valores de hasta un 80%. Por otro lado, desde el punto de vista de la cavitación, los niveles más altos fueron identificados en los regímenes de planeo y de semi-planeo. Por estas razones, se debe evitar que la embarcación opere en el régimen de semi-planeo. Esta condición de operación dificulta que la embarcación alcance mayores velocidades, como ocurrió con la nave Barco Piloto.

En el análisis del caso de estudio, fue observado que la curva de carga de la hélice, en las embarcaciones de alta velocidad, presenta mayores demandas de potencia en las velocidades intermedias; pudiendo alcanzar la zona de sobrecarga del motor en estas velocidades. Esto difiere de la curva de carga de la hélice en embarcaciones de desplazamiento, la cual presenta un comportamiento cúbico ($P = k \cdot n^3$). Por lo tanto, se recomienda realizar la estimación de carga para cada velocidad, sin utilizar $P = k \cdot n^3$, y proyectar la curva junto con el diagrama de carga del motor, para verificar que la hélice no opera en zonas de sobrecarga.

Es necesario realizar la evaluación de la cavitación en los tres regímenes hidrodinámicos, y no solo en la velocidad de diseño, a fin de verificar el adecuado desempeño de la hélice.

Recomendaciones

Este algoritmo fue proyectado para embarcaciones de alta velocidad. Como trabajo futuro, se recomienda implementar otros métodos de cálculo en el algoritmo que permitan estimar la resistencia en cascos de planeo y de semi-planeo, ampliando la aplicación a otras formas geométricas como los cascos redondos.

Para mejorar la precisión del cálculo se puede estimar la resistencia a través de cálculos numéricos, implementándose una rutina en el algoritmo que procese los datos calculados, a fin de determinar el desempeño propulsivo con mayor precisión. En este proceso se puede adicionar un método para estimar la resistencia debido a olas, generada por el estado del mar.

Se recomienda que los coeficientes de la interacción casco-hélice deben ser evaluados utilizando otros métodos para cascos de planeo y de semi-planeo, a fin de verificar cuáles son los métodos más recomendables para cada tipo de casco.

Este algoritmo puede ser ampliado para otros tipos de sistemas de propulsión, como los mencionados en el desarrollo de la tesis.

Para verificar y mejorar el algoritmo es necesario utilizar otras embarcaciones y realizar mediciones en pruebas de navegación a diferentes velocidades. Esto permitirá conocer el comportamiento propulsivo de la embarcación de forma más detallada.

Referencias

- Bate, J. (1994). *Performance Analysis and Prediction of High Speed Planing Craft* [Ph.D. dissertation]. Institute of Marine Studies/University of Plymouth, Plymouth, Devon, UK.
- Bernitsas, M., Ray, D., & Kinley, P. (1981). *KT, KQ and Efficiency Curves for the wageningen B-Series Propellers*.
- Blount, D. L., & Bartee, R. J. (1997). Design of Propulsion Systems for High-Speed Craft. *Marine Technology*, 34(4), 276–292.
- Blount, D. L., & Hubble, E. N. (1981). Sizing segmental section commercially available propellers for small craft. *SNAME Symposium*.
- Carlton, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (Elsevier, Ed.; 3rd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Castelli, L. (2015). *Ferramenta Computacional para Projeto Conceitual de Embarcações de Planeio e seu Sistema Propulsivo* [Projeto de Graduação]. Escola Politécnica, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.
- Dubbioso, G., Muscari, R., & Di Mascio, A. (2013). Analysis of the performances of a marine propeller operating in oblique flow. *Computers and Fluids*, 75(1), 86–102.
<https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.01.017>
- Faltinsen, O. M. (2005). *Hydrodynamics of High Speed Marine Vehicles* (1st ed.). Cambridge University Press.
- Gaggero, S., Tani, G., Villa, D., Viviani, M., Ausonio, P., Travi, P., Bizzarri, G., & Serra, F. (2017). Efficient and multi-objective cavitating propeller optimization: An application to a high-speed craft. *Applied Ocean Research*, 64(1), 31–57.
<https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.01.018>
- Gawn, R. W. L. (1953). Effect of pitch and blade width on propeller performance. *RINA Transactions*, 95(1), 157–193.

- Gawn, R. W. L., & Burrill, L. C. (1957). Effect of cavitation on the performance of a series of 16 in. model propellers. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, 99, 690–728.
- Hadler, J. B. (1966). The Prediction of Power Performance on Planing Craft. *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 563–610.
- Harvald, S. A. (1983). *Resistance and Propulsion of Ships*. John Wiley & Sons.
<https://doi.org/0-471-06353-3>
- Holtrop, J. (1984). A Statistical Re-Analysis of Resistance and Propulsion Data. *International Shipbuilding Progress*, 31(363), 272–276.
- Holtrop, J., & Mennen, G. G. (1982). An Approximate Power Prediction Method. In *International Shipbuilding Progress* (Vol. 29, Issue July, pp. 166–170).
<https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Ichinose, Y., Tsujimoto, M., Shiraishi, K., & Sogihara, N. (2012). Decrease of Ship Speed in Actual Seas of a Bulk Carrier in Full Load and Ballast Conditions. *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 15(0), 37–45.
<https://doi.org/10.2534/jjasnaoe.15.37>
- International Maritime Organization. (n.d.). *Energy Efficiency Measures*. Retrieved September 3, 2018, from <http://www.imo.org/en/ourwork/environment/pollutionprevention/airpollution/pages/technical-and-operational-measures.aspx>
- Jensen, N., & Latorre, R. (1992). Prediction of Influence of Stern Wedges on Power Boat Performance. *Ocean Engng*, 19(3), 313–325.
- Jovaj, M. S. (1982). *Motores de Automovil* (MIR, Ed.; 1st ed.).
- Lahtiharju, E., Karppinen, T., Hellevaara, M., & Aitta, T. (1991). Resistance and Seakeeping Characteristics of Fast Transom Stern Hulls with Systematically Varied Form. *SNAME Transactions*, 99(1), 85–118.
- Luca, F. De, Mancini, S., Pensa, C., Staiano, G., & Federico, N. (2014). Numerical evaluation (CFD) of Wake and Thrust deduction fraction of a Warped Hard Chine Hulls

Systematic Series. *Proceedings of 10th RINA High Speed Marine Vehicles Symposium*.

MacPherson, D. M. (2004). *Reliable Speed Prediction: Propulsion Analysis and a Calculation Example* (pp. 1–9). HydroComp, Inc, IBEX 2004.

MAN Diesel & Turbo. (2013). Basic Principles of Ship Propulsion. In *MAN Diesel & Turbo*.
http://www.mandieselturbo.com/files/news/files/5405/5510_0004_03pprweb_low.pdf

Molland, A. F., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2011). *Ship Resistance and Propulsion* (Vol. 1). Cambridge University Press.
<http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9780511974113>

Moody, R. D. (1996). *Preliminary power prediction during early design stages of a ship* [M.Sc. dissertation]. School of Mechanical and Process Engineering at Cape Technikon, Cape Town, South Africa.

MTU. (2018). *Marine & Offshore Solution Guide*. www.mtu-online.com/contact

Peck, J. G., & Moore, D. H. (1974). *Inclined-Shaft Propeller Performance Characteristics*.

Pinto, L. A. V. (1995). *Um Estudo para Melhoria do Sistema Propulsivo de Navios com Motores de Baixa Rotação* [Tese de M.Sc.]. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Radojicic, D. (1991). An engineering approach to predicting the hydrodynamic performance of planing craft using computer techniques. In *RINA Transactions* (Vol. 133, pt. B).

Radojicic, D., Simić, A., & Kalajdžić, M. (2009). Fifty years of the Gawn-Burrill KCA propeller series. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects Part B: International Journal of Small Craft Technology*, 151(2), 9–17.
<https://doi.org/10.3940/rina.ijsc.2009.b2.92>

Ribeiro, H. J. (2002). *Equilíbrio Dinâmico de Cascos Planadores* [Tese de M.Sc.]. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Rutgersson, O. (1981). Cavitation on High Speed Propellers in Oblique Flow - Influence of Propeller Design and Interaction with Ship Hull. In *13th Symposium on Naval Hydrodynamics* (Issue 89).

- Savitsky, D. (1964). Hydrodynamic Design of Planning Hulls. *Marine Technology*, 1(1), 71–95.
- Savitsky, D., & Brown, P. W. (1976). Procedures for Hydrodynamic Evaluation of Planing Hulls in Smooth and Rough Water. *Marine Technology*, 13(4), 381–400.
- Taskar, B., Yum, K. K., Steen, S., & Pedersen, E. (2016). The Effect of Waves on Engine-Propeller Dynamics and Propulsion Performance of Ships. *Ocean Engineering*, 122(1), 262–277. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.06.034>
- Varda, N., Degiuli, N., & PEDIŠIĆ B., M. (2012). Resistance Prediction of Semiplaning Transom Stern Hulls. *XX Symposium SORTA*, 11.

Anexos

ANEXO A: Coeficientes Polinomiales de la Serie B	1
ANEXO B: Coeficientes Polinomiales de la Serie Gawn	2
ANEXO C: Matriz de Consistencia.....	3

ANEXO A: Coeficientes Polinomiales de la Serie B

n	K_T					K_Q				
	C_n	s_n	t_n	u_n	v_n	C_n	s_n	t_n	u_n	v_n
1	0,008805	0	0	0	0	0,003794	0	0	0	0
2	-0,20455	1	0	0	0	0,008865	2	0	0	0
3	0,166351	0	1	0	0	-0,03224	1	1	0	0
4	0,158114	0	2	0	0	0,003448	0	2	0	0
5	-0,14758	2	0	1	0	-0,04088	0	1	1	0
6	-0,4815	1	1	1	0	-0,10801	1	1	1	0
7	0,415437	0	2	1	0	-0,08854	2	1	1	0
8	0,014404	0	0	0	1	0,188561	0	2	1	0
9	-0,05301	2	0	0	1	-0,00371	1	0	0	1
10	0,014348	0	1	0	1	0,005137	0	1	0	1
11	0,060683	1	1	0	1	0,020945	1	1	0	1
12	-0,01259	0	0	1	1	0,004743	2	1	0	1
13	0,010969	1	0	1	1	-0,00723	2	0	1	1
14	-0,1337	0	3	0	0	0,004384	1	1	1	1
15	0,006384	0	6	0	0	-0,02694	0	2	1	1
16	-0,00133	2	6	0	0	0,055808	3	0	1	0
17	0,168496	3	0	1	0	0,016189	0	3	1	0
18	-0,05072	0	0	2	0	0,003181	1	3	1	0
19	0,085456	2	0	2	0	0,015896	0	0	2	0
20	-0,05045	3	0	2	0	0,047173	1	0	2	0
21	0,010465	1	6	2	0	0,019628	3	0	2	0
22	-0,00648	2	6	2	0	-0,05028	0	1	2	0
23	-0,00842	0	3	0	1	-0,03006	3	1	2	0
24	0,016842	1	3	0	1	0,041712	2	2	2	0
25	-0,00102	3	3	0	1	-0,03977	0	3	2	0
26	-0,03178	0	3	1	1	-0,0035	0	6	2	0
27	0,018604	1	0	2	1	-0,01069	3	0	0	1
28	-0,00411	0	2	2	1	0,001109	3	3	0	1
29	-0,00061	0	0	0	2	-0,00031	0	6	0	1
30	-0,00498	1	0	0	2	0,003599	3	0	1	1
31	0,002598	2	0	0	2	-0,00142	0	6	1	1
32	-0,00056	3	0	0	2	-0,00384	1	0	2	1
33	-0,00164	1	2	0	2	0,01268	0	2	2	1
34	-0,00033	1	6	0	2	-0,00318	2	3	2	1
35	0,000117	2	6	0	2	0,003343	0	6	2	1
36	0,000691	0	0	1	2	-0,00184	1	1	0	2
37	0,004217	0	3	1	2	0,000112	3	2	0	2
38	0,000057	3	6	1	2	-0,00003	3	6	0	2
39	-0,00147	0	3	2	2	0,00027	1	0	1	2
40						0,000833	2	0	1	2
41						0,001553	0	2	1	2
42						0,000303	0	6	1	2
43						-0,00018	0	0	2	2
44						-0,00043	0	3	2	2
45						0,000087	3	3	2	2
46						-0,00047	0	6	2	2
47						0,000055	1	6	2	2

ANEXO B: Coeficientes Polinomiales de la Serie Gawn

n	K_T					K_Q				
	C_n	s_n	t_n	u_n	v_n	C_n	s_n	t_n	u_n	v_n
1	-0,05586	0	0	0	0	0,005159	0	0	0	0
2	-0,2173	1	0	0	0	0,016067	2	0	0	0
3	0,260531	0	1	0	0	-0,04412	1	1	0	0
4	0,158114	0	2	0	0	0,006822	0	2	0	0
5	-0,14758	2	0	1	0	-0,04088	0	1	1	0
6	-0,4815	1	1	1	0	-0,07733	1	1	1	0
7	0,378123	0	2	1	0	-0,08854	2	1	1	0
8	0,014404	0	0	0	1	0,169375	0	2	1	0
9	-0,05301	2	0	0	1	-0,00371	1	0	0	1
10	0,014348	0	1	0	1	0,005137	0	1	0	1
11	0,060683	1	1	0	1	0,020945	1	1	0	1
12	-0,01259	0	0	1	1	0,004743	2	1	0	1
13	0,010969	1	0	1	1	-0,00723	2	0	1	1
14	-0,1337	0	3	0	0	0,004384	1	1	1	1
15	0,002412	0	6	0	0	-0,02694	0	2	1	1
16	-0,00053	2	6	0	0	0,055808	3	0	1	0
17	0,168496	3	0	1	0	0,016189	0	3	1	0
18	0,026345	0	0	2	0	0,003181	1	3	1	0
19	0,043601	2	0	2	0	0,012904	0	0	2	0
20	-0,03119	3	0	2	0	0,024451	1	0	2	0
21	0,012492	1	6	2	0	0,007006	3	0	2	0
22	-0,00648	2	6	2	0	-0,02719	0	1	2	0
23	-0,00842	0	3	0	1	-0,01665	3	1	2	0
24	0,016842	1	3	0	1	0,030045	2	2	2	0
25	-0,00102	3	3	0	1	-0,0337	0	3	2	0
26	-0,03178	0	3	1	1	-0,0035	0	6	2	0
27	0,018604	1	0	2	1	-0,01069	3	0	0	1
28	-0,00411	0	2	2	1	0,001109	3	3	0	1
29	-0,00061	0	0	0	2	-0,00031	0	6	0	1
30	-0,00498	1	0	0	2	0,003599	3	0	1	1
31	0,002596	2	0	0	2	-0,00142	0	6	1	1
32	-0,00056	3	0	0	2	-0,00384	1	0	2	1
33	-0,00164	1	2	0	2	0,01268	0	2	2	1
34	-0,00033	1	6	0	2	-0,00318	2	3	2	1
35	0,000117	2	6	0	2	0,003343	0	6	2	1
36	0,000691	0	0	1	2	-0,00184	1	1	0	2
37	0,004217	0	3	1	2	0,000112	3	2	0	2
38	0,000057	3	6	1	2	-0,00003	3	6	0	2
39	-0,00147	0	3	2	2	0,00027	1	0	1	2
40						0,000833	2	0	1	2
41						0,001553	0	2	1	2
42						0,000303	0	6	1	2
43						-0,00018	0	0	2	2
44						-0,00043	0	3	2	2
45						0,000087	3	3	2	2
46						-0,00047	0	6	2	2
47						0,000055	1	6	2	2

ANEXO C: Matriz de Consistencia

Optimización del Sistema de Propulsión de las Embarcaciones de Alta Velocidad mediante el Análisis por Herramientas Computacionales				
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGIA
<p>Problema General ¿Cómo determinar el desempeño propulsivo de las embarcaciones de alta velocidad, a fin de mejorar el rendimiento propulsivo de este tipo de embarcaciones?</p>	<p>Objetivo General Optimizar el sistema de propulsión de embarcaciones de alta velocidad, implementando un algoritmo que permite calcular y analizar con alta precisión el desempeño propulsivo.</p>	<p>Hipótesis General Considerar el comportamiento hidrodinámico en la estimación del desempeño propulsivo de las embarcaciones de alta velocidad, reducirá los errores de cálculo, permitiendo optimizar el sistema de propulsión.</p>	<p>Variable Dependiente Optimización del sistema de propulsión en embarcaciones de alta velocidad</p>	<p>Tipo de Investigación: Aplicada Nivel de Investigación: Descriptivo Enfoque: Cuantitativo Diseño: No Experimental</p>
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	Variables Independientes	Técnicas e Instrumentos de Recolección y Análisis de Datos
<ul style="list-style-type: none"> ¿Como se desempeña el propulsor cuando la embarcación opera en un régimen hidrodinámico de alta velocidad? 	<ul style="list-style-type: none"> •Caracterizar el desempeño del propulsor en regímenes de alta velocidad, utilizando una metodología de cálculo que considere los efectos hidrodinámicos generados al operar en estos regímenes. 	<ul style="list-style-type: none"> •La operación de la embarcación en altas velocidades afecta considerablemente al desempeño de la hélice, pudiendo generar la disminución de su eficiencia y aumento de los niveles de cavitación. 	<ul style="list-style-type: none"> •Desempeño de la hélice 	<p>Procedimiento: Adquisición de datos por prueba de navegación. Variables medidas: Torque, RPS y Potencia. Instrumentos utilizados: Extensómetros, dispositivo de telemetría, placa de adquisición de señales y Software de procesamiento de señales (LabVIEW).</p>
<ul style="list-style-type: none"> ¿Cuál es la influencia del comportamiento hidrodinámico en el desempeño propulsivo cuando la embarcación opera en altas velocidades? 	<ul style="list-style-type: none"> •Caracterizar el desempeño propulsivo de la embarcación cuando opera en altas velocidades, implementando una metodología de cálculo que considere la variación de las condiciones de navegación en altas velocidades. 	<ul style="list-style-type: none"> •Variaciones en factores del desempeño hidrodinámico, como la resistencia, coeficientes casco-hélice y condiciones de navegación, afectan considerablemente al desempeño propulsivo de los cascos de alta velocidad. 	<ul style="list-style-type: none"> •Desempeño propulsivo de la embarcación 	
<ul style="list-style-type: none"> ¿De qué manera se puede estimar el desempeño propulsivo de una embarcación de alta velocidad, a fin de obtener datos precisos que permitan determinar un sistema de propulsión óptimo 	<ul style="list-style-type: none"> •Implementar un algoritmo que permita estimar con precisión el desempeño propulsivo, considerando el comportamiento hidrodinámico de los cascos de planeo y realice un análisis íntegro del sistema casco-hélice-motor. 	<ul style="list-style-type: none"> •La implementación de una metodología de cálculo a través de un algoritmo, considerando el comportamiento hidrodinámico de los cascos de alta velocidad, permitirá obtener datos precisos del desempeño propulsivo, facilitando la optimización. 	<ul style="list-style-type: none"> •Algoritmo de cálculo de desempeño propulsivo y del propulsor 	