

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

EDUARDO HEIJI NISHIDA

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA AUXÍLIO
NA ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO E SELEÇÃO DO SISTEMA
PROPULSIVO DE EMBARCAÇÕES DESLOCANTES

Joinville

2018

EDUARDO HEIJI NISHIDA

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA AUXÍLIO
NA ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO E SELEÇÃO DO SISTEMA
PROPULSIVO DE EMBARCAÇÕES DESLOCANTES

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval, no Curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, no Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Dr. Eng. Thiago Pontin Tancredi.

Joinville

2018

EDUARDO HEIJI NISHIDA

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA AUXÍLIO
NA ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO E SELEÇÃO DO SISTEMA
PROPULSIVO DE EMBARCAÇÕES DESLOCANTES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval, no Curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, no Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville, 26 de junho de 2018.

Prof. Luís Fernando Peres Calil, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Thiago Pontin Tancredi, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Lucas Weihmann, Dr. Eng.
Membro

Prof. André Mitsuo Kogishi, Dr. Eng.
Membro

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a minha mãe Oraldina Nishida, que assumiu a difícil tarefa de ser mãe e pai ao mesmo tempo, muito obrigado por ser meu maior exemplo e por dedicar grande parte de sua vida para me proporcionar a oportunidade de ter uma educação de qualidade.

A meu irmão Maurício, pelo apoio e incentivo para sempre dar o melhor de mim durante a graduação.

À Larissa Vala, por todo o apoio, amor, carinho e compreensão durante este período de desenvolvimento deste trabalho.

Ao Dr. Thiago Pontin Tancredi que me orientou na busca de respostas em muitas das minhas questões durante a realização deste trabalho e também por toda sua dedicação e incentivos para melhorar a formação dos seus alunos durante as disciplinas a qual ministra.

Ao Dr. Jorge Luiz Góes Oliveira, que me acolheu gentilmente em seu projeto, compartilhando comigo o seu vasto conhecimento e experiência.

A Universidade Federal de Santa Catarina e principalmente ao Dr. Lucas Weihmann, que do seu próprio bolso adquiriu e disponibilizou a licença do programa Maxsurf, o qual foi utilizado em algumas etapas deste trabalho, também por ter aceitado atenciosamente o convite para avaliação deste trabalho apesar dos contratemplos.

Aos meus amigos Lucas Rocha, Guilherme Cordova, Guilherme Fiuza, Guilherme Belegante, Diogo, Wellington, Luiz e Roger que se tornaram meus irmãos na amizade e fizeram parte da minha formação.

Aos meus amigos e colegas de curso Leonardo Juppá e Guilherme Engel, que me acompanharam nesta grande jornada durante o curso, sempre dispostos de um bom humor.

RESUMO

O correto dimensionamento do sistema propulsivo de uma embarcação é uma das etapas de maior importância no projeto de um navio. Seu funcionamento tem impacto direto no consumo de combustível, conseqüentemente afeta a lucratividade do transporte de cargas e a emissão de gases poluentes. A seleção adequada do sistema propulsivo é bastante complexa, pois é resultante de diversos fatores, que vão desde o cálculo da resistência ao avanço, até estudos de cavitação e vibração associados à dinâmica do fluido no entorno do propulsor. Visto que em navios mercantes o hélice é o tipo de propulsor de maior aplicação, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional construída em Delphi, para o auxílio na estimativa de resistência ao avanço pelo método de Holtrop e Mennen, seleção de hélice da série sistemática de Wageningen (Série B) e a seleção do motor principal da embarcação. O sistema desenvolvido visa selecionar o propulsor e o motor cujas características maximizem a eficiência do sistema, satisfazendo o critério de cavitação estabelecido para o projeto. O trabalho também apresenta a realização de três estudos de caso, que demonstram a verificação dos conceitos teóricos aplicados no desenvolvimento da ferramenta. Os resultados obtidos demonstraram-se coerentes com aqueles observados nas embarcações de estudo e evidenciaram a necessidade de ajustes nos parâmetros do hélice, como a redução do intervalo da razão passo/diâmetro, razão de áreas e o número de pás do propulsor, para obter uma configuração de maior desempenho. Apesar de algumas divergências dos resultados de potência de motorização determinados pela ferramenta, a mesma mostra-se bastante eficiente em etapas iniciais de projeto. Em relação à ferramenta computacional foi possível observar a eficácia e a praticidade em sua utilização.

Palavras-chave: Ferramenta computacional, Holtrop e Mennen, Série de Wageningen, Integração Casco-Hélice-Motor, Sistema propulsivo.

ABSTRACT

The correct sizing of the propulsion system of a vessel is one of the most important steps in a ship project. Its operation has a direct impact on the fuel consumption, consequently affects the profitability of loads transportation and the emission of pollutants. The proper selection of the propulsive system is quite complex, as it is the result of several factors, ranging from the calculation of ship resistance to studies of cavitation and vibration associated with the fluid dynamics around the propeller. Since in merchant ships the propeller is the propellant of greater application, the present work presents the development of a computational tool built in Delphi, for the aid in the estimation of ship resistance by the method of Holtrop and Mennen, selection of propeller of the systematic series of Wageningen (B-Series) and the selection of the main engine of the vessel. The system developed aims to the propeller and main engine selection whose characteristics maximize the efficiency of the system, satisfying the cavitation criteria established for the project. The paper also presents three studies case, which demonstrate the verification of the theoretical concepts applied in the development of the tool. The results obtained were shown to be in agreement with those observed in the ship study and evidenced the need for adjustments in the propeller parameters, such as the reduction of the pitch/diameter interval, blade area ratio and the number of propeller blades, to obtain a set with the maximum performance. Despite some divergences of the results of brake horsepower determined by the tool, the same one is shown quite efficient in initial stages of design. Regarding the computational tool, it was possible to observe the efficacy and the practicality in its use.

Keywords: Computational tool, Holtrop-Mennen, Wageningen B-Series, Hull-Propeller-Engine interaction, Propulsive system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geometria do hélice	20
Figura 2 – Exemplo de curvas K_T , K_Q , η	26
Figura 3 – Fenômeno de cavitação.	28
Figura 4 – Diagrama de Burrill.	28
Figura 5 – exemplo de um <i>diagrama de operação</i>	30
Figura 6 – Apresentação simplificada das potências em um navio.	33
Figura 7 – Integração Casco - hélice.	35
Figura 8 – Fluxograma do funcionamento do modulo de resistência ao avanço.	38
Figura 9 – Fluxograma do funcionamento do modulo de seleção do hélice.	39
Figura 10 – Fluxograma do funcionamento do modulo de seleção do motor.	39
Figura 11 – Parâmetros de entrada para estimativa de resistência pelo método de Holtrop. ...	41
Figura 12 – Interface de resposta da ferramenta.	42
Figura 13 – Módulo de resistência ao avanço.	43
Figura 14 – Comparação da resistência das embarcações de referência.	45
Figura 15 – Parâmetros de entrada do módulo de seleção do hélice.	47
Figura 16 – Opções de escolha do hélice.	49
Figura 17 – Exemplo de resultados da seleção do hélice.	50
Figura 18 – Exemplo do critério de cavitação aplicado na ferramenta.	52
Figura 19 – Ferramenta de seleção do hélice.	53
Figura 20 – Ferramenta de seleção do motor principal.	56
Figura 21 – Estudo de caso: Resistência ao avanço.	60
Figura 22 – Estudo de caso: Seleção hélice.	61
Figura 23 – Estudo de caso: Critérios de cavitação.	62
Figura 24 – Diagrama de operações dos motores selecionados.	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Erro percentual da resistência ao avanço.	46
Gráfico 2 – Regressão das curvas do diagrama de Burrill.	51
Gráfico 3 – Verificação do hélice.....	54
Gráfico 4 – Erro percentual entre o valor da potência calculada e real.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Restrições do método de Holtrop e Mennen.....	18
Tabela 2 – Parâmetros da Série B.....	25
Tabela 3 – Parâmetros geométricos dos hélices testados da série de Wageningen.....	27
Tabela 4 – Dados das embarcações.....	44
Tabela 5 – Dados da ferramenta para seleção do hélice.....	55
Tabela 6 – Coeficientes de forma para navios mercantes.....	58
Tabela 7 – Dados dos navios de estudo.....	59
Tabela 8 – Coeficientes de forma adotados.....	59
Tabela 9 – Avaliação das restrições do métodos Holtrop e Mennen.....	60
Tabela 10 – Parâmetros dos hélices obtidos.....	61
Tabela 11 – Avaliação quanto a cavitação.....	63
Tabela 12 – Valores dos parâmetros de erro percentual obtidos.....	65
Tabela 13 – Resultado dos motores selecionados.....	66
Tabela 14 – Constantes do polinômio para determinar o Coeficiente de Torque.....	72
Tabela 15 – Constantes do polinômio para determinar o Coeficiente de Empuxo.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BAR	Blade Area Ratio
BHP	Brake Horse Power
DHP	Delivered Horse Power
EHP	Effective Horse Power
ITTC	International Towing Tank Conference
LCB	Longitudinal Center of Buoyancy
MCR	Maximum Continuous Rating
NCR	Normal Continuous Rating
NSMB	Netherlands Ship Model Basin
RINA	The Royal Institution of Naval Architects
SHP	Shaft Horse Power
THP	Thrust Horse Power
VLCC	Very Large Crude Carrier

LISTA DE SÍMBOLOS

$(I+k)$	Fator de forma
A_0	Área do disco do hélice
A_E	Área expandida do hélice
A_E/A_0	Razão de áreas do hélice
B	Boca do navio
C_B	Coefficiente de bloco
C_M	Coefficiente de seção mestra
C_P	Coefficiente prismático
C_{WP}	Coefficiente de linha d'água
D	Diâmetro do propulsor
F_n	Número de Froude
J	Coefficiente de avanço
K_Q	Coefficiente de torque do hélice
K_T	Coefficiente de empuxo do hélice
L	Comprimento do navio
L_{cb}	Posição longitudinal do centro de flutuação a partir da popa para a proa
L_{LWL}	Comprimento da linha d'água
L_{OA}	Comprimento total do navio
L_{pp}	Comprimento entre perpendiculares do navio
n	Revoluções do propulsor por segundo
P	Passo do hélice
P/D	Razão passo diâmetro do hélice
R_a	Parcela da resistência proveniente da correlação modelo-navio
R_{app}	Parcela da resistência proveniente dos apêndices
R_B	Parcela da resistência proveniente do bulbo
R_F	Parcela da resistência proveniente do atrito entre o casco-fluido
R_T	Resistência ao avanço total
$R_{transom}$	Parcela da resistência gerada pela popa do navio
R_w	Parcela da resistência proveniente de ondas
T	Calado do navio na meia nau

t	Coeficiente de redução da força propulsora
V_a	Velocidade de avanço
V_s	Velocidade da embarcação
Z	Número de pás
η_H	Eficiência do casco
η_o	Eficiência do hélice em águas abertas
η_P	Eficiência propulsora
η_R	Eficiência relativa rotativa
ρ	Densidade da água salgada em condições normais de pressão e temperatura
ω	Coeficiente de esteira

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	Objetivos Específicos.....	15
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	RESISTÊNCIA AO AVANÇO.....	17
2.2	MÉTODO DE HOLTROP E MENNEN.....	18
2.3	PROPULSOR.....	19
2.3.1	Geometria do hélice.....	19
2.3.2	Coefficientes de propulsão	21
2.3.3	Série sistemática de Wageningen	25
2.3.4	Cavitação.....	27
2.4	MOTOR.....	30
2.5	INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE-MOTOR	33
2.6	TRABALHOS SEMELHANTES	36
3	DESENVOLVIMENTO	38
3.1	LINGUAGEM E FERRAMENTAS	40
3.2	MÓDULO PARA A RESISTÊNCIA AO AVANÇO	40
3.2.1	Verificação da ferramenta de resistência ao avanço	43
3.3	MÓDULO PARA A SELEÇÃO DO PROPULSOR	46
3.3.1	Verificação da ferramenta de seleção do propulsor	53
3.4	MÓDULO PARA A SELEÇÃO DO MOTOR.....	55
4	ESTUDO DE CASO	57
4.1	ANÁLISE DAS EMBARCAÇÕES.....	58
5	CONCLUSÃO	68
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69

1 INTRODUÇÃO

No âmbito naval, o projeto do sistema propulsivo de uma embarcação é de extrema importância para a lucratividade do transporte de cargas. Além do interesse econômico, é imprescindível que o sistema seja eficiente e atenda às normas ambientais, minimizando o alto consumo de combustíveis fósseis e reduzindo a produção de poluentes.

O sistema propulsivo é o conjunto de equipamentos responsável pela movimentação do navio. Existem diversos tipos de sistemas propulsivos para embarcações, os mais comuns são os propulsores do tipo azimutal, cicloidal, jato d'água e o hélice.

Entre os diferentes meios de propulsão, o sistema composto de um hélice acionado por um motor principal, de combustão ou elétrico, é o tipo de propulsor utilizado na maior parte dos navios mercantes que atualmente estão navegando.

A determinação dos componentes de um sistema de propulsão é um processo composto por várias etapas, sendo as principais: a determinação da resistência ao avanço da embarcação, a seleção das características do hélice, e a escolha do motor principal. No entanto, a própria tarefa de determinar a resistência ao avanço de uma embarcação apresenta grande complexidade.

Nas etapas iniciais do projeto, a determinação da resistência ao avanço, em geral, é feita, utilizando-se modelos empíricos. A medida que o projeto progride, técnicas com maior precisão podem ser utilizadas, tais como as simulações numéricas e as análises experimentais.

Porém os custos elevados e a demanda considerável de tempo e tecnologia, fazem com que nem sempre seja possível determinar a resistência ao avanço da embarcação realizando ensaios em tanques de prova ou simulações numéricas de alta fidelidade.

O presente trabalho visa o desenvolvimento de uma ferramenta computacional, que a partir do método de (HOLTROP; MENNEN, 1984) para a estimativa da resistência ao avanço, realiza a busca automatizada do propulsor ideal da Série B de Wageningen (LAMMEREN; MANEN; OOSTERVERLD, 1969) e por fim, realiza a escolha do motor principal (MAN, 2011).

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma ferramenta computacional para o cálculo da estimativa da resistência ao avanço de embarcações deslocantes utilizando o método de Holtrop e Mennen, assim como a seleção de propulsor da série sistemática de Wageningen e a seleção de um motor principal de combustão.

A ferramenta deverá realizar a seleção do propulsor de maneira automática, maximizando a eficiência do sistema, além de atender aos critérios de cavitação impostos ao projeto. Para alcançar o objetivo principal, propõe-se os objetivos específicos descritos abaixo.

1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram divididos em três componentes:

- a) desenvolver um módulo que forneça a estimativa de resistência ao avanço de embarcações deslocantes:
 - implementar um algoritmo com o método de Holtrop e Mennen (1984);
 - criar uma interface para o usuário fornecer como entrada os parâmetros para o cálculo da resistência;
 - gerar uma interface de saída, gráfico de resistência ao avanço pela velocidade de serviço, tabela com valores das parcelas da resistência;
 - desenvolver uma forma de exportar os dados calculados pela ferramenta;
 - verificar os resultados de resistência ao avanço, comparando-os diretamente os o programa Maxsurf.

- b) desenvolver um módulo para seleção do propulsor da Série B de Wageningen:
 - desenvolver um algoritmo dos polinômios K_T , K_Q , η_0 ;
 - criar uma interface para o usuário fornecer como entrada os parâmetros;
 - implementar um algoritmo para determinar o coeficiente de avanço do hélice,
 - gerar uma opção de busca de propulsor, variando intervalos de busca dos parâmetros do hélice;
 - implementar os polinômios do diagrama de Burrill para os critérios de cavitação;

- produzir as curvas K_T , K_Q , η_0 por J e as curvas de Burrill como saída ao usuário;
 - verificar os critérios de cavitação;
 - definir eficiências do sistema propulsivo;
 - desenvolver uma forma de exportar os dados calculados pela ferramenta;
 - verificar as curvas K_T , K_Q , η_0 da ferramenta com as da Série B.
- c) desenvolver um módulo para seleção do motor principal de combustão:
- implementar um banco de dados com motores;
 - criar uma interface para a seleção do motor;
 - gerar alternativas de escolha, fabricante, número de cilindros, modelo e redução da rotação;
 - gerar saída da interface, gráfico de potência do motor e ponto de operação do hélice;
 - realizar estudos de casos.

Além dos objetivos descritos acima, a ferramenta desenvolvida visa também auxiliar o projetista a realizar a etapa de integração casco-hélice-motor, em fases iniciais do projeto, de forma rápida e eficiente, comparado ao método tradicional utilizado.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é estruturado conforme a divisão dos capítulos a seguir:

- a) no capítulo 2, são descritos os fundamentos teóricos essenciais para o desenvolvimento da ferramenta computacional, envolvendo a resistência ao avanço de embarcações deslocantes, características do hélice, seleção do motor principal;
- b) no capítulo 3, é apresentado os procedimentos principais, realizados na construção e desenvolvimento da ferramenta;
- c) no capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos pela ferramenta para três estudos de casos;
- d) no capítulo 5, são apresentadas as discussões e conclusões dos resultados, assim como as recomendações para melhorias da ferramenta desenvolvida.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo tem por objetivo apresentar os fundamentos teóricos essenciais para o desenvolvimento deste trabalho, como a caracterização da resistência ao avanço de cascos deslocantes e suas parcelas, seguido dos métodos de obtenção da resistência. Posteriormente este capítulo abrange o embasamento teórico sobre propulsores do tipo hélice, seleção otimizada e pôr fim a determinação do motor principal de combustão.

2.1 RESISTÊNCIA AO AVANÇO

A resistência de um navio é a força resultante que se opõe ao movimento de avanço da embarcação, quando esse navega uma certa velocidade. De forma análoga é a força necessária para mover o navio com certa velocidade, ao navegar em águas calmas.

A determinação da resistência é etapa indispensável no projeto de um navio, pois ela fornece a resposta necessária para estabelecer a potência exigida do motor, quando a embarcação navega em uma dada velocidade. Existem diversas abordagens que descrevem a como realizar a estimativa da resistência ao avanço de embarcações deslocantes, os mais importantes são:

- a) ensaio com modelo em escala reduzida;
- b) métodos estatísticos;
- c) métodos computacionais;
- d) ensaio em escala real.

O método empregado neste trabalho é baseado em um modelo matemático para a determinação da resistência ao avanço, obtido através da regressão estatística dos resultados de resistência de modelos em escala, método desenvolvido por Holtrop e Mennen (1984).

2.2 MÉTODO DE HOLTROP E MENNEN

Holtrop e Mennen (1982, 1984) desenvolveram o modelo matemático para a determinação da resistência ao avanço, obtido através da regressão estatística dos resultados de resistência de modelos em escala ensaiados no Netherlands Ship Model Basin (NSMB).

O método possui certas limitações, quanto aos coeficientes de forma das embarcações e a algumas razões entre dimensões, devido a geometria dos modelos usados nos experimentos. Essas limitações são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Restrições do método de Holtrop e Mennen.

Navio	L/B	B/T	C_p	F_n máx.
Tanques / Graneleiros	$5,1 < \frac{L}{B} < 7,1$	$2,4 < \frac{B}{T} < 3,2$	$0,73 < C_p < 0,85$	0,24
Carga Geral	$5,3 < \frac{L}{B} < 8,0$	$2,4 < \frac{B}{T} < 4,0$	$0,58 < C_p < 0,72$	0,30
Pesqueiros / Rebocadores	$3,9 < \frac{L}{B} < 6,3$	$2,1 < \frac{B}{T} < 3,0$	$0,75 < C_p < 0,65$	0,38
Contêineiro / Fragatas	$6,0 < \frac{L}{B} < 9,5$	$3,0 < \frac{B}{T} < 4,0$	$0,55 < C_p < 0,67$	0,45

Fonte: Molland (2011).

A resistência total ao avanço a partir do método é obtida através da Equação (1):

$$R_T = (1 + k)R_F + R_{app} + R_w + R_B + R_{transom} + R_a \quad (1)$$

Onde:

- R_T é a resistência total;
- $(1+k)$, fator de forma;
- R_F é a resistência friccional ou resistência de atrito, determinada pelo método do ITTC (1957);
- R_{app} , resistência de apêndices;
- R_w , resistência de onda;
- R_B , resistência gerada pelo bulbo;
- $R_{transom}$, resistência gerada pela popa, sendo esta dependente da forma, geometria, da popa transom;
- R_a , resistência de correlação, entre modelo-navio.

Apesar das limitações, o método de Holtrop e Mennen (1984) ainda é bastante utilizado. Em etapas iniciais de projeto de uma embarcação, o método fornece uma boa estimativa da resistência ao avanço, desde que cumpra as restrições mostradas na Tabela 1.

2.3 PROPULSOR

Segundo Brinati (2010), a função do propulsor é converter a potência fornecida pelo motor para a produção do empuxo necessário à propulsão do navio.

Os tipos de propulsores existentes para embarcações são:

- a) hélice de passo fixo;
- b) hélice de passo controlável;
- c) propulsor azimutal;
- d) propulsor cicloidal ou *Voith Schneider*;
- e) hélice de duto;
- f) propulsor lateral de proa ou *Bow Thruster*;
- g) propulsor lateral de popa ou *Aft Thruster*;
- h) jato d'água.

Segundo Trindade (2012), em qualquer tipo de navio há a presença de um propulsor, cuja a função é gerar uma força propulsiva. Existem diversas soluções propulsivas, mas predominantemente os navios continuam utilizando hélices simples como meio de propulsão.

A seguir, são descritos alguns dos parâmetros referentes a geometria do hélice, os quais são necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

2.3.1 Geometria do hélice

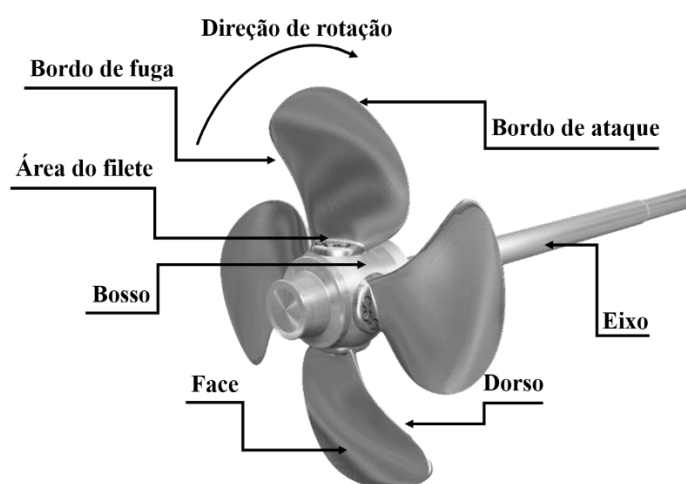
Um propulsor do tipo hélice é constituído de um conjunto de pás distribuídas uniformemente em torno de um cubo, montado na extremidade de um eixo, ver Figura 1.

Segundo Trindade (2012), nessa geometria distinguem-se os seguintes elementos:

- a) bordo de ataque (*leading edge*);
- b) bordo de fuga (*trailing edge*);

- c) extremidade da pá (*tip*);
- d) dorso (*back*);
- e) diâmetro do hélice (*propeller diameter, D*);
- f) diâmetro do cubo (*boss diameter, d*);
- g) número de pás (*propeller blade number, Z*);
- h) passo do hélice (*propeller pitch, P*);
- i) área do disco (A_0);
- j) área projetada (A_p);
- k) área expandida (A_e);
- l) deslocamento circunferencial (*skew*);
- m) inclinação axial (*rake*).

Figura 1 – Geometria do hélice



Fonte: Figura adaptada de Wartsila¹.

Além dos parâmetros descritos, existem relações adimensionais que são de extrema importância para a caracterização dos hélices, sendo esses:

- a) razão de áreas (*blade area ratio, A_e/A_0*);
- b) razão passo diâmetro do hélice (P/D);

¹ Disponível em: <<https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/propulsors-gears/propellers/wartsila-controllable-pitch-propeller-systems>> Acesso em: 21 Jun. 2018.

- c) razão entre diâmetros (d/D).

2.3.2 Coeficientes de propulsão

Segundo (MOLLAND, 2011) há diversos parâmetros que descrevem o desempenho do propulsor quando submetido a uma certa condição de operação:

- a) empuxo (*Thrust*, T);
- b) torque (*Torque*, Q);
- c) revoluções por segundo (*Revs/sec*, n);
- d) velocidade de avanço (*Speed of advance*, V_a).

Outro parâmetro fundamental no dimensionamento de um propulsor é o coeficiente de esteira, que é relacionado com a velocidade do navio e a velocidade em que o fluxo de água é entregue ao propulsor. Segundo Brinati (2010) existe uma relação entre a velocidade do navio e a velocidade relativa entre hélice e água, chamada de *velocidade de avanço*. A viscosidade do fluido é responsável pela formação de uma esteira na popa do navio, pois o fluido junto ao casco tende a deslocar-se com a mesma velocidade do casco, já as partículas do fluido localizadas em regiões mais afastadas permanecem sem movimento.

Para correlacionar a velocidade de esteira e a velocidade de avanço do fluido utiliza-se a Equação (2):

$$V_a = V_s(1 - \omega) \quad (2)$$

Onde V_a é a velocidade de avanço, V_s a velocidade do navio e ω o coeficiente de esteira.

Adimensionalizando a velocidade de avanço pela rotação do propulsor, temos o coeficiente de avanço, J , calculado por:

$$J = \frac{V_a}{n D} \quad (3)$$

Onde n é a rotação em segundos do propulsor e D o diâmetro.

O coeficiente de esteira pode ser estimado com o auxílio de modelos empíricos. Segundo Holtrop e Mennen (1984), o coeficiente de esteira de um navio mercante equipado com um hélice pode ser estimado pela Equação (4):

$$\omega = C_9 C_{20} C_v \frac{L}{T} \left(0,050776 + 0,93495 C_{11} \frac{C_v}{(1 - C_{p1})} \right) + 0,27915 C_{20} \sqrt{\frac{B}{L(1 - C_{p1})}} + C_{19} C_{20} \quad (4)$$

Já o coeficiente de esteira para um navio mercante equipado com hélice duplos e idênticos, pode ser estimado, segundo Holtrop e Mennen (1982) pela Equação (5):

$$\omega = 0,3095 C_B + 10 C_v C_B - 0,23D/\sqrt{BT} \quad (5)$$

Segundo Trindade (2012) a força propulsiva T é maior que a resistência avaliada apenas com o casco nu, sem considerar o funcionamento do hélice. A presença do hélice induz uma resistência adicional devido ao atrito e a diminuição da pressão na região da popa do navio.

O aumento da resistência devido ao efeito da presença do hélice é usualmente representado por uma redução da força propulsora expressa como fração dessa força. (TRINDADE, 2012, p.63).

O coeficiente de redução da força propulsora t pode ser estimado a partir de modelos empíricos. Para navios mercantes equipados com um único hélice, Holtrop e Mennen (1984) propõe a Equação (6):

$$t = 0,25014 (B/L)^{0,28956} (\sqrt{BT}/D)^{0,2624} / (1 - C_p + 0,0225lcb)^{0,01762} + 0,0015 C_{stern} \quad (6)$$

E segundo Holtrop e Mennen (1982) o coeficiente de redução da força propulsora para hélices gêmeos pode ser estimado por:

$$t = 0,325C_B - 0,1885D/\sqrt{BT} \quad (7)$$

Os parâmetros K_T , K_Q , correspondem ao coeficiente de empuxo e ao coeficiente de torque respectivamente; os quais são definidos segundo as Equações (8) e (9):

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (8)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (9)$$

Uma vez determinado os parâmetros de desempenho, pode-se determinar a eficiência do propulsor (η_0), ao operar em águas abertas por meio da Equação (10):

$$\eta_0 = \frac{J K_T}{2\pi K_Q} \quad (10)$$

Através dos parâmetros descritos pelas Equações (3), (8) e (9) determina-se qual a melhor eficiência para determinada velocidade de avanço da embarcação. Em geral, o resultado experimental referente ao desempenho de um propulsor é mostrado na forma de um gráfico de desempenho.

Além da eficiência do propulsor em águas abertas, existem outras eficiências que compõem o sistema propulsivo, como a eficiência de transmissão, eficiência do casco, entre outras.

A eficiência do casco representa os efeitos da interação entre o hélice e o casco, sendo definido como a razão entre a potência efetiva e a potência fornecida pelo hélice, apresentado na Equação (11). (BRINATI, 2010).

$$\eta_H = \frac{(1 - t)}{(1 - \omega)} \quad (11)$$

A eficiência do propulsor é a relação entre a potência efetiva e potência absorvida pelo hélice.

$$\eta_p = \frac{R_T V}{2\pi n Q} = \frac{P_E}{P_D} \quad (12)$$

Ou:

$$\eta_p = \eta_0 \eta_H \eta_R \quad (13)$$

Onde R_T é resistência total ao avanço, V é velocidade do navio, P_E é a potência efetiva: $P_E = R_T V$, P_D é a potência absorvida, ou potência entregue ao propulsor: $P_D = 2\pi n Q$, n é a rotação do motor, e Q é o torque. Onde η_R é a eficiência relativa rotativa, que segundo Holtrop e Mennen (1982), pode ser estimada para embarcações equipadas com um único hélice pela Equação (14), e uma para embarcações equipadas com hélices gêmeos, pela Equação (15).

Roh (2018) define a eficiência relativa rotativa como um fator que afeta a eficiência do hélice, pelo fato da velocidade real do escoamento de água que flui para o hélice não ser constante e nem perpendicular à área das pás, o fluxo comporta-se de forma rotacional. Portanto, comparado a um hélice em águas abertas, a eficiência do hélice é afetada por este fator. Em outras palavras é a razão entre a eficiência do hélice acoplada ao navio e a eficiência do hélice em águas abertas.

$$\eta_R = 0,9737 + 0,111(C_P - 0,0225 lcb) - 0,06325 P/D \quad (14)$$

$$\eta_R = 0,9922 - 0,05908 A_E/A_0 + 0,07424(C_P - 0,0225 lcb) \quad (15)$$

Define-se também a eficiência de transmissão como um fator de correção devido a perdas entre o motor principal e o hélice.

A eficiência de transmissão é um parâmetro que está relacionado com as perdas de potência que ocorrem entre a máquina principal e o hélice. Sistemas propulsores com acionamento direto do hélice, caso de instalações Diesel direta, têm maior eficiência, em torno de 0,98 a 0,99; instalações que usam engrenagens redutoras têm menor eficiência, em torno de 0,96 a 0,97. (BRINATI, 2010, p.16).

$$\eta_T \approx 0,98 \text{ a } 0,99 \quad (16)$$

Definidas as eficiências que compõem o sistema propulsivo de uma embarcação, é necessário descrever a etapa de seleção do hélice, que normalmente é realizada utilizando séries sistemáticas para hélices. A série sistemática utilizada neste trabalho é série de Wageningen, descrita na seção seguinte.

2.3.3 Série sistemática de Wageningen

Segundo (TRINDADE, 2012) a série de Wageningen é uma das séries sistemáticas mais populares, sendo que os trabalhos iniciais desta série são datados por volta de 1940. As principais características são: a distribuição radial do passo constante, pequeno *Skew*, *Rake* linear de 15° e um contorno da pá largo em sua extremidade.

Como já descrito anteriormente, a série sistemática de Wageningen, ou também conhecida como Série B é formada pelos resultados referentes ao ensaio de aproximadamente 120 hélices, cuja variação de parâmetros é listada na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros da Série B.

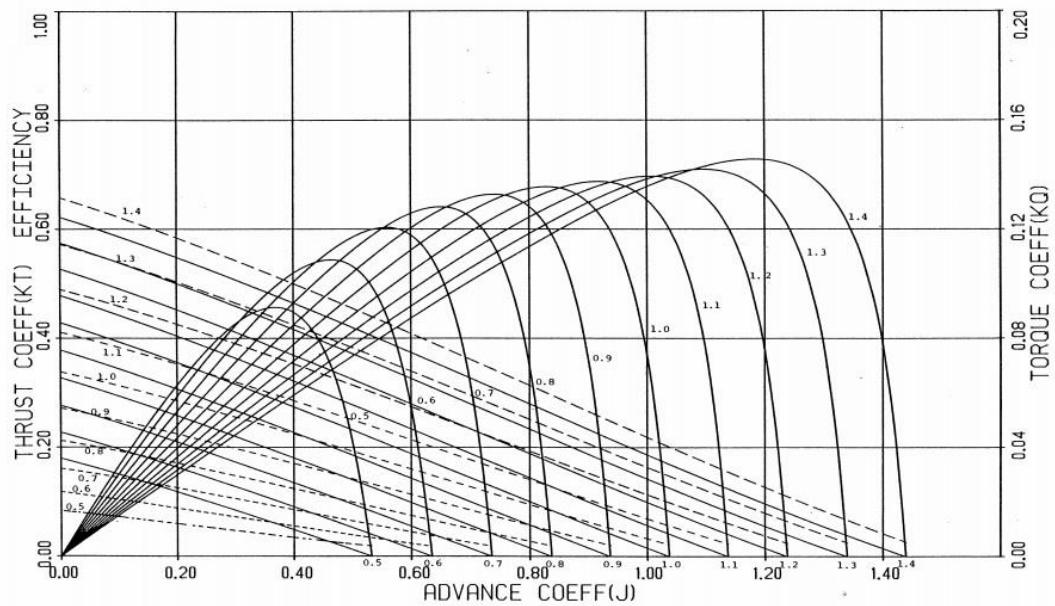
Número hélices	120
<i>Z</i>	2 a 7
<i>A_E/A₀</i>	0,3 a 1,05
<i>P/D</i>	0,6 a 1,40
<i>D</i> (mm)	250

Fonte: Carlton (2012).

A nomenclatura dos hélices da série é determinada através dos seguintes parâmetros:
Exemplo: B-5.45.

Sendo que *B* indica que o hélice faz parte da Série B, o número 5 indica que possui cinco pás e 0,45 representa a razão de áreas.

Tradicionalmente o resultado de uma série sistemática de propulsores é mostrado na forma de um conjunto de gráficos como o representado na Figura 2

Figura 2 – Exemplo de curvas K_T , K_Q , η .

Fonte: Bernitsas (1981).

No entanto, a utilização dos gráficos torna a seleção de um propulsor um processo manual de difícil automatização, inviabilizando a utilização de técnicas de otimização.

Por essa razão, Oosterveld e Oossanen (1975) desenvolveram polinômios capazes de interpolar com relativa precisão o conjunto de dados experimentais pertencentes a Série B, permitindo que os valores de K_T e K_Q possam ser calculados por meio das Equações (17) e (18), respectivamente.

$$K_Q = \sum_{n=1}^{47} C_n(j)^{S_n} (P/D)^{t_n} (A_E/A_0)^{u_n} (Z)^{v_n} \quad (17)$$

$$K_T = \sum_{n=1}^{39} C_n(j)^{S_n} (P/D)^{t_n} (A_E/A_0)^{u_n} (Z)^{v_n} \quad (18)$$

Onde S_n , t_n , u_n e v_n são constantes, disponíveis no Anexo A.

Esses polinômios foram obtidos através de uma análise de regressão múltipla dos dados originais do teste de águas abertas de 120 modelos de hélices que compõem a Série B. (OOSTERVELD; OOSSANEN, 1975, p. 3).

É importante ressaltar que os hélices os quais foram ensaiados originalmente da série sistemática de Wageningen possuem os parâmetros geométricos apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros geométricos dos hélices testados da série de Wageningen.

Z	A_E/A_0								
2	0,30								
3	0,35		0,50		0,65		0,80		
4		0,40		0,55		0,70		0,85	1,00
5			0,45		0,60		0,75		1,05
6				0,50		0,65		0,80	
7					0,55		0,70		0,85

Fonte: Lammeren (1969).

Já os polinômios descritos nas Equações (17) e (18), utilizam todas as razões de áreas para cada número de pás originalmente testados pela série, variando a razão de áreas de 0,30 a 1,05 com o acréscimo de 0,05 a cada novo hélice.

2.3.4 Cavitação

Segundo (PADOVEZI, 1997) um dos aspectos mais estudados em propulsores é a cavitação, pois esse é um fator limitante no projeto de um hélice. Esse fenômeno ocorre em regiões das pás onde a pressão do fluido torna-se menor que a pressão de vapor da água.

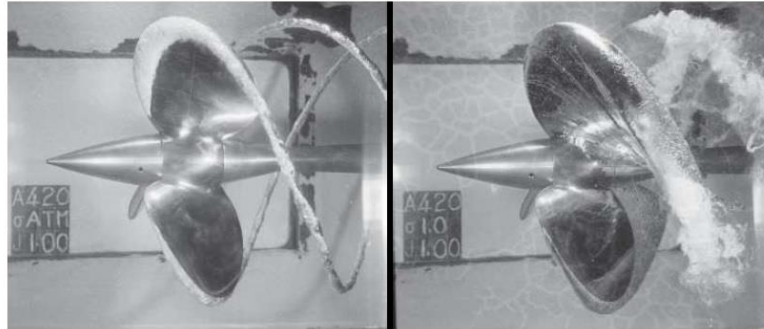
Sempre que a pressão em determinado ponto do hélice alcançar a pressão crítica de vapor, as condições de funcionamento tornam-se precárias, causando ruído, vibrações induzidas pelo propulsor, redução do rendimento e erosão das pás. (NETTO, 1998).

Quando a pressão absoluta em um determinado ponto se reduz a valores abaixo de um certo limite, alcançando o ponto de ebulição da água para essa pressão, esse líquido começa a ferver e os condutos ou peças passam a apresentar, em parte, bolsas de vapor dentro da própria corrente. (NETTO, 1998, p.286).

Este fenômeno de formação e destruição de bolhas de vapor acabam por desgastar o material das pás, gerando cavidades ao longo do hélice, sendo por essa razão denominado de cavitação. A erosão por cavitação ocorrerá se a formação e destruição das bolhas ocorrer junto

à superfície da pá. Na Figura 3 é possível observar o fenômeno de cavitação ocorrendo no bordo da pá.

Figura 3 – Fenômeno de cavitação.

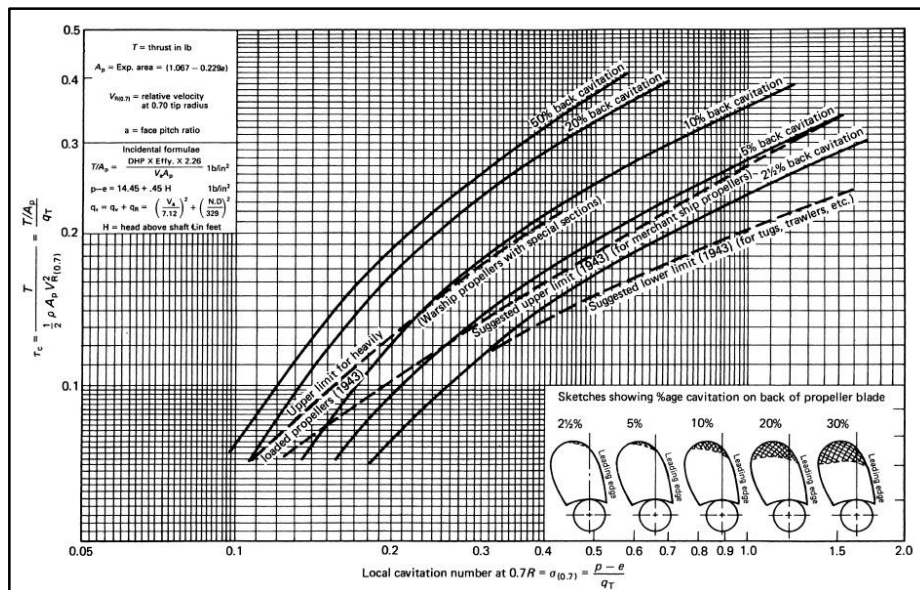


Fonte: Molland (2011).

A forma mais usual para verificar a ocorrência de cavitação em hélices consiste na utilização do diagrama de Burrill, o qual é mostrado na Figura 4.

Segundo Padovezi (1997), esse diagrama foi construído a partir dos resultados obtidos em ensaios de hélices com geometrias variadas realizado em túneis de cavitação e relacionam o coeficiente de carregamento resultante da pressão nas pás e o índice de cavitação relativo à velocidade resultante na seção.

Figura 4 – Diagrama de Burrill.



Fonte: Carlton (2012).

Padovezi ainda afirma que apesar de ser um método empírico, que apresentam informações aproximadas do comportamento dos hélices referente a cavitação, os resultados obtidos na prática são bastante confiáveis.

O coeficiente de Burrill (referente ao eixo y do diagrama) pode ser calculado através da Equação (19).

$$\tau_c = \frac{T}{0,5\rho A_P V_R^2} \quad (19)$$

Onde V_R é a velocidade referente a 0,7 do raio do hélice, definido pela Equação (20), e A_P é a área projetada, a qual pode ser calculada por meio da Equação (21).

$$V_R = \sqrt{V_a^2 + (0,7\pi nD)^2} \quad (20)$$

$$A_P = A_D(1,067 - 0,229 P/D) \quad (21)$$

Onde A_D é a área desenvolvida, equivalente a razão de áreas BAR .

Já o número de cavitação (referente ao eixo x do diagrama) pode ser calculado através da Equação (22), para utilizar o diagrama de Burrill.

$$\sigma = \frac{\rho gh + P_{atm} - P_{vap}}{0,5 \rho V_R^2} \quad (22)$$

Onde P_{atm} é a pressão atmosférica, P_{vap} é a pressão de vapor d'água e h é a altura da coluna d'água até o centro do eixo do propulsor.

E finalmente utiliza-se as Equações (19) e (22) para comparar o valor do número de cavitação e o número de Burrill, verificando se há cavitação.

O diagrama de Burrill possibilita estimar a quantidade de cavitação nas pás do propulsor, tendo como função apenas verificar se há cavitação excessiva, o que pode gerar queda de empuxo e torque.

O diagrama não indica o tipo de cavitação presente, e deve-se adotar uma porcentagem máxima aceitável de cavitação no dorso das pás, evitando problemas de queda de empuxo, erosão e vibrações geradas pelo fenômeno da cavitação. (PADOVEZI, 1997).

2.4 MOTOR

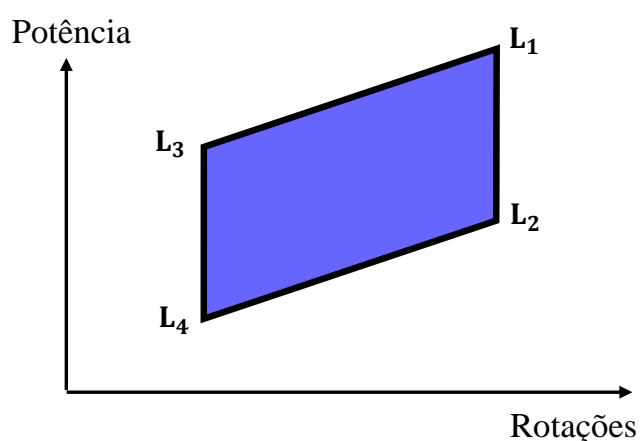
O motor principal tem a função de fornecer a potência requerida pelo navio para manter a velocidade de serviço.

Em grande parte das embarcações mercantes, utiliza-se motores Diesel de baixa rotação, devido a boa eficiência térmica do motor e dos baixos consumos de combustível. (BRINATI, 2010).

Brinati também descreve que para a seleção do motor, no caso a Diesel, são fornecidos pelos fabricantes um diagrama chamado *diagrama de operação*, que delimita a região do espaço Potência\Rotação, em que o motor pode operar, cabendo ao projetista a função de selecionar o motor mais adequado ao projeto.

Um exemplo de *diagrama de operação* é mostrado na Figura 5. O autor ainda afirma que o motor compatível é aquele cujo o *diagrama de operação* contenha o ponto de interesse do motor, ou seja, que a rotação e a potência estejam de acordo com o solicitado pelo projeto.

Figura 5 – exemplo de um *diagrama de operação*.



Fonte: Adaptado de Man (2011).

Uma vez determinado os valores de resistência ao avanço e os parâmetros do propulsor, determina-se o motor que cumpra os requisitos de projeto.

É comum adotar uma reserva de potência entre 10 a 25%, definida pelo armador. Essa reserva deve-se ao fato de existir uma diferença entre a potência requerida, calculada em condições ideais e aquela requerida nas condições reais de serviço, as quais são causadas pela degradação do casco, incrustações, condições adversas de mar e vento. (TRINDADE, 2012).

Definidas as eficiências, do hélice, do casco, de propulsão e a rotativa relativa, calcula-se a potência necessária ao sistema para suprir a embarcação em determinada velocidade designada. Primeiramente calcula-se a potência efetiva da embarcação, também chamada de *effective horse power* (EHP).

A potência efetiva em águas abertas, é a potência necessária para mover um navio a determinada velocidade, sem a ação do hélice, a qual é calculada através da Equação (23):

$$EHP = P_E = R_T V \quad (23)$$

Onde R_T é a resistência total ao avanço, e V a velocidade da embarcação.

A próxima potência a ser calculada é a de empuxo ou *thrust horse power* (THP), que é definida como a potência produzida pelo propulsor, calculada pela Equação (24):

$$THP = P_T = TV_a \quad (24)$$

Ou:

$$P_T = \frac{P_E}{\eta_H} = \frac{R_T V}{\eta_H} \quad (25)$$

Onde η_H é calculado através da Equação (11), P_T é a potência de empuxo, T é o empuxo e V_a é a velocidade de avanço.

Posteriormente calcula-se a potência entregue ou *delivered horse power* (DHP), a qual é definida como a potência entregue pelo propulsor em águas abertas, calculada pela Equação (26):

$$DHP = \frac{THP}{\eta_0 \eta_R} = \frac{R_T V}{\eta_0 \eta_R \eta_H} \quad (26)$$

Ou escrita em função da eficiência propulsiva, η_P , obtido pela Equação (13), temos:

$$DHP = \frac{THP}{\eta_P} \quad (27)$$

Onde η_0 é a eficiência do hélice, Equação (10) e η_R é eficiência relativa rotativa, Equações (14) e (15).

Devido a perdas de transmissão em caixas redutoras do motor para o hélice, por meio de engrenagens, define-se também a potência do eixo ou *shaft horse power* (SHP), sendo a potência após a redução por engrenagens, calculada pela Equação (28):

$$SHP = \frac{DHP}{\eta_T} \quad (28)$$

Onde η_T é a eficiência de transmissão, que assume valores normalmente na faixa de 0,97 ~ 0,99 para navios com motores na popa, e 0,95 para navios com motor na meia-nau. (ROH, 2018).

E por fim, calcula-se a máxima potência de máquina, ou *brake horse power* (BHP), que segundo (ROH, 2018) é igual a potência de eixo, Equação (29):

$$BHP = SHP = \frac{DHP}{\eta_T} \quad (29)$$

Além das potências acima descritas, existe algumas correções para o *BHP* com relação as condições de operação do navio, essas correções ou margens de potência são definidas pelas Equações (30) e (31).

$$NCR = BHP \left(1 + \frac{\text{Margens de mar}}{100} \right) \quad (30)$$

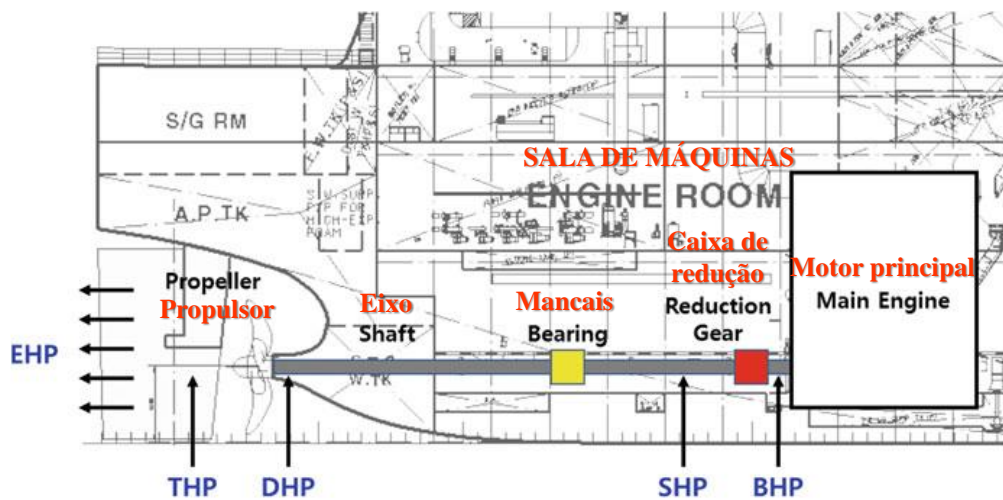
Onde *NCR* é a taxa contínua normal de operação ou *normal continuous rating*, definida como uma correção da potência de motorização, trabalhando em faixas normais de operação, de forma contínua. E por fim calcula-se o *MCR*, *maximum continuous rating*, que segundo Roh (2018), é a máxima potência produzida pelo motor principal de forma contínua, sem causar falha no mecanismo de propulsão.

$$MCR = \frac{NCR}{\text{Margens de motor}} \quad (31)$$

As margens de motor ou margens operacionais possuem valores em torno de 0,85~0,95.

A Figura 6 mostra resumidamente como são dispostas as potências propulsivas em uma embarcação, desde o propulsor até o motor principal.

Figura 6 – Apresentação simplificada das potências em um navio.



Fonte: Adaptado de Roh (2018).

Assim, são definidas as parcelas de potência que compõem o sistema propulsivo de uma embarcação, e principalmente a potência necessária de motorização, ou potência de motor.

2.5 INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE-MOTOR

Nesta seção será descrito o processo de integração casco-hélice-motor e que constitui o procedimento central da ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho.

O parâmetro K_T expresso pela Equação (8), determina a força (empuxo) adimensional fornecido pelo propulsor para diferentes combinações de velocidade e rotação, definidas pelo coeficiente de avanço J . Para definir o ponto de operação J de um propulsor, deve-se verificar qual a força (empuxo), Equação (9), requerida pelo embarcação para que essa navegue na velocidade desejada.

Esse processo é realizado por meio da adimensionalização da resistência ao avanço da embarcação calculada para uma dada velocidade, como uma função do coeficiente de avanço J .

$$R_T = T(1 - t) \quad (32)$$

$$V_a = V(1 - \omega) \quad (33)$$

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (34)$$

$$J = \frac{V_a}{nD} \quad (35)$$

$$\frac{K_T}{J^2} = \frac{\frac{T}{\rho n^2 D^4}}{\frac{V_a^2}{n^2 D^2}} = \frac{T}{\rho V_a^2 D^2} \quad (36)$$

A adimensionalização usualmente proposta segundo Brinati (2010), para a resistência ao avanço é mostrada na Equação (37):

$$K_{T \text{ casco}} = \frac{R_T (1 + M_R) J^2}{(1 - t) \rho V^2 (1 - \omega)^2 D^2} \quad (37)$$

Onde:

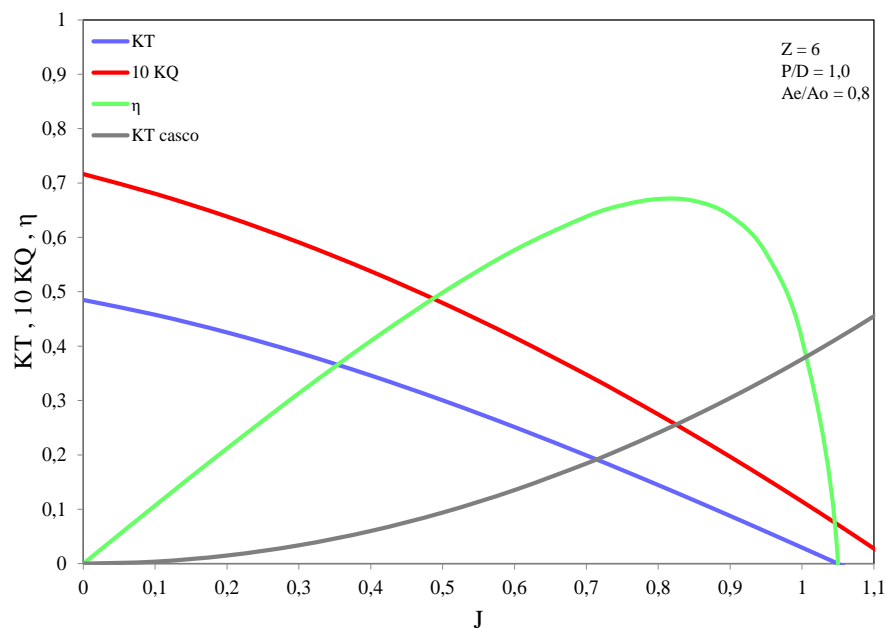
- a) R_T é a resistência ao avanço ao navegar na velocidade V ;
- b) V é a velocidade do navio;
- c) D é o diâmetro do hélice;
- d) t é o coeficiente de redução de empuxo;
- e) ρ é a densidade da água;
- f) J é o coeficiente de avanço;

- g) MR é a margem de resistência, ou margem de mar, normalmente considera-se valores entre 0,15 e 0,25.

Conforme demonstrado por Brinati (2010), o projetista deve realizar o processo de seleção do propulsor considerando a velocidade de projeto da embarcação. Assim, uma vez definida a velocidade, ficam estabelecidos todos os parâmetros da Equação (37), a exceção apenas do coeficiente de avanço J .

Logo, é possível traçar uma curva quadrática que representa a resistência ao avanço do embarcação adimensionalizada, quando essa navega na velocidade V , e uma curva polinomial que representa o empuxo adimensionalizado fornecido por um propulsor; sendo ambas as curvas expressas em função do coeficiente de avanço J . Um exemplo da construção gráfica de ambas as curvas é mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Integração Casco - hélice.



Fonte: Autor.

Observa-se que apenas no caso da Série B é possível expressar a curva de desempenho do propulsor por meio de um polinômio interpolador Equação (18). Na eventual consideração de outras séries, deve-se buscar modelos matemáticos que representem as curvas de desempenho obtidas experimentalmente.

Assim, o ponto de operação J para um dado conjunto específico de casco e propulsor, e para uma velocidade específica e um diâmetro do propulsor definido, pode ser determinado igualando-se as Equações (18) e (37). Nesse ponto, o empuxo fornecido pelo propulsor, corresponde ao exato valor do empuxo requerido pelo casco ao navegar na velocidade estabelecida.

O mesmo processo pode ser realizado graficamente. A curva representada pela cor cinza na Figura 7 corresponde a curva $K_{T\text{ casco}}$, o ponto no qual essa curva cruza a curva $K_{T\text{ hélice}}$, define o ponto de operação do navio.

Uma vez definido o J de operação para uma dada combinação de casco e propulsor, navegando a uma certa velocidade, pode-se determinar a eficiência do propulsor graficamente (curva de cor verde na Figura 7) ou por meio da Equação (10)

Assim, o processo de seleção de um propulsor, consiste em, definido o casco e a velocidade de projeto, variar os parâmetros que definem o propulsor, realizando, para cada propulsor analisado, a determinação do ponto de operação e a correspondente eficiência associada. Esse processo prossegue buscando-se maximizar a eficiência obtida para o sistema.

Definido as características do propulsor e o J utiliza-se a Equação (3) para obter o valor da rotação do propulsor, n e dando continuidade a etapa seguinte da integração casco-hélice-motor é realizar o cálculo das eficiências propulsivas, Equação (13) e da potência de máquina Equação (29), para determinar qual é a potência necessária ao sistema, em determinadas condições de velocidade, e de rotação do propulsor, que atenda fornecer ao sistema.

Por fim, seleciona-se o motor principal, cujo o BHP e a rotação n , estejam de acordo com o solicitado ao sistema propulsivo desejado. Caso a rotação do eixo do motor seja maior, é comum a utilização de caixas redutoras para adequar a rotação do eixo à rotação solicitada ao hélice.

2.6 TRABALHOS SEMELHANTES

Esta seção tem como objetivo apresentar um breve histórico sobre os principais trabalhos que abordam o assunto tratado no presente trabalho.

Padovezi (1997) em sua dissertação, realiza um estudo sobre a aplicação de resultados em escala real no projeto de hélices de embarcações fluviais, onde analisa e identifica alguns procedimentos para a seleção de hélices, utilizando a Série B de Wageningen como o propulsor

da embarcação. O autor procura identificar os principais problemas para o projeto, considerando as características operacionais do hélice e verificando os métodos mais adequados de estimativa de resistência ao avanço para embarcações de comboios fluviais.

Passos (2013) desenvolveu uma ferramenta computacional em Delphi, para simplificar a escolha de um hélice da Série B, utilizando as funções polinomiais de K_T , K_Q e η_o , onde o autor modifica os parâmetros de entrada para a seleção do hélice, criando doze alternativas de entradas e respostas, de acordo com os dados que o usuário possui para escolha do propulsor.

Tonacio (2014) realizou um estudo paramétrico entre os parâmetros do propulsor quanto a sua eficiência e a excitação de vibração, analisando assim o comportamento dos hélices quanto à sua geometria, influenciam na excitação de vibração.

Mendes (2015) descreve o desenvolvimento de uma ferramenta para o auxílio na seleção de um hélice da Série de Wageningen, utilizando uma planilha de Excel, a qual o usuário irá fornecer a ferramenta os dados operacionais e a ferramenta determinará o hélice com maior eficiência que atende aos critérios de cavitação.

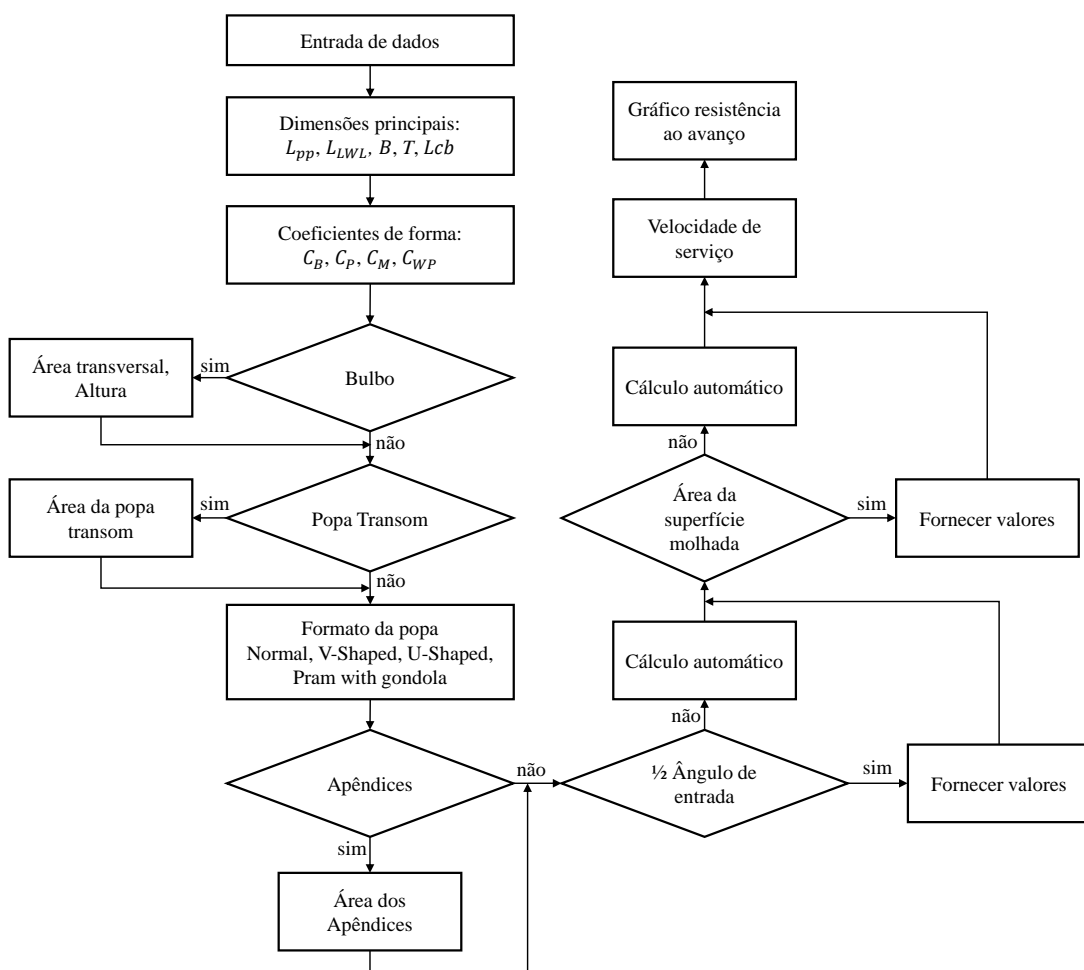
Lascalea (2016) desenvolveu um algoritmo em Matlab que integradamente ao software Rhinoceros 3D gera a geometria do hélice da Série sistemática de Wageningen automaticamente, a partir dos parâmetros do hélice.

O presente trabalho se diferencia dos demais por realizar também o processo de integração casco-hélice-motor, além de permitir que o processo de seleção do propulsor fique restrito apenas aos propulsores de fato ensaiados na construção da Série B, sem extrapolar o polinômio de Oosterveld e Oossanen (1975) para regiões não ensaiadas.

3 DESENVOLVIMENTO

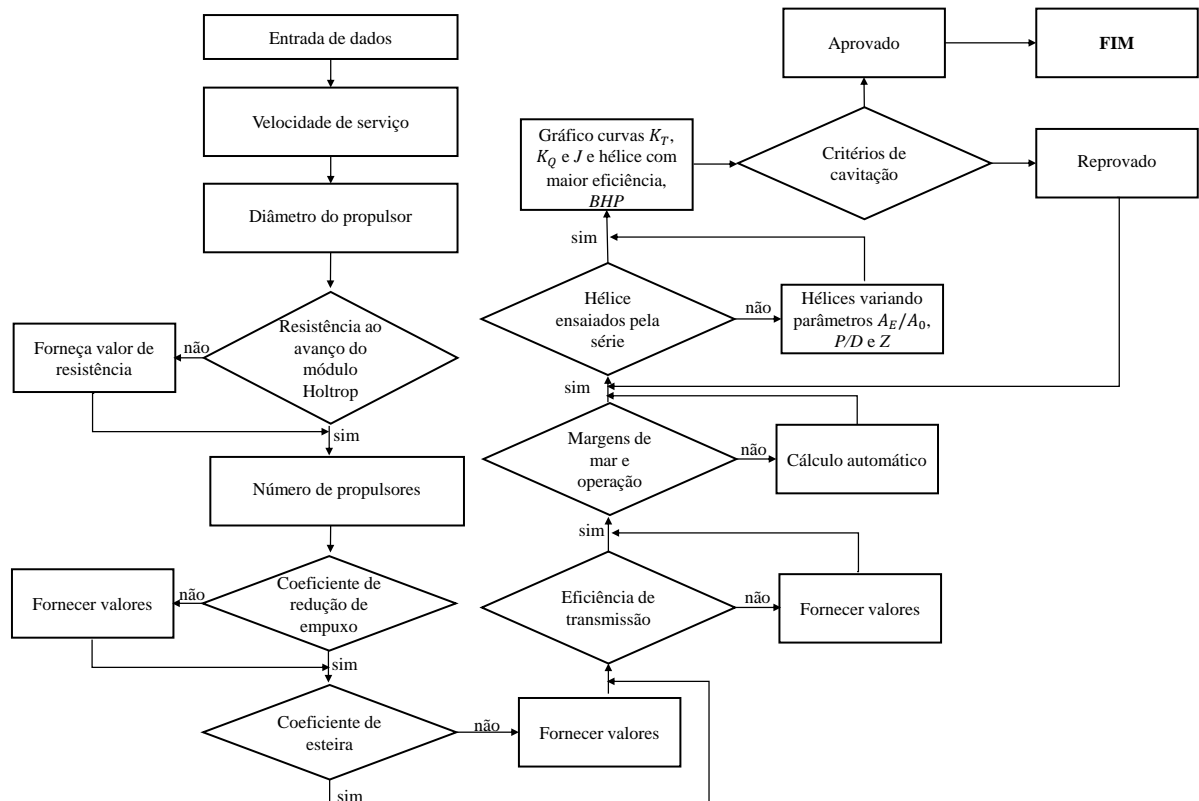
Este capítulo descreve o desenvolvimento do código computacional destinado ao projeto do sistema de propulsão de uma embarcação conforme estabelecido nos objetivos do trabalho e com base na fundamentação teórica apresentada no capítulo anterior. As Figura 8, 9 e 10 apresentam um fluxograma básico sobre o funcionamento dos módulos a serem desenvolvidos na ferramenta computacional.

Figura 8 – Fluxograma do funcionamento do módulo de resistência ao avanço.



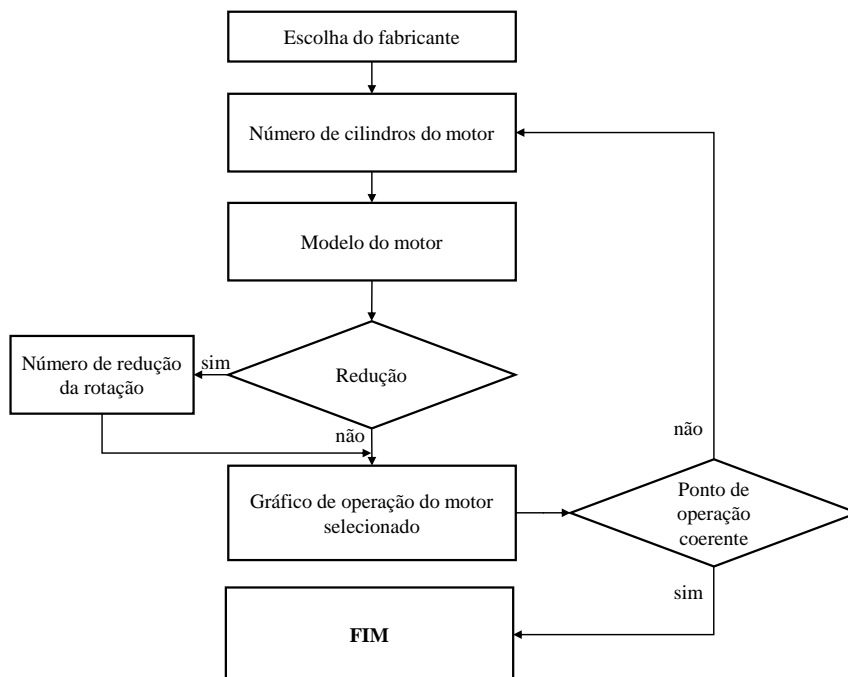
Fonte: Autor.

Figura 9 – Fluxograma do funcionamento do módulo de seleção do hélice.



Fonte: Autor.

Figura 10 – Fluxograma do funcionamento do módulo de seleção do motor.



Fonte: Autor.

Desta maneira, definido os parâmetros de entrada a serem fornecidos à ferramenta, obtém-se a resposta desejada, de estimativa a resistência ao avanço, seleção de hélice ou seleção do motor principal. A seguir a construção da ferramenta é descrita com maiores detalhes.

3.1 LINGUAGEM E FERRAMENTAS

O desenvolvimento do projeto foi realizado utilizando-se o programa Delphi. A escolha pelo ambiente Delphi, em detrimento a infinitas outras opções, deve-se unicamente a flexibilidade e eficiência de tal ferramenta no desenvolvimento de sistemas computacionais, além da familiaridade e compatibilidade com sistemas desenvolvidos ou em desenvolvimento por outros membros do grupo de pesquisa no qual esse trabalho está inserido.

Segundo Cantu (2008), o compilador Delphi surgiu em 1995 e foi criado pela empresa Borland, sendo uma ferramenta de desenvolvimento visual a qual utiliza a linguagem orientada a objetos chamada de Object Pascal.

A linguagem Pascal fornece uma grande variedade de estruturas de dados. É função do programador determinar a estrutura mais adequada para cada situação para desenvolver o algoritmo. (WIRTH, 1991).

A programação orientada a objetos é baseada na interação entre diferentes unidades de dados e procedimentos, conhecidas como objetos.

3.2 MÓDULO PARA A RESISTÊNCIA AO AVANÇO

O primeiro módulo ou objeto, desenvolvido na ferramenta computacional foi aquele destinado ao cálculo de resistência ao avanço da embarcação. O desenvolvimento seguiu o método proposto por Holtrop e Mennen (1984), o qual foi descrito na fundamentação teórica.

Através da interface de programação, implementou-se as equações descritas pelo método, onde para realizar a estimativa da resistência ao avanço é necessário fornecer 15 parâmetros de entrada.

Os parâmetros fornecidos correspondem aos dados da embarcação a qual deseja-se realizar a estimativa da resistência ao avanço, estes dados em geral são os parâmetros dimensionais, geométricos, coeficientes de formas e apêndices do navio. Na Figura 11 são mostrados os dados de entrada que devem ser fornecidos pelo usuário da ferramenta.

Figura 11 – Parâmetros de entrada para estimativa de resistência pelo método de Holtrop.

The interface is divided into two main columns: **Dados da Embarcação** (Ship Data) and **Parâmetros** (Parameters).

Dados da Embarcação includes:

- Dimensões Principais** (Main Dimensions): Lpp [m], Lwl [m], B [m], T [m], LCB [m] aft to forward.
- Coefficientes de Forma** (Form Coefficients): Cb, Cp, Cm, Cwp.
- Bulbo** (Bulb): Área trans. Bulbo [m²], Altura do Bulbo [m].
- Popa Transom** (Transom): Área Sub. Popa [m²].
- Forma da popa** (Stern Shape):
 - V-Shaped Sections: Cstern = -10
 - Normal Section Shape: Cstern = 0
 - U-Shaped Sections: Cstern = 10
 - Pram with gondola: Cstern = -25

Parâmetros includes:

- Apêndices** (Appendages): Rudder Behind Skeg [m²], Rudder Behind Stern [m²], Twin Screw Bal.Rudders [m²], Shaft Brackets [m²], Skeg [m²], Strut Bossings [m²], Hull Bossings [m²], Shaft [m²], Stabilizer Fins [m²], Dome [m²], Bilge Keels [m²]. Each has a text input field and a dropdown menu.
- Ângulo de Entrada** (Entry Angle):
 - Cálculo Automático
 - Ângulo Fornecido [m²]
- Área Malhada** (Rough Area):
 - Cálculo Automático
 - Área Fornecida [m²]

Fonte: Autor.

Posteriormente o usuário deve fornecer a velocidade de serviço em que deseja obter a resposta de estimativa de resistência ao avanço.

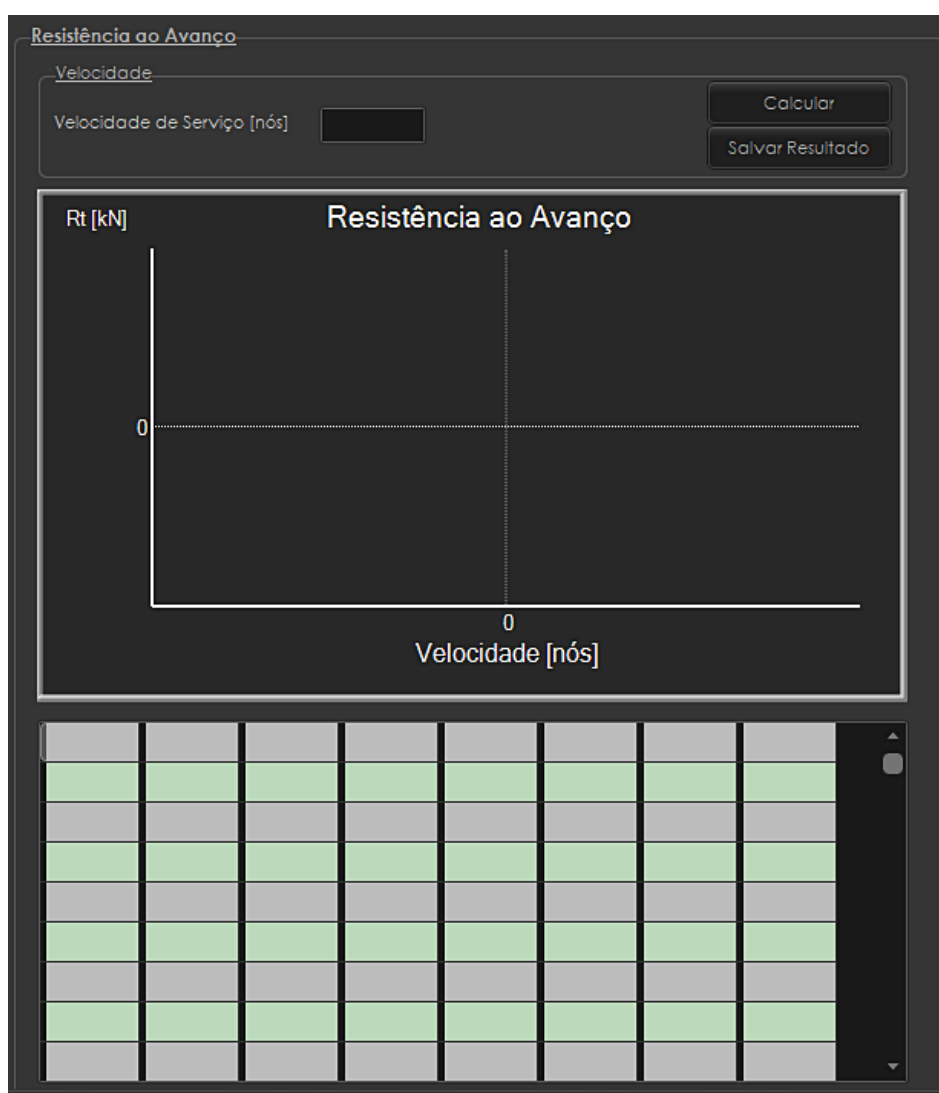
Após a leitura de dados, inicia-se o processo de cálculos, que como primeira etapa irá realizar a verificação da coerência dos coeficientes de forma. Caso C_B , C_M e C_P , não sejam condizentes, o programa irá alertar na tela principal, que os valores não estão corretos, lembrando que a partir de dois dos três coeficientes é possível obter o terceiro.

Outra verificação implementada à ferramenta foram as das limitações do método de Holtrop e Mennen (1984), mostradas na Tabela 1. Caso os dados da embarcação não estiverem dentro dos limites, será mostrado uma mensagem avisando o usuário que a embarcação não está

dentro dos limites. Caso seja atendido, os cálculos de resistência ao avanço são realizados resultando no gráfico que mostra a variação da resistência ao avanço total em função da velocidade da embarcação Figura 12.

Observa-se que os valores das parcelas que compõem a resistência ao avanço são mostrados ao usuário em uma tabela, sendo que o valor de velocidade de serviço definido pelo usuário aparece destacado como um ponto vermelho sobre a curva, ver Figura 13.

Figura 12 – Interface de resposta da ferramenta.



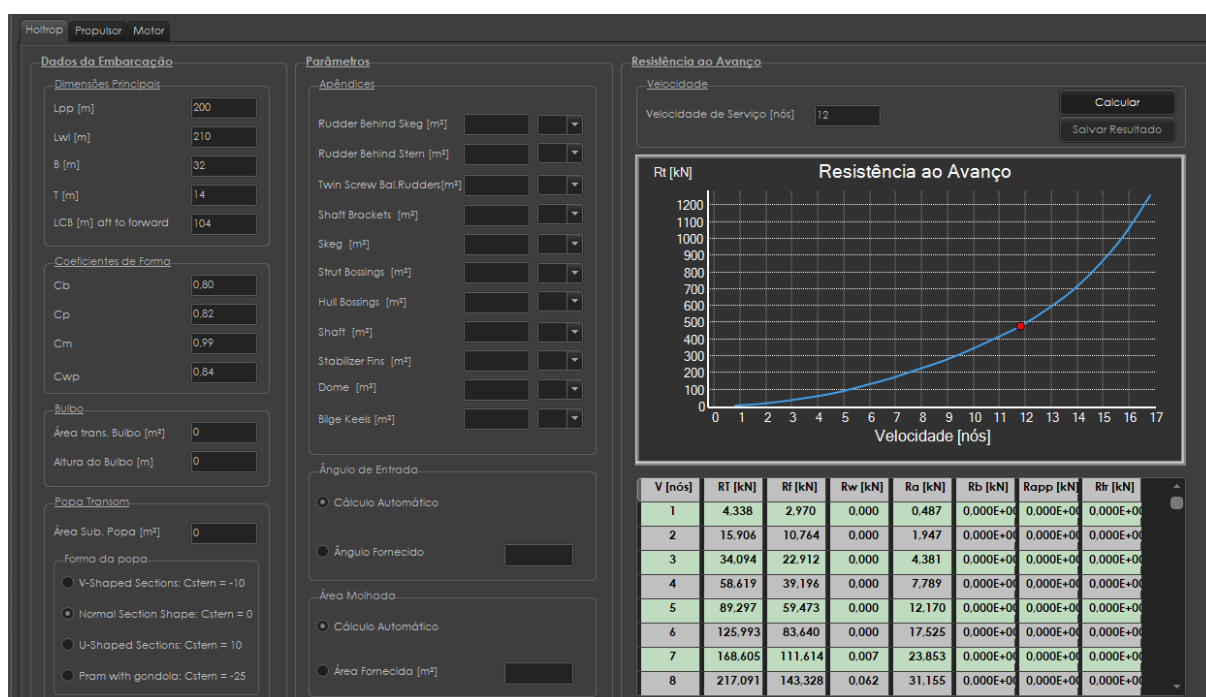
Fonte: Autor.

Para ampliar a possibilidade de uso da ferramenta desenvolvida, implementou-se uma rotina capaz de exportar os resultados em uma planilha do Excel, contendo as principais

parcelas da resistência ao avanço e também alguns dos coeficientes calculados através do método de Holtrop e Mennen (1984), tais como o meio ângulo de entrada, área da superfície molhada, volume deslocado, coeficientes de forma e dimensões da embarcação.

Na Figura 13 é mostrado o módulo completo de resistência ao avanço, com dados de uma embarcação genérica.

Figura 13 – Módulo de resistência ao avanço.



Fonte: Autor.

3.2.1 Verificação da ferramenta de resistência ao avanço

Após a construção da ferramenta, verificou-se a correta aplicação do método de Holtrop e Mennen (1984) e das suas respectivas respostas. Essa verificação foi realizada utilizando-se o programa Maxsurf, o qual possui um módulo para cálculo da resistência ao avanço também baseado no método de Holtrop.

Realizou-se a análise de resistência ao avanço para quatro modelos de embarcações presentes no próprio programa Maxsurf, conhecidos como *sample designs* ou *exemplos de projeto*. Os modelos representam, segundo o próprio programa, um navio Graneleiro (*Bulk Carrier*), um navio Contêineiro, um navio VLCC (*Very Large Crude Carriers*) e um navio Cargueiro.

O navio cargueiro e o VLCC, referente às embarcações de exemplo do programa Maxsurf, não possuem bulbo e assim, por serem embarcações bem representadas pelo método de Holtrop, permitiram a verificação do equacionamento destinado ao cálculo da resistência ao avanço considerando o casco nu.

Já as embarcações do tipo Graneleiro e Contêineiro foram selecionadas por também serem bem representadas pelo método de Holtrop e também pelo fato dos modelos utilizados possuírem bulbo, gerando assim a possibilidade de verificação da ferramenta para embarcações que possuem bulbo.

Na Tabela 4 são listados os dados das embarcações utilizadas para comparação e verificação entre a ferramenta construída e o programa Maxsurf.

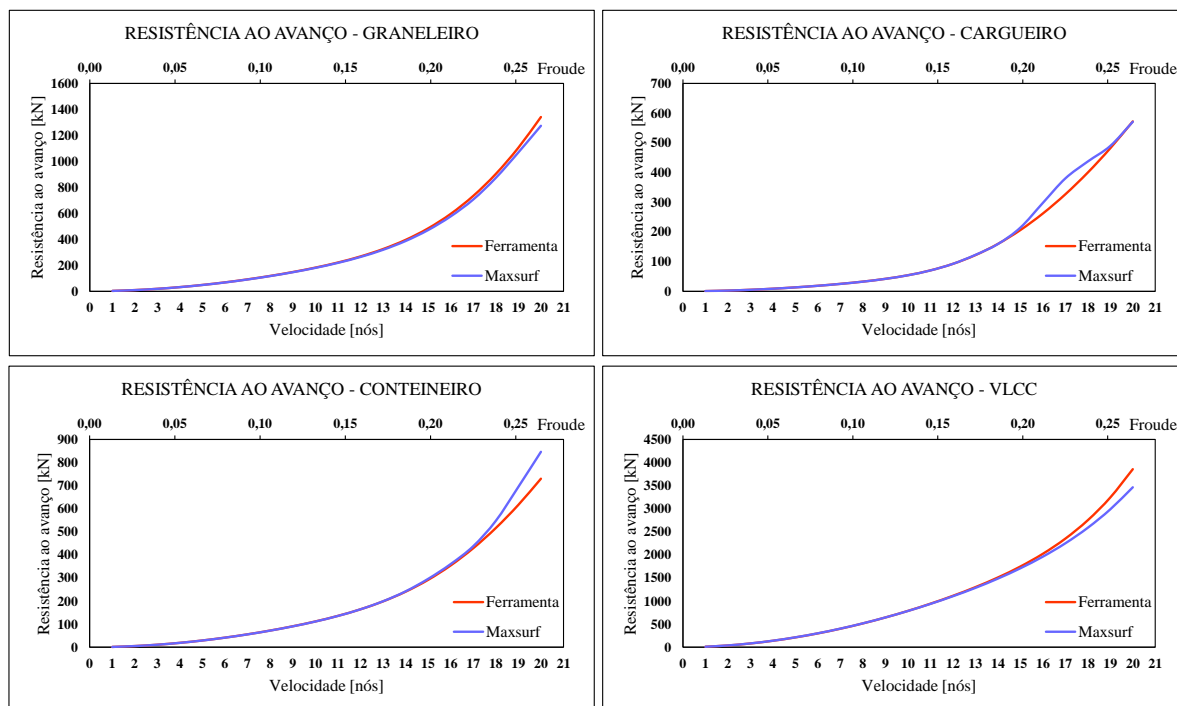
Tabela 4 – Dados das embarcações.

Navio	L_{WL} [m]	B [m]	T [m]	C_B	C_P	C_M
Graneleiro	154,11	23,11	10,00	0,75	0,77	0,98
Contêineiro	111,18	19,50	7,23	0,69	0,69	0,99
VLCC	330,36	54,25	20,42	0,82	0,82	0,99
Cargueiro	76,55	13,49	4,57	0,69	0,71	0,97

Fonte: Autor.

Os gráficos da Figura 14 sobrepõem as curvas de resistência total ao avanço geradas através da ferramenta desenvolvida e do programa Maxsurf, visando a verificação da coerência do método de Holtrop implementado.

Figura 14 – Comparação da resistência das embarcações de referência.



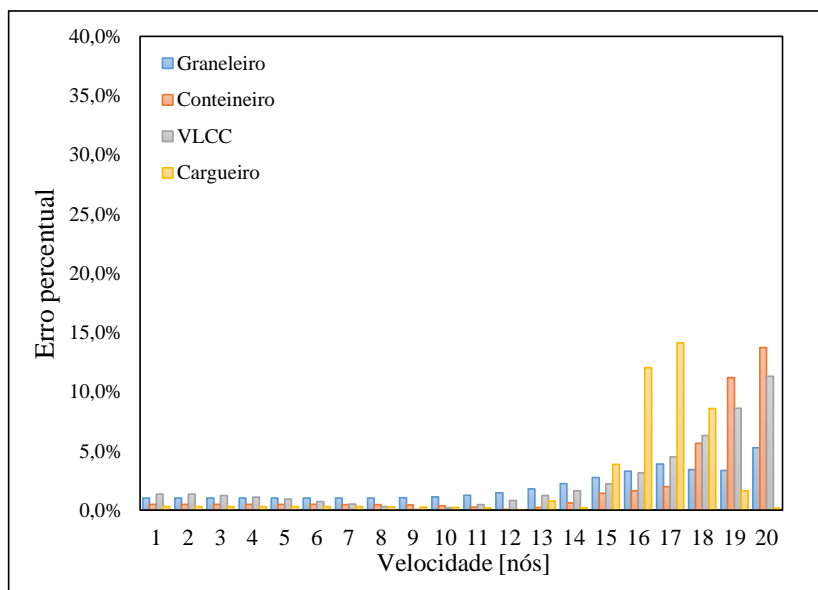
Fonte: Autor.

A partir dos gráficos de comparação, pode-se perceber que há coerência entre a ferramenta desenvolvida e o programa Maxsurf apesar de existirem pequenas discordâncias para cada embarcação testada. Consultando o manual do programa, descobre-se que o método implementado foi baseado no (HOLTROP; MENNEN, 1984) com correções propostas em outros artigos, os quais não se obteve acesso, e que podem justificar tais diferenças.

Outra explicação para a divergência entre resultados pode ser resultado do método utilizado pelo programa para calcular o meio ângulo de entrada, a superfície molhada, entre diversos outros parâmetros e coeficientes utilizados pelo método.

O Gráfico 1 apresenta o erro percentual dos valores obtidos de resistência ao avanço, considerando os valores de referência como sendo aqueles calculados no Maxsurf, sendo possível observar que há bastante semelhança entre os resultados obtidos no módulo desenvolvido e no programa Maxsurf, permitindo que esse seja utilizado nas fases seguintes do projeto.

Gráfico 1 – Erro percentual da resistência ao avanço.



Fonte: Autor.

Os valores de resistência ao avanço possuem um erro percentual de até 5% para velocidades de até 15 nós, indicando que esta diferença pode ter ocorrido devido às correções da parcela potencial (ondas) da resistência ao avanço.

3.3 MÓDULO PARA A SELEÇÃO DO PROPULSOR

A ferramenta computacional para a seleção de um hélice de máxima eficiência, utilizando a Série B de Wageningen também foi desenvolvida no Delphi, conforme fundamentação teórica apresentada anteriormente.

Para o módulo de seleção do propulsor, implementou-se os polinômios interpoladores propostos por (OOSTERVELD; OOSSANEN, 1975), os quais permitem a geração das curvas K_T e K_Q em função do coeficiente de avanço J .

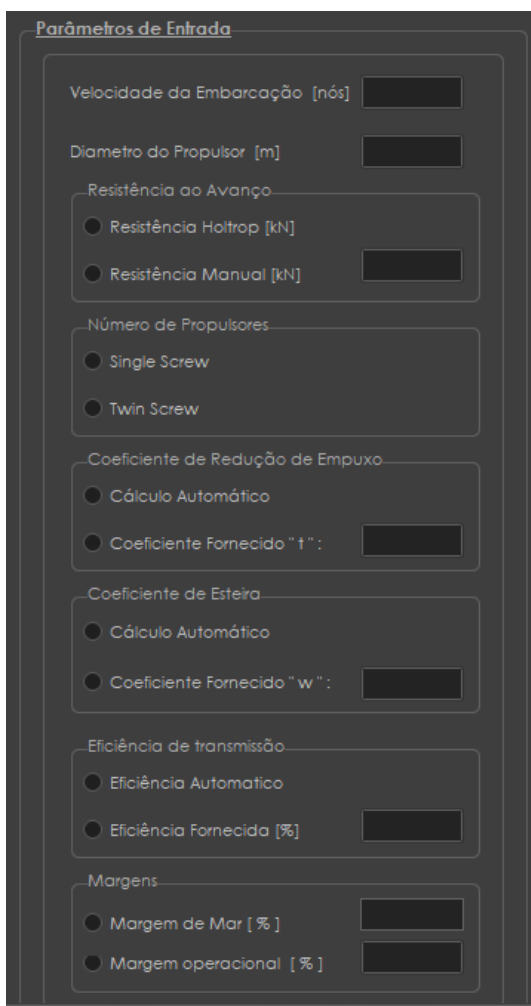
Para o problema em questão, determinação do J , que forneça o hélice de maior eficiência, implementou-se à ferramenta um algoritmo de análise numérica, que determine as raízes de uma função, o método implementado foi o da *Falsa posição*, para este caso, a raiz do problema é o ponto em que o valor de $K_{T,Casco}$, seja de igual ao $K_{T,hélice}$, neste ponto determina-se o valor de J e da eficiência do propulsor, η_o , de forma mais veloz (*otimizada*), no sistema.

As eficiências encontradas são comparadas dentre todos os valores obtidos no ponto descrito, e o maior valor encontrado, resultara no hélice selecionado.

Uma vez definido o diâmetro do propulsor, a velocidade da embarcação e o número de hélices, o programa realiza o processo de integração casco-hélice descrito na fundamentação teórica, buscando a combinação de parâmetros de um hélice da Série B que maximiza a eficiência do propulsor.

É interessante observar que o módulo desenvolvido oferece alternativas para o usuário quanto aos valores do coeficiente de esteira, coeficiente de redução de empuxo, resistência ao avanço, eficiência de transmissão e margens de serviço Figura 15. Para cada opção é possível ao usuário inserir os valores manualmente, ou utilizar os modelos empíricos clássicos, os quais foram descritos na fundamentação teórica deste trabalho.

Figura 15 – Parâmetros de entrada do módulo de seleção do hélice.



Parâmetros de Entrada

Velocidade da Embarcação [nós]

Diametro do Propulsor [m]

Resistência ao Avanço

Resistência Holtrop [kN]

Resistência Manual [kN]

Número de Propulsores

Single Screw

Twin Screw

Coeficiente de Redução de Empuxo

Cálculo Automático

Coeficiente Fornecido "t":

Coeficiente de Esteira

Cálculo Automático

Coeficiente Fornecido "w":

Eficiência de transmissão

Eficiência Automático

Eficiência Fornecida [%]

Margens

Margem de Mar [%]

Margem operacional [%]

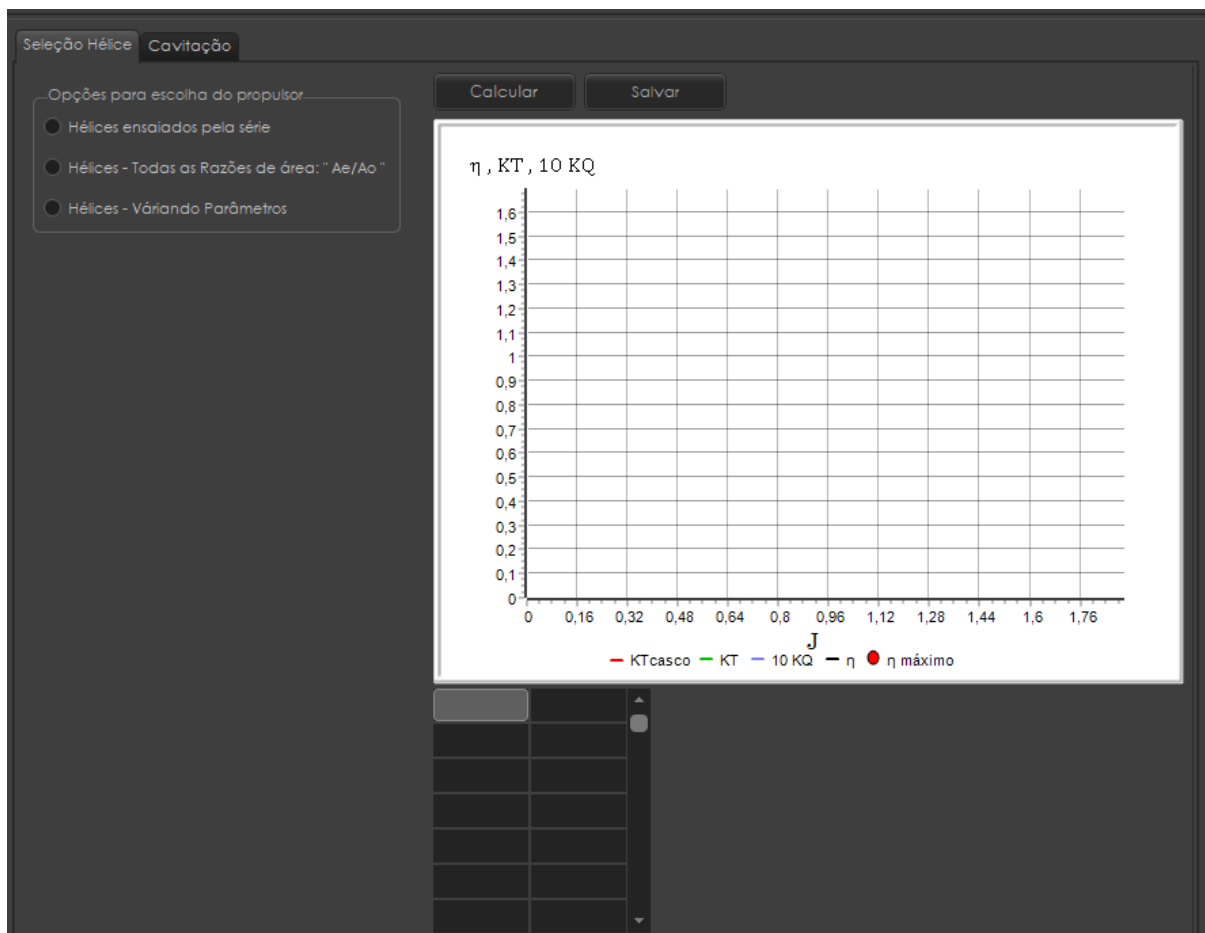
Fonte: Autor.

Outra funcionalidade implementada, foram as opções de escolha do propulsor, as quais podem ser vistas na Figura 16. O processo de seleção pode ser realizado considerando:

- a) Apenas os hélices ensaiados pela Série B, mostrados na Tabela 3;
- b) Apenas os hélices cuja características são resultados da interpolação das características dos propulsores efetivamente ensaiados, ou seja, hélices que possuam todas as faixas de razão de áreas, dentro da faixa mostrada na Tabela 3;
- c) Considerando uma faixa de valores específica para o número de pás, a razão de áreas e a relação passo-diâmetro.

Conforme discutido na fundamentação teórica, para a seleção do hélice de maior eficiência, é necessário obter-se a curva K_T do casco, a qual é calculada em função da resistência ao avanço. Assim, integrou-se na ferramenta a opção para o usuário inserir o valor de resistência para o qual deseja-se selecionar o propulsor, ou a opção de utilizar o resultado de resistência ao avanço calculado no módulo cujo desenvolvimento foi descrito anteriormente e que utiliza o método de (HOLTROP; MENNEN, 1984).

Figura 16 – Opções de escolha do hélice.



Fonte: Autor.

Por fim, implementou-se também a opção de exportar as curvas do hélice de melhor eficiência para uma planilha Excel, além de apresentar os parâmetros de operação do propulsor ótimo, tais como o coeficiente de avanço J , a potência exigida de motorização BHP e a rotação no ponto de operação Figura 17.

Caso seja considerada as margens de operação e de mar, o valor de NCR e MCR são inclusos na potência de BHP , manteve-se a nomenclatura somente para simplificação.

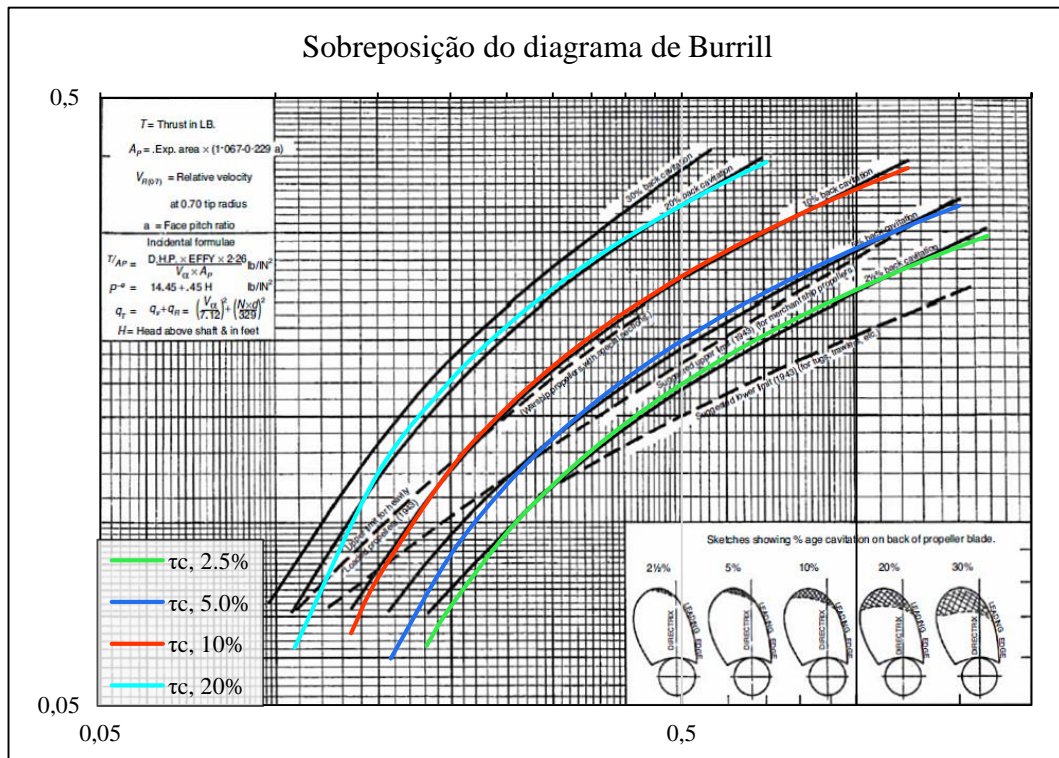
Figura 17 – Exemplo de resultados da seleção do hélice.

D [m]	6,50
Z	3
Ae/Ao	0,30
P/D	1,40
η_o	0,7525
n [rpm]	56,21
BHP [kW]	2632,638

Fonte: Autor.

Posterior a seleção do hélice, deve-se conferir, se o mesmo é aprovado nos critérios de cavitação. Para isso construiu-se uma nova aba dentro do módulo de seleção do hélice, onde implementou-se as curvas do diagrama de Burrill, representadas por modelos de regressão, construídos com o auxílio do programa Excel. No Gráfico 2 as curvas de regressão geradas são posicionadas sobre o gráfico original, e nas regiões onde ocorrem leves diferenças, as regressões se mostram levemente mais conservadoras que o gráfico originalmente proposto por Burrill.

Gráfico 2 – Regressão das curvas do diagrama de Burrill.



Fonte: Autor.

As equações utilizadas para reproduzir os limites de cavitação obtidas são apresentadas a seguir.

$$\tau_{C,2,5\%} = 0,1050897966 \ln(x) + 0,2416663051 \quad (38)$$

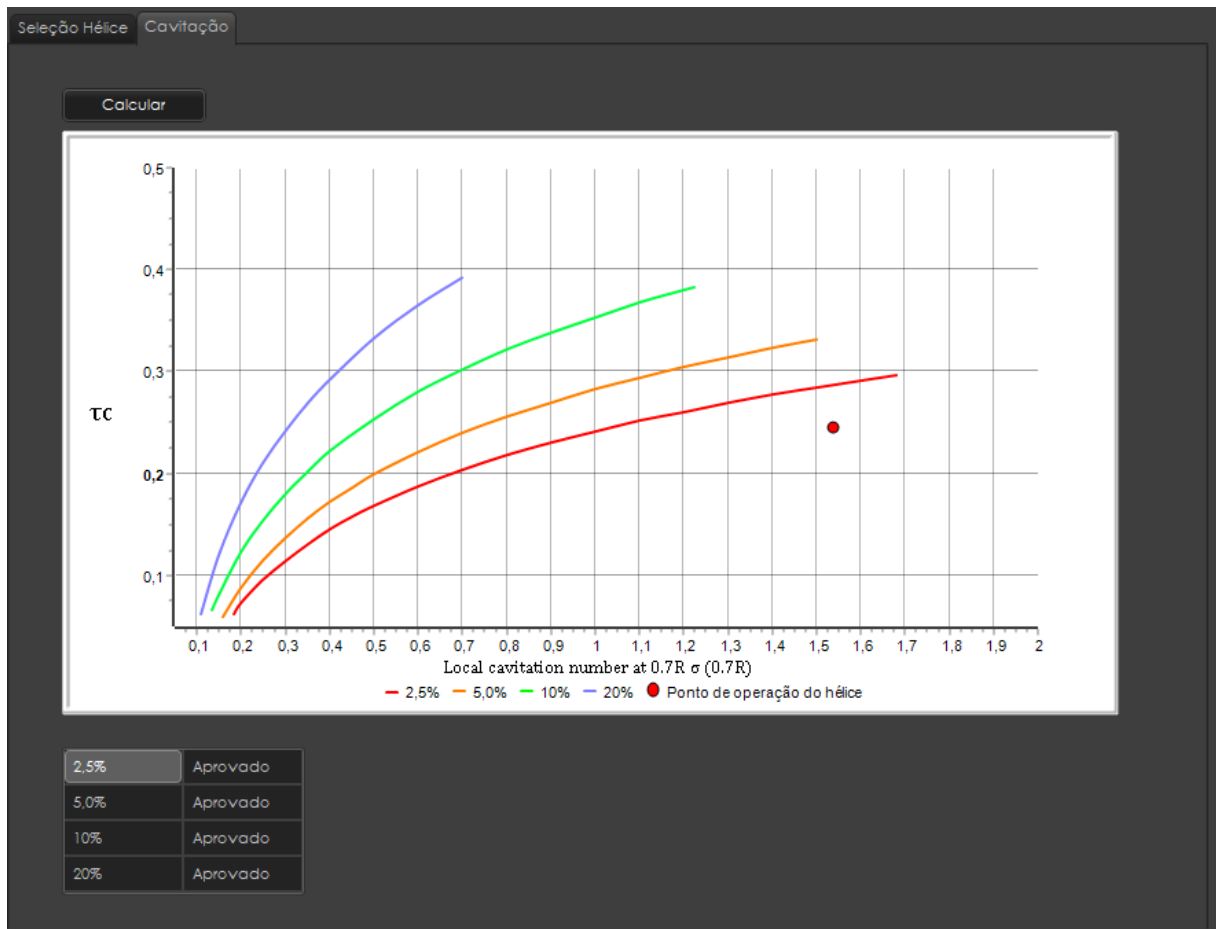
$$\tau_{C,5,0\%} = 0,1210244587 \ln(x) + 0,2829528637 \quad (39)$$

$$\tau_{C,10\%} = 0,1438521255 \ln(x) + 0,3537224344 \quad (40)$$

$$\tau_{C,20\%} = 0,1764219592 \ln(x) + 0,4547960793 \quad (41)$$

Na Figura 18 é mostrado um exemplo de aplicação do critério de cavitação, posicionando o ponto de operação do propulsor no diagrama de Burrill, além de exibir um parecer conclusivo se o hélice em questão é aprovado ou reprovado para os diferentes limites de ocorrência de cavitação no dorso das pás do propulsor.

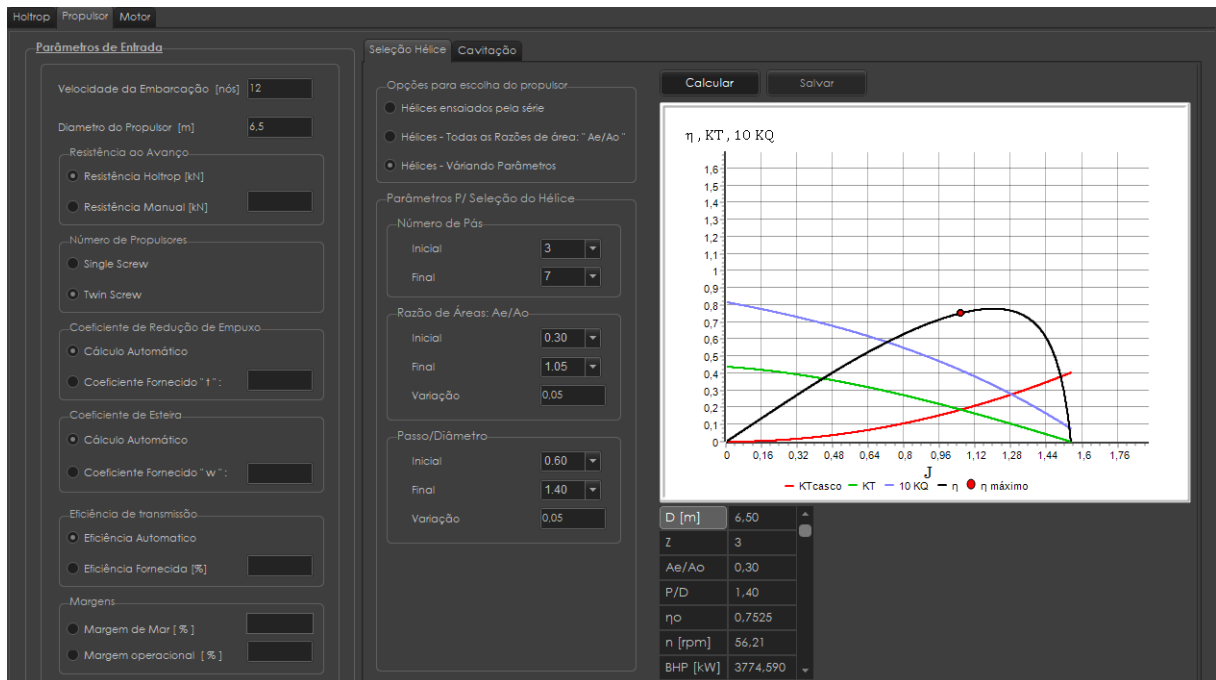
Figura 18 – Exemplo do critério de cavitação aplicado na ferramenta.



Fonte: Autor.

Na Figura 19 é mostrado o módulo completo desenvolvido para a seleção do hélice, integrando o módulo de resistência ao avanço e o procedimento para a verificação dos critérios de cavitação do propulsor através do método de Burrill.

Figura 19 – Ferramenta de seleção do hélice.



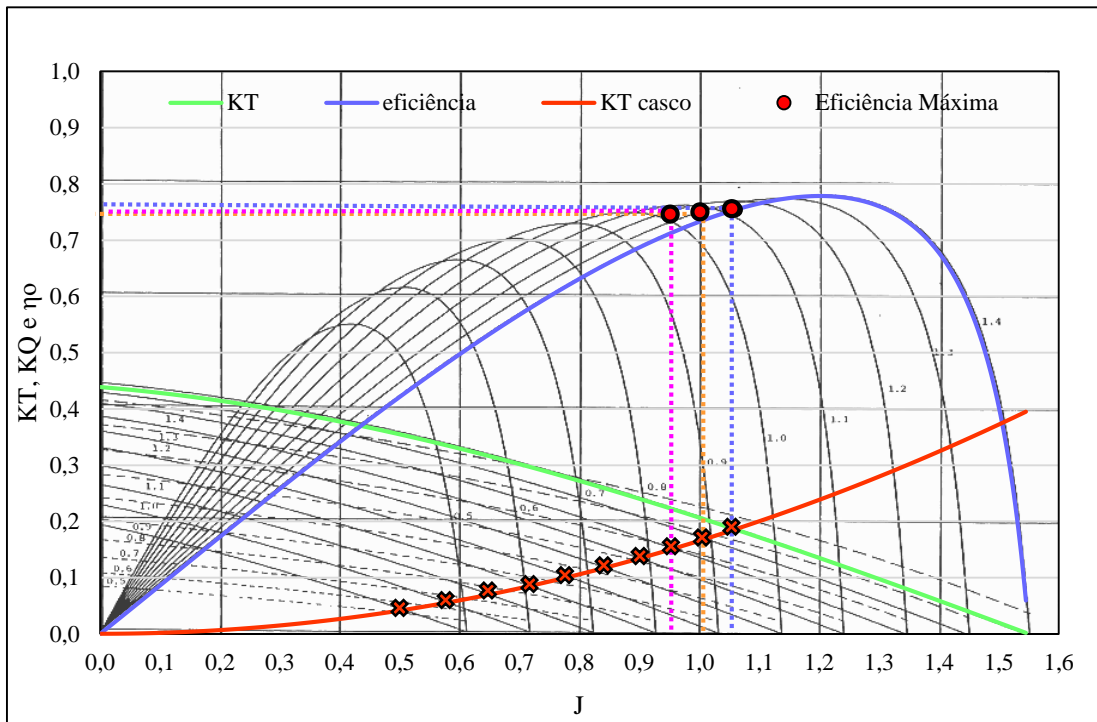
Fonte: Autor.

3.3.1 Verificação da ferramenta de seleção do propulsor

Assim como o módulo de resistência ao avanço, o módulo de seleção de propulsor da ferramenta desenvolvida necessita de uma verificação para verificar a coerência entre o algoritmo implementado e o método tradicional.

A primeira verificação consistiu na análise da representação das curvas de desempenho dos hélices da Série B por meio do procedimento implementado na ferramenta. Para isto, utilizou-se os resultados obtidos e exportados através da ferramenta e sobrepôs-se com o gráfico original de um conjunto de hélices da série sistemática de Wageningen, como pode ser visto no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Verificação do hélice.



Fonte: Autor.

A curva de eficiência do propulsor (de cor azul) sobreposta a curva original da Série B, não apresenta nenhuma diferença aparente, assim como a curva de $K_{T,hélice}$.

A curva $K_{T,Casco}$ (de cor vermelha) quando interceptam as curvas $K_{T,hélice}$, é o ponto onde o empuxo do propulsor é exatamente o empuxo necessário para mover o casco da embarcação. Neste ponto, verifica-se a eficiência do propulsor, e determina-se qual é a maior eficiência para cada razão P/D a qual foram geradas as curvas do hélice. Os pontos em vermelho representam a intersecção das curvas K_T , do casco e do hélice, traçando uma linha vertical neste ponto, determina-se o coeficiente de avanço J e a eficiência do propulsor para este coeficiente de avanço. O Gráfico 3 mostra os pontos de eficiência determinados manualmente e de forma manual.

É possível verificar visualmente que os valores obtidos através da ferramenta são bastante coerentes com os diagramas fornecidos pela série. O resultado fornecido pela ferramenta desenvolvida é apresentado na Tabela 5, que juntamente com a sobreposição das curvas, fornece o hélice de maior eficiência para o conjunto de parâmetros estabelecidos no exemplo em questão.

Tabela 5 – Dados da ferramenta para seleção do hélice.

D [m]	6,5
Z	3
P/D	1,40
A_e/A_o	0,30
$J_{máx}$	1,05
$\eta_o máx$	0,7525

Fonte: Autor.

Vale lembrar que os resultados gerados foram calculados a partir de dados de entrada genéricos, apenas para realizar a verificação da ferramenta.

3.4 MÓDULO PARA A SELEÇÃO DO MOTOR

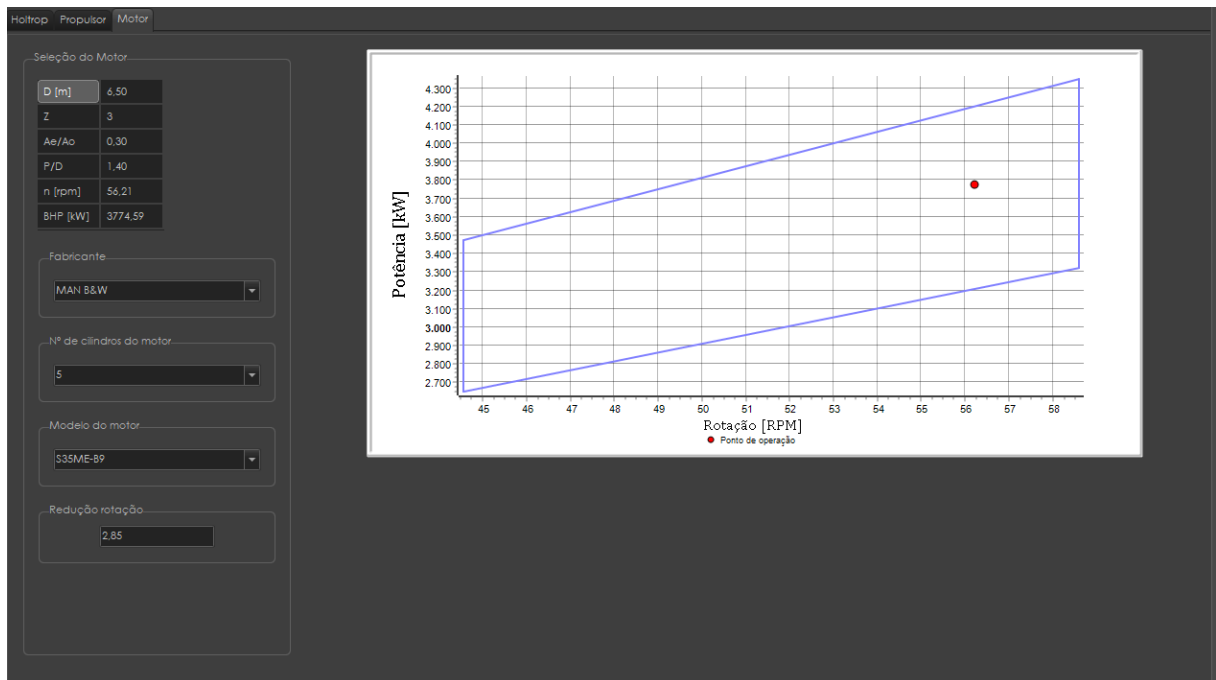
Para a construção do módulo de seleção do motor principal, montou-se um banco de dados com as seguintes fabricantes de motores, MAN B&W, WÄRTSILÄ, JAPAN ENGINE CORPORATION, HSD MAN B&W DIESEL ENGINE E HSD SULZER.

Uma vez construído o banco de dados, o motor ideal é selecionado com base no resultado de BHP obtido através do módulo de seleção do propulsor, no qual é determinada a rotação e a potência necessária para deslocar a embarcação a uma dada velocidade, já considera as margens de mar, transmissão e operação.

A seleção do motor principal é realizada com o auxílio do diagrama de operação, implementada na ferramenta, através dos dados de potência obtidos no catálogo das fabricantes.

Na ferramenta, o usuário deve selecionar a fabricante do motor desejado, o número de cilindros do motor, o modelo do motor e por último se há redução na velocidade de rotação do eixo do motor. A partir desses dados, a ferramenta irá mostrar o diagrama de operação do motor e o ponto de operação da embarcação, sendo que esse deve encontrar-se dentro do diagrama de operação, como exemplificado na Figura 20.

Figura 20 – Ferramenta de seleção do motor principal.



Fonte: Autor.

A rigor o motor ótimo é aquele em que o ponto de operação encontra-se o mais perto possível do vértice superior direito da região de operação, pelo fato do ponto superior representar o índice contínuo máximo nominal ou (nominal *MCR*) em 100% da velocidade e potência do motor.

4 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo realizou-se um estudo de caso utilizando dados de embarcações reais retirados do *Significant Ships*, publicação anual do The Royal Institution of Naval Architects (RINA).

Utilizando esses dados como parâmetros de entrada para a ferramenta desenvolvida, obtém-se como resultado a potência necessária do motor para mover a embarcação em sua velocidade de serviço. O resultado obtido será comparado com o valor real de potência instalada em cada um dos navios estudados.

Para realizar este estudo de caso, foi necessário realizar algumas considerações, devido à ausência de dados da embarcação, sendo elas:

- a) os coeficientes de formas C_P , C_M , C_{WP} , foram estimados a partir de uma interpolação linear entre dois valores, típicos para cada tipo de embarcação utilizada, sendo estes valores retirados de Papanikolaou (2014), visto que o valor de C_B é fornecido pelo *Significant Ships*;
- b) o valor de L_{cb} foi estimado como 2,7% a vante da meia-nau da embarcação. Esse é valor sugerido por Papanikolaou (2014) para embarcações com $C_B \approx 0,80$;
- c) o valor de L_{WL} foi considerado igual ao L_{OA} ;
- d) não foram considerados o bulbo nas embarcações que possuíam o mesmo, devido à ausência de informações sobre esse apêndice na publicação consultada;
- e) não foram considerados a presença de popa transom nas embarcações;
- f) a seleção do hélice foi realizada com base no diâmetro do propulsor disponível na publicação de cada um dos navios analisados;
- g) a seleção do hélice considerou apenas hélices com número de pás entre 3 a 7, pois a utilização de hélices de 2 pás em navios mercantes é pouco usual. Segundo Padovezi (1997) isto ocorre devido ao alto índice de cavitação e vibração associadas a esses propulsores, hélices com número de pás menores apresentam maiores níveis de vibrações induzidas;

- h) a razão de áreas A_E/A_0 considerou apenas os valores para os quais o índice de cavitação ficou abaixo de 2,5%;
- i) procurou-se utilizar o mesmo motor informado na publicação de cada uma das embarcações analisadas;
- j) na ausência de informação, utilizou-se um valor de redução que viabilizasse a utilização do motor instalado.

Na Tabela 6 é mostrada a faixa de coeficientes de forma para diferentes tipos de embarcações; as quais foram propostas em (PAPANIKOLAOU, 2014) e utilizadas na interpolação citada acima.

Tabela 6 – Coeficientes de forma para navios mercantes.

Embarcação	C_P	C_M	C_B	C_{WP}
Fast seagoing cargo ships	0,57-0,65	0,97-0,98	0,56-0,74	0,68-0,74
Bulk carriers	0,79-0,84	0,990-0,997	0,72-0,86	0,88-0,92
Tankers $F_n = 0,15$	0,835-0,855	0,992-0,996	0,78-0,86	0,88-0,92

Fonte: Papanikolaou (2014).

Após a definição dos parâmetros e considerações adotadas para a realização do estudo de caso, deu-se início a análise das embarcações selecionadas.

4.1 ANÁLISE DAS EMBARCAÇÕES

Com base nas considerações descritas no início deste capítulo, foram selecionadas três embarcações para a realização do estudo de caso, cujo os dados são apresentados na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 – Dados dos navios de estudo.

Nome da embarcação	<i>Ocean Garnet</i>	<i>Ephesos</i>	<i>Stena Supreme</i>
Tipo	Graneleiro	Petroleiro	Petroleiro
Ano de publicação	2010	2012	2012
L_{OA} [m]	229,20	274,18	274,23
L_{PP} [m]	222,00	264,00	264,00
B [m]	20,70	50,00	48,00
T [m]	14,90	17,15	16,00
C_B	0,842	0,821	0,826
V [nós]	15	15	14
Motor	MAN B&W	MAN B&W	MAN B&W
Modelo	S60MC6	S70ME-C8	S70ME-C
Cilindros	6	6	6
Potência [kW]	12240	18660	15720
Número de hélices	1	1	1
Diâmetro hélice [m]	7,0	8,2	8,4
Passo	Fixo	Fixo	Fixo

Fonte: Significant Ships.

É importante lembrar que para realizar o estudo de estimativa de resistência ao avanço das embarcações selecionadas são necessárias algumas informações que não foram disponibilizadas pela fonte. Então com base nos dados mostrados nas Tabela 6 e 7, determinou-se os coeficientes de forma e do LCB , cujos valores são mostrados abaixo, Tabela 8.

Tabela 8 – Coeficientes de forma adotados.

Nome da embarcação	<i>Ocean Garnet</i>	<i>Ephesos</i>	<i>Stena Supreme</i>
C_B	0,842	0,821	0,826
C_P	0,833	0,826	0,828
C_M	0,996	0,995	0,995
C_{WP}	0,915	0,908	0,886
LCB [m]	117,00	139,12	139,12

Fonte: Autor.

Após a obtenção dos parâmetros da embarcação, necessários para realizar este estudo, utilizando a ferramenta desenvolvida, avaliou-se se as mesmas cumprem as restrições do método de estimativa de resistência ao avanço de Holtrop e Mennen, mostrado na Tabela 9.

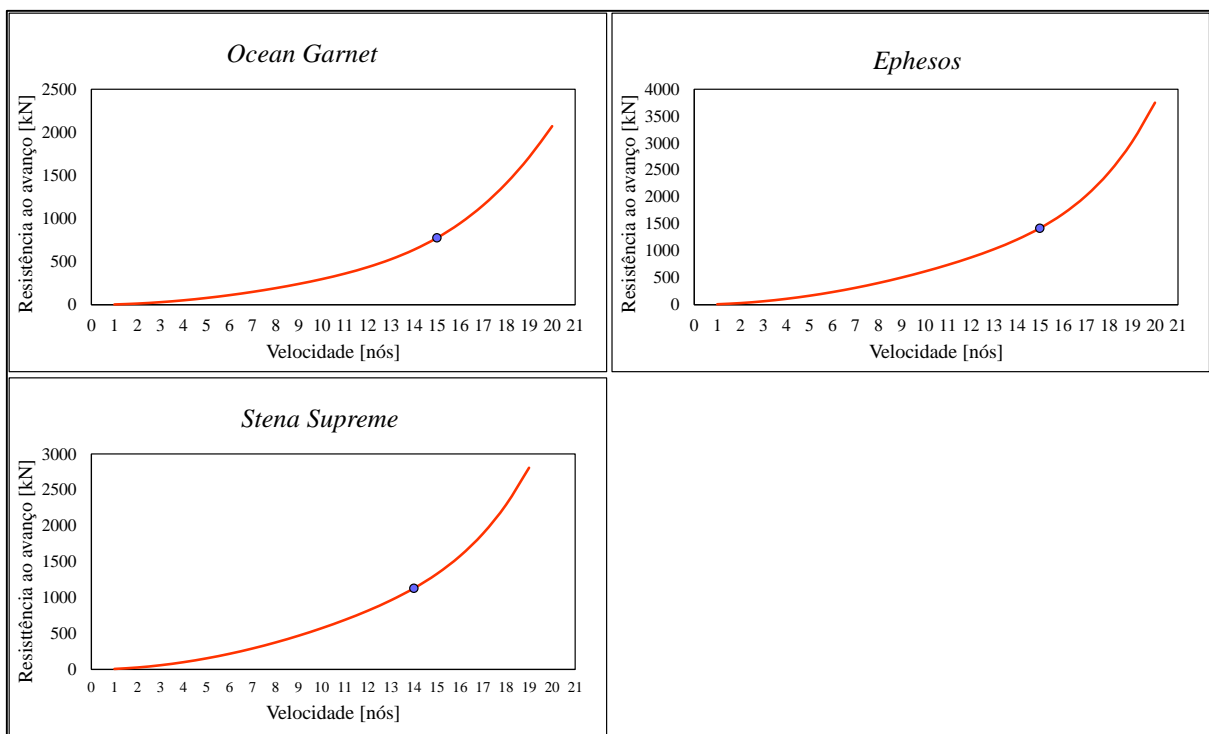
Tabela 9 – Avaliação das restrições do métodos Holtrop e Mennen.

Nome da embarcação	L/B	B/T	C_P	$F_{R, \text{máx.}}$	Restrições método Holtrop
<i>Ocean Garnet</i>	10,72 > 7,1	1,38 < 2,4	0,834	0,17	não atende
<i>Ephesos</i>	5,28	2,92	0,826	0,15	atende
<i>Stena Supreme</i>	5,50	3,20	0,828	0,14	atende

Fonte: Autor.

Apesar do navio *Ocean Garnet* não cumprir todas as restrições do método, informadas na Tabela 1, manteve-se a embarcação neste estudo para fins comparativos. Fornecendo todos os parâmetros à ferramenta desenvolvida, obtém-se primeiramente o resultado de resistência ao avanço, conforme mostrado na Figura 21.

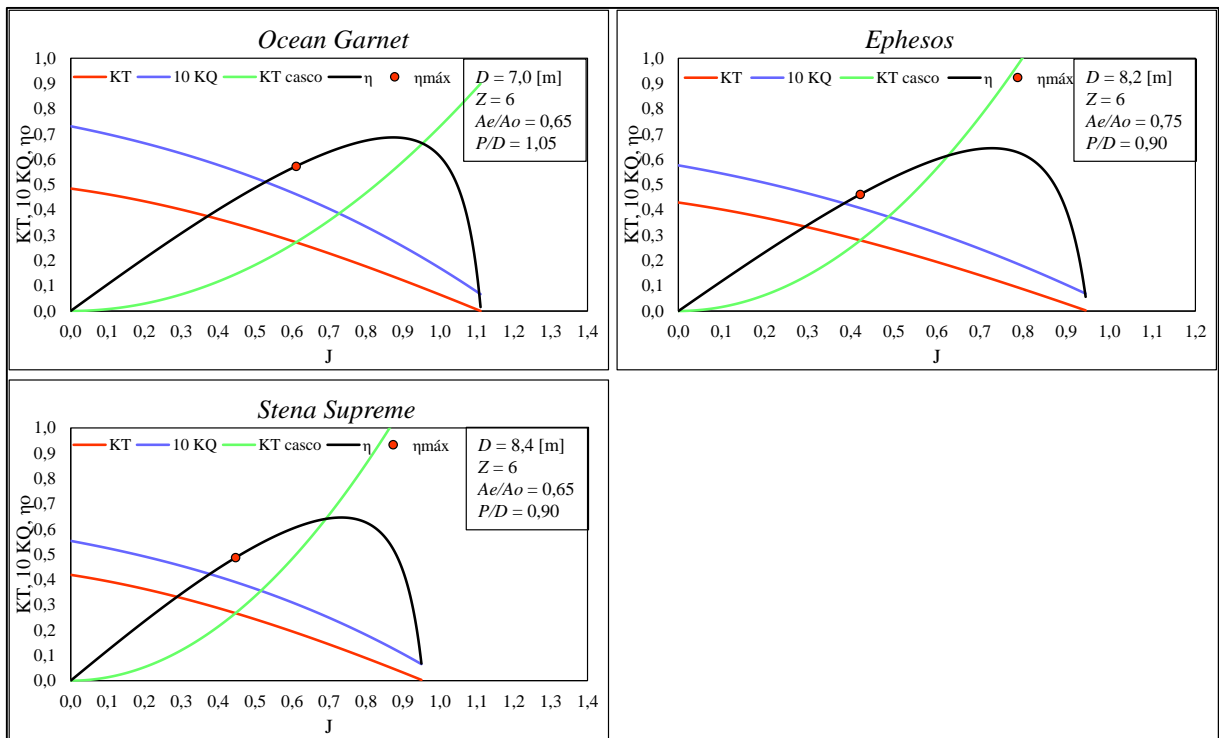
Figura 21 – Estudo de caso: Resistência ao avanço.



Fonte: Autor.

Dando continuidade ao estudo, alimentou-se a ferramenta com o diâmetro dos propulsores, respectivos a cada embarcação, para encontrar as características de um propulsor que forneça a maior eficiência, verificando também os critérios de cavitação. Os resultados desse processo são mostrados nas Figura 22.

Figura 22 – Estudo de caso: Seleção hélice.



Fonte: Autor.

O processo de determinação do propulsor foi limitado ao ajuste de razão de áreas e aos critérios de cavitação para cada uma das embarcações iniciou-se a busca, restringindo a faixa do número de pás de 3 a 7, o A_E/A_0 de 0,30 a 1,05 com variação de 0,05 e o P/D de 0,60 a 1,40 também com variação de 0,05. A partir destas restrições foram gerados hélices na ferramenta, de maior eficiência, verificados se cumpriam os critérios de cavitação. Caso não cumprissem, modificava-se o intervalo de A_E/A_0 inicial, de 0,30 para 0,35, 0,40, 0,45... 1,05, até o momento o qual, o propulsor encontrado atendesse aos critérios de cavitação. Os parâmetros dos hélices gerados podem ser vistos na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros dos hélices obtidos.

OCEAN GARNET							
Hélice	A_E/A_0	J máx	η_o máx	Z	P/D	n [rpm]	BHP [kW]
1	0,30	0,586	0,645	3	0,90	89,75	12170,45
2	0,35	0,477	0,584	3	0,80	90,19	11022,53
3	0,40	0,478	0,578	3	0,80	90,16	11175,92
4	0,65	0,611	0,573	6	1,05	70,52	11446,77

EPHESOS

Hélice	A_E/A_0	$J_{\text{máx}}$	$\eta_o \text{ máx}$	Z	P/D	n [rpm]	BHP [kW]
1	0,30	0,451	0,567	3	0,80	89,84	24484,88
2	0,35	0,333	0,471	3	0,70	89,97	21883,92
3	0,40	0,334	0,465	3	0,70	89,82	22215,55
4	0,60	0,420	0,464	6	0,90	71,32	22546,23
5	0,65	0,421	0,464	6	0,90	71,18	22621,72
6	0,70	0,422	0,463	6	0,90	71,07	22720,54
7	0,75	0,422	0,462	6	0,90	70,99	22842,99

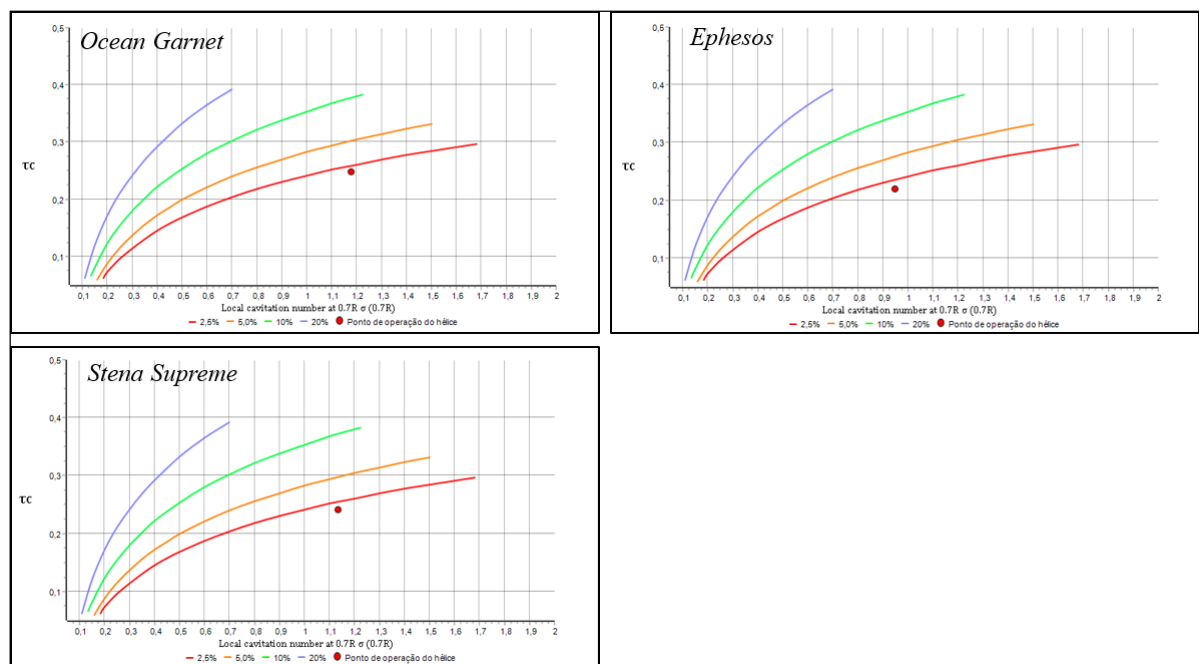
STENA SUPREME

Hélice	A_E/A_0	$J_{\text{máx}}$	$\eta_o \text{ máx}$	Z	P/D	n [rpm]	BHP [kW]
1	0,30	0,476	0,590	3	0,80	77,91	17443,22
2	0,35	0,354	0,495	3	0,70	77,67	15453,71
3	0,40	0,354	0,489	3	0,70	77,59	15680,49
4	0,60	0,446	0,487	6	0,90	61,63	15938,19
5	0,65	0,447	0,487	6	0,90	61,53	15986,11

Fonte: Autor.

Ressaltando que os hélices gerados foram selecionados com base no diâmetro fornecido no *Significant Ships* do propulsor real da embarcação. A seguir a Figura 23 mostra a avaliação dos critérios de cavitação dos hélices selecionados através do diagrama de Burrill.

Figura 23 – Estudo de caso: Critérios de cavitação.



Fonte: Autor.

A Tabela 11 mostra a avaliação referente a porcentagem de cavitação no dorso das pás, pelo critério de Burrill, dos propulsores gerados.

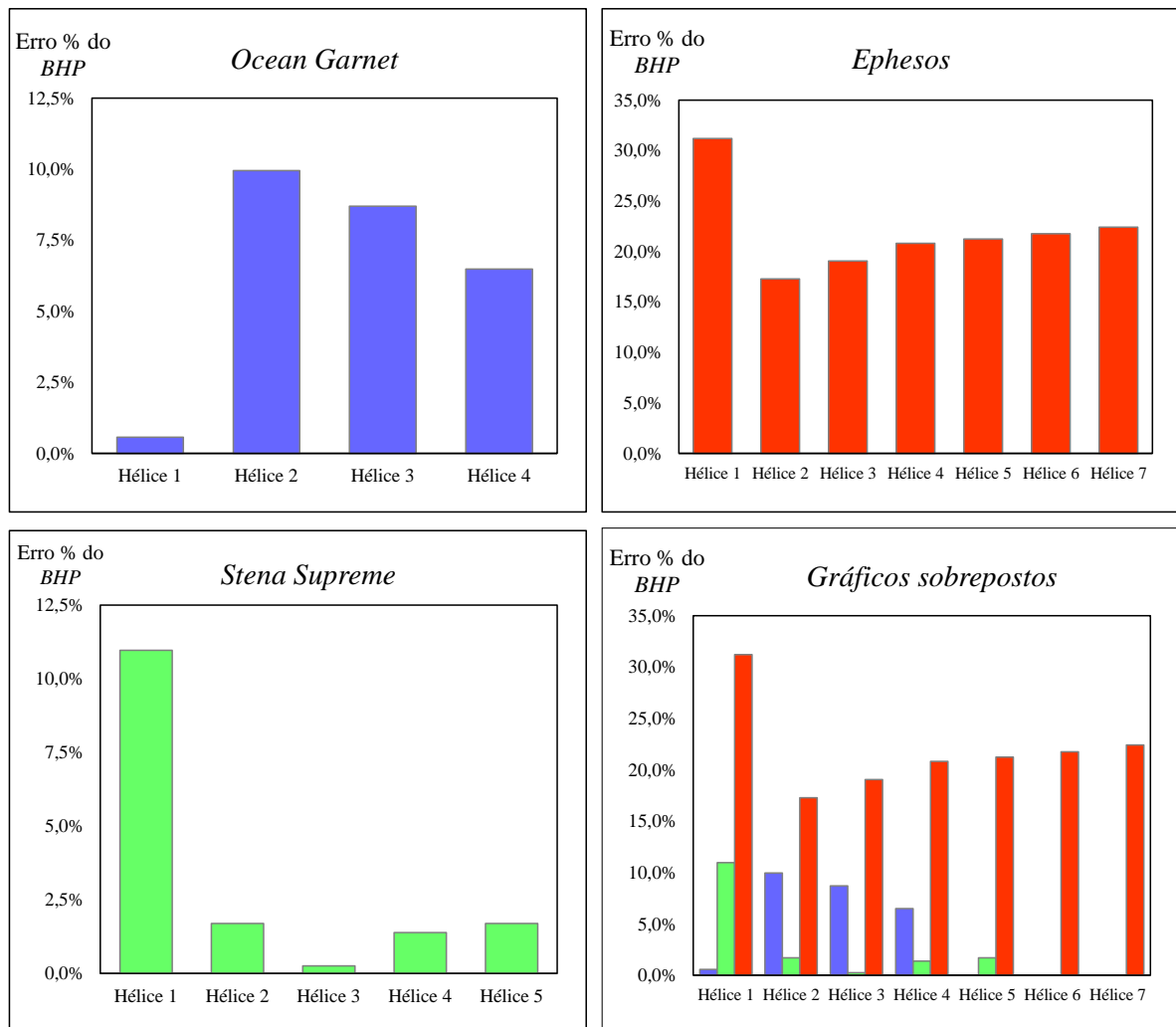
Tabela 11 – Avaliação quanto a cavitação.

<i>OCEAN GARNET</i>				
Hélice	<i>Cavitação [%]</i>			
	<i>2,5</i>	<i>5,0</i>	<i>10</i>	<i>20</i>
1	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Aprovado
2	Reprovado	Reprovado	Aprovado	Aprovado
3	Reprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
4	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
<i>EPHESOS</i>				
Hélice	<i>Cavitação [%]</i>			
	<i>2,5</i>	<i>5,0</i>	<i>10</i>	<i>20</i>
1	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Aprovado
2	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Aprovado
3	Reprovado	Reprovado	Aprovado	Aprovado
4	Reprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
5	Reprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
6	Reprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
7	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
<i>STENA SUPREME</i>				
Hélice	<i>Cavitação [%]</i>			
	<i>2,5</i>	<i>5,0</i>	<i>10</i>	<i>20</i>
1	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Aprovado
2	Reprovado	Reprovado	Aprovado	Aprovado
3	Reprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
4	Reprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
5	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado

Fonte: Autor.

Após a verificação dos critérios de cavitação, mostrados acima, iniciou-se a etapa de seleção do motor principal. Os valores obtidos de *BHP* foram comparados com a potência verdadeira do motor de cada navio e calcularam-se os valores de erro percentual, considerando que o valor correto é o fornecido pela publicação. O Gráfico 4 mostra os respectivos valores dos erros percentuais para cada um dos hélices gerados, para cada uma das embarcações.

Gráfico 4 – Erro percentual entre o valor da potência calculada e real.



Fonte: Autor.

A partir do Gráfico 4 é possível visualizar a diferença entre os valores obtidos através da ferramenta desenvolvida, onde (no eixo x) são os hélices descritos anteriormente, respectivos a cada embarcação, o qual exigem valores de potência de motorização, que foram comparados ao valor real da potência do motor dos navios, e os respectivos erros percentuais atribuídos a estes valores (eixo y). A seguir mostra-se na Tabela 12 o erro atribuído a cada valor de potência solicitada pelos propulsores.

Tabela 12 – Valores dos parâmetros de erro percentual obtidos.

<i>OCEAN GARNET</i>		<i>EPHESOS</i>		<i>STENA SUPREME</i>	
Hélice	Erro %	Hélice	Erro %	Hélice	Erro %
-	-	1	31	-	-
-	-	2	17	-	-
-	-	3	19	1	11
1	1,0	4	21	2	2,0
2	10	5	21	3	0,0
3	9,0	6	22	4	1,0
4	6,0	7	22	5	2,0

Fonte: Autor.

Ressaltando que os hélices gerados foram selecionados com base no diâmetro fornecido no *Significant Ships* do propulsor real da embarcação. O critério para a geração destes hélices foi de que o propulsor fosse aprovado em todos os critérios de cavitação estipulados pelo diagrama de Burrill (Tabela 11).

Observa-se que houveram diferenças entre os valores de potência obtidos neste estudo com os valores reais, correspondente ao motor de cada embarcação, principalmente para o navio *Ephesos*, que apresentou um erro percentual de 22% para o hélice selecionado. Já o *Ocean Garnet* e *Stena Supreme*, apresentam 6,0% e 2,0%, de erro. Esta discrepância dos resultados pode ser decorrente dos seguintes fatores:

- a) o primeiro fator que deve ser considerado é de as embarcações não utilizam hélices da Série B, portanto não há como realizar uma comparação direta entre os hélices selecionados neste estudo com os casos reais;
- b) a diferença entre os resultados pode ter sido ocasionada, devido a estimativas adotadas para realizar os cálculos da resistência ao avanço, podendo assim, essas estimativas não serem fieis as embarcações;
- c) além das estimativas realizadas para o cálculo da resistência ao avanço, foram utilizadas diversas abordagens empíricas no desenvolvimento da ferramenta, como as eficiências propulsivas, que podem não serem condizentes para os navios estudados;
- d) vale lembrar, que a Série B de Wageningen, foi desenvolvida em torno de 1970, e as embarcações de estudo foram construídas a partir do ano 2000, e provavelmente

utilizam hélices desenvolvidas em anos mais recentes do que a Série B, com maiores eficiências e menor cavitação no dorso das pás.

- e) lembrando também que o navio *Ocean Garnet*, apesar de não cumprir todos as limitações do método de Holtrop e Mennen (1984), foi a embarcação que apresentou menor erro percentual das potências.

E por fim, realiza-se a última etapa da integração-casco-hélice-motor, que neste caso é a seleção do motor principal de combustão visto que já se obteve os valores de *BHP* solicitados pelos hélices, de acordo com cada embarcação. O motor escolhido para cada um dos navios, foi da mesma fabricante, mesmo modelo, e também se possível, com o mesmo número de cilindros do motor real da embarcação.

Também foi necessário utilizar reduções na velocidade de rotação do eixo do motor, para adequar a rotação do propulsor com a do eixo de transmissão. A Tabela 13 mostra as características escolhidas, do motor principal, comparado aos verdadeiros motores das embarcações, que atendam a potência solicitada pelo propulsor.

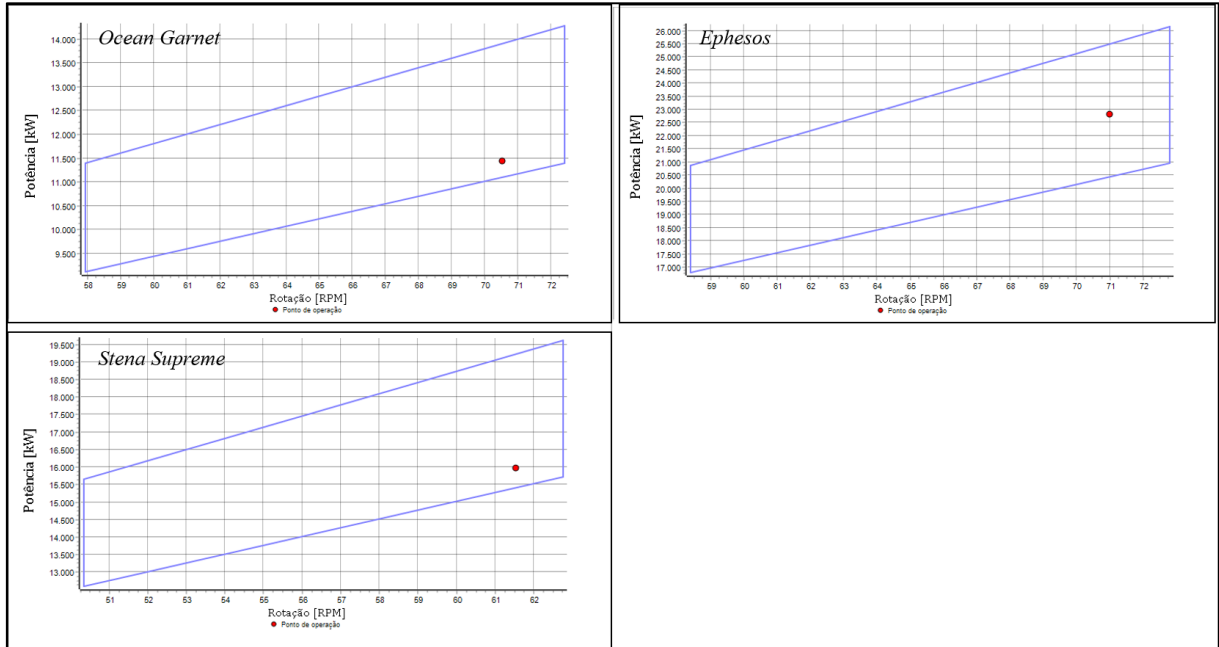
Tabela 13 – Resultado dos motores selecionados.

Navio	Real/Estudo	Fabricante	Modelo	Nº Cilindros	<i>BHP</i> _{calculado} [kW]	Nº Reduções
<i>Ocean</i>	Real	MAN B&W	S60MC6	6	12240	-
<i>Garnet</i>	Estudo	MAN B&W	S60ME-C8	6	11446,77	1,45
<i>Ephesos</i>	Real	MAN B&W	S70ME-C8	6	18660	-
	Estudo	MAN B&W	S70ME-C8	8	22842,99	1,25
<i>Stena</i>	Real	MAN B&W	S70ME-C	6	15720	-
<i>Supreme</i>	Estudo	MAN B&W	S70ME-C8	6	15986,11	1,45

Fonte: Autor.

A potência calculada para o motor do navio *Ephesos* não atingiu um valor próximo a potência do motor verdadeiro, sendo necessário utilizar um motor com maior número de cilindros. As publicações do Significant Ships não informam se há redução na rotação dos motores de cada embarcação, por este motivo na Tabela 13 a coluna de reduções foi preenchida com um “-“ para as embarcações reais. A seguir, a Figura 24 mostra o *diagrama de operação* dos motores selecionados, assim como o ponto de operação, para a velocidade de rotação selecionada.

Figura 24 – Diagrama de operações dos motores selecionados.



Fonte: Autor.

Assim, após analisar os resultados obtidos de potência de motorização, Gráfico 4, e selecionar os motores para cada embarcação, conclui-se o estudo de caso. É importante observar, que as diferença entre os resultados obtidos neste estudo com os fornecidos da embarcação, são dependentes de diferentes fatores que alteram a resposta, mas principalmente, a estimativa de resistência ao avanço, pode afetar em grande escala a potência de motorização solicitada.

5 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi a construção e desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de realizar a estimativa de resistência ao avanço, selecionar um hélice da Série B com a maior eficiência e selecionar o motor principal de navios deslocantes.

Para alcançar o objetivo, utilizou-se os métodos descritos na fundamentação teórica. Após desenvolver a ferramenta e verificar os resultados demonstrados nas seções anteriores, foi possível realizar as seguintes conclusões.

Os valores obtidos de resistência ao avanço calculados pelo método de Holtrop e Mennen (1984), demonstram-se bastante eficazes e com grande semelhança aos fornecidos pelo programa Maxsurf Resistance.

O módulo de seleção do hélice da série sistemática de Wageningen apresenta uma alternativa de melhor precisão do que o método tradicional para a escolha do propulsor, pelo fato do código computacional implementado realizar a verificação do hélice que possui maior eficiência através de algoritmos, em menor tempo de processamento computacional.

Além de fornecer o hélice de melhor eficiência, o módulo foi desenvolvido para que o usuário realize variações dos parâmetros do hélice, tornando assim a ferramenta uma alternativa eficaz para a seleção de um propulsor.

Junto ao módulo de seleção do hélice, o critério de cavitação auxilia o usuário no processo de verificação de cavitação através do diagrama de Burrill, tornando-se muito mais prático e ágil.

O módulo de seleção do motor possibilita ao usuário a escolha de forma mais veloz e eficaz, comparados a extensa busca em catálogos dos fabricantes de motores de navios.

A partir dos estudos de caso é possível verificar que através da modificação no intervalo de razão de áreas A_E/A_0 , as eficiências do propulsor ótimo, diminuem, causado um aumento no *BHP* solicitado. Porém com esta modificação, o hélice de maior eficiência o qual seja aprovado nos critérios de cavitação é resultante de um maior número de pás, e uma menor velocidade de rotação do propulsor.

Nota-se também um aumento da razão passo diâmetro P/D , como característica final do hélice selecionado, conseqüentemente há menores níveis de cavitação nas pás do propulsor.

É possível afirmar, utilizando a ferramenta desenvolvida e os conceitos teóricos aplicados em sua construção, que para cada condição de operação de uma embarcação, há uma configuração de parâmetros do hélice o qual irá fornecer uma potência de motor com valores aceitáveis e com grande proximidade com casos reais.

Também é possível afirmar que o hélice de maior eficiência não é sempre o melhor propulsor, pois como visto no estudo de caso, pode ocorrer cavitação no propulsor.

O processo de integração casco-hélice-motor depende de diversas variáveis, sendo assim, é dever do projetista, analisar e estudar diferentes abordagens e configurações que compõem o sistema propulsivo de uma embarcação, selecionando assim, um conjunto propulsivo eficiente e que cumpra as solicitações impostas pela embarcação.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A ferramenta desenvolvida mostra-se bastante eficaz e torna-se uma alternativa de maior praticidade e agilidade para o estudo de integração casco-hélice-motor, nas etapas iniciais de projeto. As recomendações para trabalhos futuros visam melhorias empregadas a ferramenta e suas funções, sendo essas:

- a) a criação de diferentes métodos para estimativa de resistência ao avanço, como exemplo o método de Savitsky para a estimativa de resistência de cascos planantes, entre outros;
- b) a inclusão de diferentes séries de hélices, como a Série sistemática Kaplan, Série Gawn, entre outras;
- c) a inclusão de um procedimento que permita a análise de hélices de passo variável;
- d) a incorporação de um algoritmo semelhante ao trabalho desenvolvido por Lascala (2016) o qual gera a geometria 3D do hélice através dos parâmetros geométricos do propulsor;
- e) a alternativa de inclusão de motores pelo usuário, criando seu próprio banco de dados;
- f) a inclusão de dados dos motores, como dimensões, peso, consumo específico de combustível.

REFERÊNCIAS

- BERNITSAS, M. M.; RAY, D.; KINLEY, P. K_T , K_Q and efficiency curves for the Wageningen B-series propellers. Michigan: Department of Naval Architecture and Marine Engineering College of Engineering, 1981.
- BRINATI, H. L. PNV 2334 Instalações de máquinas marítimas. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2010.
- CANTU, M. Essential Pascal. Piacenza: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2008.
- CARLTON, S. J. Marine propellers and propulsion. Oxford: Butterworth-Heinemann imprint of Elsevier, 2012.
- HOLTROP, J.; MENNEN, G. G. An approximate power prediction method. **International Shipbuilding Progress**, v. 29, n. 335, p. 166-170, 1982.
- HOLTROP, J.; MENNEN, G. G. A statistical re-analysis of resistance and propulsion data. **International Shipbuilding Progress**, v. 31, n. 363, p. 272-276, 1984.
- INTERNATIONAL TOWING TANK CONFERENCE. Skin friction and turbulence stimulation. **Eighth International Towing Tank Conference**, n. 8, p. 220, 1957.
- LAMMEREN, W. P. A.; MANEN, J. D.; OOSTERVERLD, M. W. C. The Wageningen B-screw series. **SNAME Transactions**, v. 77, p. 269-317, 1969.
- LASCALA, T. C. Geração geométrica e modelagem automatizada de propulsores da Série-B de Wageningen. 2016. 145 f. Tese de conclusão de curso. Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville.
- MAN DIESEL & TURBO. Basic principles of ship propulsion. Copenhagen, 2011.
- MENDES, E. R. Procedimento para seleção otimizada de um propulsor da Série B. 2015. 81 f. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville.
- MOLLAND, A.; TURNOCK, S.; HUDSON, D. Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power. Nova York: Cambridge University Press, 2011.
- NETTO, J. M. A. et al. Manual de hidráulica. 8. ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1998.
- OOSTERVELD, M. W. C.; OOSSANEN, P. V. Further computer-analyzed data of the Wageningen B-screw series. Rotterdam: **International Shipbuilding Progress**, v. 22, n. 251, 1975.

PADOVEZI, C. Aplicação de resultados de escala real no projeto de hélices de embarcações fluviais. 1997. 87 f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

PAPANIKOLAOU, A. Ship design: Methodologies of preliminary design. Atenas: Springer, 2014.

PASSOS, R. B. Seleção de propulsores em situações genéricas da Engenharia Naval. 2013. 82 f. Tese de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ROH, M.; LEE, K. Y. Computational ship design. Singapore: Springer Nature, 2018

SIGNIFICANT SHIPS OF 2010. Londres: The Royal Institution of Naval Architects, 2010. Anual. CD-ROM.

SIGNIFICANT SHIPS OF 2013. Londres: The Royal Institution of Naval Architects, 2013. Anual.

SIGNIFICANT SHIPS OF 2012. Londres: The Royal Institution of Naval Architects, 2012. Anual. CD-ROM.

TONACIO, V. C. Avaliação de propulsores navais em relação a eficiência e excitação de vibração. 2014. 109 f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

TRINDADE, J. Hidrodinâmica e propulsão: Engenharia de máquinas marítimas. Paço de Arcos: Escola Superior Náutica Infante D. Henrique, 2012.

WIRTH, N; JENSEN, K. Pascal, User manual and report. Nova York: Springer-Verlag, 1991.

ANEXO A – Tabelas referente aos valores das constantes da função polinomial dos coeficientes de torque e empuxo.

Tabela 14 – Constantes do polinômio para determinar o Coeficiente de Torque.

<i>Torque (K_Q)</i>					
<i>n</i>	<i>C_n</i>	<i>S_n</i>	<i>t_n</i>	<i>u_n</i>	<i>v_n</i>
1	0,003793680	0	0	0	0
2	0,008865230	2	0	0	0
3	-0,032241000	1	1	0	0
4	0,003447780	0	2	0	0
5	-0,040881100	0	1	1	0
6	-0,108009000	1	1	1	0
7	-0,088538100	2	1	1	0
8	0,188561000	0	2	1	0
9	-0,003708710	1	0	0	1
10	0,005136960	0	1	0	1
11	0,020944900	1	1	0	1
12	0,004743190	2	1	0	1
13	-0,007234080	2	0	1	1
14	0,004383880	1	1	1	1
15	-0,026940300	0	2	1	1
16	0,055808200	3	0	1	0
17	0,016188600	0	3	1	0
18	0,003180860	1	3	1	0
19	0,015896000	0	0	2	0
20	0,047172900	1	0	2	0
21	0,019628300	3	0	2	0
22	-0,050278200	0	1	2	0
23	-0,030055000	3	1	2	0
24	0,041712200	2	2	2	0
25	-0,039772200	0	3	2	0
26	-0,003500240	0	6	2	0
27	-0,010685400	3	0	0	1
28	0,001109030	3	3	0	1
29	-0,000313912	0	6	0	1
30	0,003598500	3	0	1	1
31	-0,001421210	0	6	1	1
32	-0,003836370	1	0	2	1
33	0,012680300	0	2	2	1
34	-0,003182780	2	3	2	1
35	0,003342680	0	6	2	1
36	-0,001834910	1	1	0	2
37	0,000112451	3	2	0	2
38	-0,000029723	3	6	0	2

39	0,000269551	1	0	1	2
40	0,000832650	2	0	1	2
41	0,001553340	0	2	1	2
42	0,000302683	0	6	1	2
43	-0,000184300	0	0	2	2
44	-0,000425399	0	3	2	2
45	0,0000869243	3	3	2	2
46	-0,000465900	0	6	2	2
47	0,0000554194	1	6	2	2

Fonte: Oosterveld (1975).

Tabela 15 – Constantes do polinômio para determinar o Coeficiente de Empuxo.

<i>Empuxo (K_T)</i>					
<i>n</i>	<i>C_n</i>	<i>S_n</i>	<i>t_n</i>	<i>u_n</i>	<i>v_n</i>
1	0,008800496	0	0	0	0
2	-0,204554	1	0	0	0
3	0,166351	0	1	0	0
4	0,158114	0	2	0	0
5	-0,147581	2	0	1	0
6	-0,481497	1	1	1	0
7	0,415437	0	2	1	0
8	0,0144043	0	0	0	1
9	-0,0530054	2	0	0	1
10	0,0143481	0	1	0	1
11	0,0606826	1	1	0	1
12	-0,0125894	0	0	1	1
13	0,0109689	1	0	1	1
14	-0,133698	0	3	0	0
15	0,00638407	0	6	0	0
16	-0,00132718	2	6	0	0
17	0,168496	3	0	1	0
18	-0,0507214	0	0	2	0
19	0,0854559	2	0	2	0
20	-0,0504475	3	0	2	0
21	0,010465	1	6	2	0
22	-0,00648272	2	6	2	0
23	-0,00841728	0	3	0	1
24	0,0168424	1	3	0	1
25	-0,00102296	3	3	0	1
26	-0,0317791	0	3	1	1
27	0,018604	1	0	2	1
28	-0,00410798	0	2	2	1
29	-0,000606848	0	0	0	2
30	-0,0049819	1	0	0	2

31	0,0025983	2	0	0	2
32	-0,000560528	3	0	0	2
33	-0,00163652	1	2	0	2
34	-0,000328787	1	6	0	2
35	0,000116502	2	6	0	2
36	0,000690904	0	0	1	2
37	0,00421749	0	3	1	2
38	5,65229E-05	3	6	1	2
39	-0,00146564	0	3	2	2

Fonte: Oosterveld (1975).