



Universidade Federal de Santa Catarina

Djonatan Guilherme Erbs Schoeping

**PROJETO PRELIMINAR DE SISTEMA PROPULSIVO DE UMA EMBARCAÇÃO
DE APOIO *OFFSHORE* DO TIPO *PLATFORM SUPPLY VESSEL***

Trabalho de Conclusão de Curso

Engenharia Naval

Joinville
2014

Djonatan Guilherme Erbs Schoeping

**PROJETO PRELIMINAR DE SISTEMA PROPULSIVO DE UMA EMBARCAÇÃO
DE APOIO *OFFSHORE* DO TIPO *PLATFORM SUPPLY VESSEL***

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Programa de Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Naval.

Orientador: Prof. Jorge Luiz Goes Oliveira, Ph.D.

Joinville
2014

Djonatan Guilherme Erbs Schoeping

**PROJETO PRELIMINAR DE SISTEMA PROPULSIVO DE UMA EMBARCAÇÃO
DE APOIO *OFFSHORE* DO TIPO *PLATFORM SUPPLY VESSEL***

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Naval, e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina.

Banca Examinadora:

Prof. Jorge Luiz Goes Oliveira, Ph.D.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Lucas Weihmann, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Luiz Minioli, Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

A toda minha família por me fornecer todo suporte e amor ao longo da minha vida.

A minha Avó, Ildegarte Weber Schoepping, e ao meu falecido Avô, Pedro Schoepping, por me acolherem em sua casa neste tempo de graduação.

Agradeço à minha namorada Jéssica Nicoletti, pela motivação e seu amor ao longo destes anos juntos.

Ao meu orientador Jorge Luiz Goes Oliveira, por sua dedicação para tornar este trabalho realidade.

A todo corpo docente da UFSC de Joinville pelo trabalho realizado ao longo destes anos.

A todos meus amigos por me ajudarem nas horas boas e difíceis que passei.

RESUMO

As embarcações de apoio a plataformas (*offshore*) de petróleo surgiram para fornecer auxílio especializado na logística petrolífera. Dentre estas embarcações de apoio *offshore* estão às embarcações do tipo *Platform Supply Vessel (PSV)*. Nesta logística petrolífera, um navio que possui um sistema propulsivo ineficaz ocasionará apoio deficiente, trazendo prejuízos para a cadeia produtiva do setor. Destaca-se em um projeto preliminar de um sistema propulsivo as seguintes etapas: escolha do tipo de sistema propulsivo, estimativa de resistência ao avanço da embarcação, dimensionamento dos componentes que compõe o sistema e desenvolvimento do arranjo preliminar da instalação propulsora. O projeto preliminar do sistema propulsivo deste trabalho foi baseado nas dimensões da embarcação *Bram Brasil*. O sistema propulsão selecionado para esta embarcação foi o diesel-elétrico com hélice de passo variável devido à sua flexibilidade e operabilidade. Para aperfeiçoar os processos de cálculo foram criados códigos no programa *MATLAB®*. Nestes algoritmos podem ser encontrados: a estimativa de resistência ao avanço pelo método de *Holtrop e Mennen*, o dimensionamento do hélice pelos polinômios das séries de *Wageningen* e a estimativa de potência dos principais componentes. Os resultados foram considerados adequados, com desempenho representativo da faixa de valores habituais de *PSVs*. O arranjo criado foi projetado para aperfeiçoar o espaço destinado a outros sistemas navais e de transporte de carga.

Palavras-chave: Embarcação de apoio *offshore*, Resistência ao avanço, Sistema Propulsivo, Hélice de Passo Variável.

ABSTRACT

The Supply Vessels have arisen to provide dedicated help in petroleum logistic. Among these Supply Vessels, one sort is herein researched: the *Platform Supply Vessels (PSV)*. In the petroleum logistic chain, a ship that has an inefficient propulsion system will result in improper support operation and, as consequence, ineffectiveness of the production system. The main tasks of the preliminary propulsion system design can be summarized as: selection of a specific propulsion system, ship resistance estimation, sizing of components that compose the system and designing the layout of selected propulsion system. The propulsion system design in this essay was based in dimensions of *Bram Brazil* vessel. The selected propulsion system for this vessel was: a controllable pitch propeller controlled by diesel-electric engine. This combination choice is justified due to its flexibility and operability. For optimizing the calculation process, some algorithms were created in *MATLAB®* script. In these calculations, it is found: the ship resistance by *Holtrop* and *Mennen* method, the propeller sizing by *Wageningen* polynomial series and the estimation of main components power. The results are considered appropriate, within the ranges of usual values found for *PSVs*. The layout design created was compact and assured proper space for other marine and cargo transport systems.

Keywords: Platform Supply Vessel, Ship Resistance, Propulsion System, Controllable Pitch Propeller.

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

AHTS - *Anchor Handling Tug Supply*

CB – *Crewboat*

MPSV - *Multipurpose Supply Vessel*

PLSV - *Pipe Laying Support Vessel*

PSV – *Platform Supply Vessel*

SV – *Supply Vessel*

TS – *Tug Supply*

LISTA DE SÍMBOLOS

$1 + k_1$ – Fator forma

A_t – Área molhada do espelho de popa

B – Boca da embarcação

BAR – Razão de áreas do hélice

C_{wp} – Coeficiente do plano de flutuação

C_p – Coeficiente prismático

D – Diâmetro do hélice

$d_{thruster}$ – Diâmetro do propulsor lateral

Fr – Número de *Froude*

g – Aceleração da gravidade

H – Calado

J – Coeficiente de avanço

K_q – Coeficiente de torque

K_t – Coeficiente de empuxo

L – Comprimento da embarcação na linha da água

n – Rotação do hélice

η_D – Eficiência propulsiva

η_h – Eficiência do casco

η_r – Eficiência rotativa relativa

η_t – Eficiência de transmissão

σ – Número de cavitação

ρ – Densidade da água

P_D – Potência entregue

P_E – Potência efetiva

P_I – Potência instalada

P_o – Pressão estática no hélice

P_V – pressão de vapor da água

Q – Torque do propulsor

R_A – Resistência de correlação

R_{APP} – Resistência dos apêndices

R_B – Resistência do bulbo

Re – Número de Reynolds

R_F – Resistência de fricção de uma placa plana

$R_{thrusters}$ – Resistência dos propulsores laterais

R_{TR} – Resistência do espelho de popa

R_W – Resistência de onda

S – Área molhada total

T – Empuxo do hélice

τ – Coeficiente de Burrill

ν – Viscosidade cinemática

V – Velocidade de avanço da embarcação

V_a – Velocidade de avanço no hélice

V_s – Velocidade de serviço

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	EMBARCAÇÕES DE APOIO <i>OFFSHORE</i>	13
3.1.1	Tipos de embarcações de apoio <i>offshore</i>	14
3.2	RESISTÊNCIA AO AVANÇO	16
3.2.1	Componentes da resistência ao avanço	17
3.2.2	Métodos de regressão e séries históricas	18
3.3	PROPULSORES	19
3.3.1	Tipos de propulsores	20
3.3.2	Principais coeficientes do hélice	22
3.3.3	Cavitação	23
3.3.4	Vibração e ruído	24
3.3.5	Materiais usados em hélices	25
3.4	MÁQUINA PROPULSORA	26
3.4.1	Tipos de máquinas propulsoras	26
3.5	CONFIGURAÇÕES DE INSTALAÇÕES PROPULSORAS	27
3.5.1	Arranjos de instalações propulsoras	27
3.6	MARGENS DE MAR E MOTOR	28
4	SELEÇÃO DO SISTEMA PROPULSIVO	30
4.1	ESCOLHA DO TIPO HÉLICE	30
4.2	ARRANJO DO MAQUINÁRIO	30
5	ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO	32
6	DIMENSIONAMENTO DO HÉLICE	37
7	DIMENSIONAMENTO DOS MOTORES-GERADORES PRINCIPAIS, CAIXAS REDUTORAS E MOTORES ELÉTRICOS	47

8	ARRANJO PRELIMINAR DA INSTALAÇÃO PROPULSORA	51
9	OBSERVAÇÕES FINAIS	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
	APÊNDICES	60

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma interessante história naval. Esta narrativa vai desde a iniciativa privada do Visconde de Mauá, nos empreendimentos navais até o auge desta indústria em 1970, na sua decadência durante os períodos dos anos de 1980 e 1990, até seu fortalecimento próximo dos anos 2000. Durante o seu fortalecimento ao fim da década de 1990, a indústria naval se desenvolveu devido à exploração *offshore* de petróleo. A *Lei do Petróleo* e o *Programa Navega Brasil* foram criadas justamente como estímulo para a indústria naval brasileira durante esta época. Estes dois estímulos criaram as condições para que a Petrobras ampliasse sua demanda por embarcações de apoio *offshore* (JESUS; GITAHY, 2007, p.1-7).

A demanda por embarcações de apoio *offshore* tende a aumentar até 2020 (CONEXÃO MARÍTIMA, 2014, p. 1). Neste processo incluem-se embarcações do tipo *PSV*, às quais foram fabricadas significativamente no Brasil em 2014 (ABEAM, 2014, p.5-10). Esta embarcação opera em situações diversas e o seu sistema de propulsão deve estar preparado para operar de acordo com as variações impostas à instalação propulsora.

A instalação propulsora pode ser classificada, de forma metafórica, como o “coração” de um navio. Escolher o arranjo propulsivo adequado e dimensionar os seus componentes é de suma importância para a operação da embarcação. Maximizar eficiência proporciona a redução de custos relativos a materiais, e a escolha de elementos funcionais e de adequado maquinário. Pequenas variações no aumento da eficiência podem parecer desprezíveis, entretanto, devido ao consumo elevado de potência nos motores marítimos, este incremento de eficácia representa uma grande parcela de economia em termos operacionais (VALLE, 2011, p.1-3).

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal criar o projeto preliminar do sistema propulsivo de uma embarcação de apoio *offshore* do tipo *Platform Supply Vessel (PSV)*. E os objetivos específicos são:

- Estimar a resistência ao avanço da embarcação escolhida (tipo *PSV*) através da implementação de um código no software *MATLAB®* usando o método de regressão proposto por *Holtrop* e *Mennen*;
- Dimensionar o hélice através da criação de algoritmo no software *MATLAB®* usando os polinômios de *Wageningen* ;
- Estimar a potência necessária na máquina motriz principal e dos motores elétricos;
- Dimensionar motores-geradores, motores elétricos e caixas de redução;
- Criar a representação preliminar do arranjo das máquinas que compõe o sistema propulsivo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada a fundamentação teórica para o projeto preliminar de um sistema propulsivo de uma embarcação de apoio *offshore* do tipo *PSV*.

3.1 EMBARCAÇÕES DE APOIO *OFFSHORE*

As plataformas de petróleo necessitam de uma logística que opere de forma eficiente. Esta logística pode ser tanto feita por helicópteros, que em geral transportam pequenas cargas e/ou pessoas, ou por embarcações nas quais transportam os materiais requeridos (COSTA *et al.*, 2008, p. 128). Estas embarcações servem de apoio *offshore* e possuem características exclusivas para o tipo de serviço que irão realizar. Características que vão de estudos de geologia até fechamento de poços.

Além de seus atributos específicos, as embarcações de apoio *offshore* (ou *supply boats*) necessitam de um sistema de manobra que permita mantê-las em uma mesma posição em relação à plataforma a fim de realizar suas operações da melhor maneira possível (MATHEDI, 2010, p. 6-7). Esse sistema de manobra é chamado de posicionamento dinâmico. Uma das razões para este sistema de manobra ser realizado com sucesso é o correto funcionamento dos propulsores de proa (MARQUES, 2011, p. 1), veja a figura 3.1.

Figura 3.1. Embarcação com propulsores de proa (*bow thrusters*).



Fonte: Disponível em <http://www.a-m-s.net.au>, acessado em junho de 2014.

Os propulsores de proa são fundamentais para o sistema de posicionamento dinâmico (*dynamic position*). Com este sistema, as operações de embarque e desembarque através dos guindastes da plataforma podem ser realizadas com maior segurança. Estas operações são efetuadas para entregar suprimentos à plataforma. Em geral, os suprimentos que as embarcações de apoio podem transportar são (BATISTA, 2005, p. 24):

- Água;
- Óleo diesel;
- Tubos de perfuração e produção;
- Fluidos de perfuração;
- Granéis (exemplo: cimento).

3.1.1 Tipos de embarcações de apoio *offshore*

As embarcações de apoio *offshore* transportam vários tipos de cargas. Tal transporte exige diferentes requisitos para a embarcação de suporte: variação de dimensões, potência motriz, funcionalidade etc. Por volta da década de 50, embarcações de apoio às plataformas de petróleo ainda eram pouco especializadas. Elevados níveis de acidentes, incêndios e naufrágios eram comuns. Embarcações com maior eficiência e segurança eram, portanto, necessárias (MATHEDI, 2010, p.13).

As principais embarcações de apoio *offshore* são apresentadas abaixo (MATHEDI, 2010, p. 13-21):

- *Anchor Handling Tug Supply (AHTS)*: serve de manuseio de âncora e reboque, mas também é usada para transporte de suprimentos (veja figura 3.2);

Figura 3.2. Anchor Handling Tug Supply.



Fonte: MATHEDI, 2010.

- *Crewboat (CB)*: embarcação para o transporte da tripulação;
- *Tug Supply (TS)*: rebocador que trabalha junto à plataforma. O mesmo também pode transportar suprimentos;
- *Pipe Laying Support Vessel (PLSV)*: embarcações que realizam a tarefa de posicionar e lançar as linhas de produção de petróleo e cabos de telecomunicações;
- *Multipurpose Supply Vessel (MPSV)*: embarcação utilizada para diferentes tipos de tarefas. Veja a figura 3.3;

Figura 3.3. Embarcação do tipo MPSV.



Fonte: Disponível em <http://www.imcbrokers.com>, acessado em junho de 2014.

- *Platform Supply Vessel (PSV)*: são navios que transportam em geral cargas acima de 3000 toneladas, projetados para trabalhar em diferentes condições de mar e possuem uma elevada capacidade de manobra. Veja a figura 3.4;
- *Supply Vessel (SV)*: são embarcações que transportam menores cargas que embarcações do tipo *PSV* (e.g. 1000 toneladas). O SV apresenta comprimentos de 30 até 80 metros.

Figura 3.4. Embarcação do tipo PSV.



Fonte: Disponível em <http://www.rolls-royce.com>, acessado em junho de 2014.

3.2 RESISTÊNCIA AO AVANÇO

Para qualquer tipo de embarcação a primeira etapa do projeto de sistema propulsivo é a estimativa da resistência ao avanço. Essa resistência é decorrente das forças associadas ao campo de pressões e cisalhamento ao redor do casco e da superestrutura durante o movimento da embarcação. Dois números adimensionais estão em geral relacionados com cálculos pertinentes à resistência ao avanço: o número de *Reynolds*, Re , e o número de *Froude*, Fr .

Estes dois números são importantes, pois a resistência ao avanço é uma função que depende destes últimos, ou seja, resistência ao avanço $\rightarrow f(Re, Fr)$. As equações 3.1 e 3.2 representam os números de *Reynolds* e *Froude*, respectivamente.

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (3.1)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (3.2)$$

Onde:

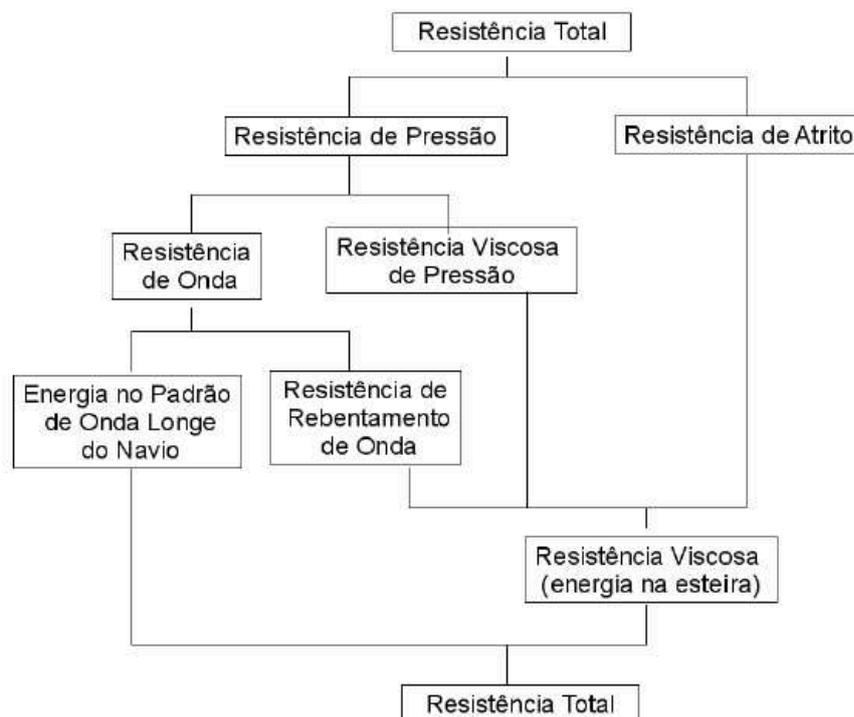
- V é a velocidade de avanço da embarcação;
- L é o comprimento da embarcação na linha da água;
- ν é a viscosidade cinemática;
- g é a aceleração da gravidade.

3.2.1 Componentes da resistência ao avanço

As componentes principais da resistência ao avanço de uma embarcação podem ser decompostas de acordo com a Figura 3.5; TRINDADE (2012, p. 18-25). As principais parcelas são explicadas a seguir:

- Resistência de onda: perda energia devido à formação de determinados padrões de ondas criadas pela interação do casco e a água do mar;
- Resistência de atrito: associada ao cisalhamento entre o casco e o fluido. Uma camada de fluido se adere à superfície do navio e esta camada segue com mesma velocidade da embarcação, as camadas mais externas vão diminuindo de velocidade até chegar à velocidade da corrente livre. A distância da camada mais adjacente até a corrente livre é chamada de espessura de camada limite. Dentro da camada limite existe uma troca intensa de quantidade de movimento entre as partículas de fluido;
- Resistência viscosa de pressão: os efeitos viscosos do fluido geram uma distribuição de pressão na embarcação. Esta distribuição se opõe ao movimento do navio;

Figura 3.5. Decomposição da resistência ao avanço do casco nu.



Fonte: TRINDADE, 2012

Compõem ainda a resistência total ao avanço da embarcação:

- Resistência aerodinâmica: contribuição das forças de resistência (integração das forças de pressão e cisalhamento) entre o ar e a superestrutura da embarcação;
- Resistência adicional de mar: surge devido às ondas que se chocam com a embarcação prejudicando o seu movimento de avanço;
- Resistência de apêndices: propulsor, leme, eixo em contato com água etc. provocam resistências adicionais que fazem parte da resistência ao avanço total.

3.2.2 Métodos de regressão e séries históricas

Métodos de regressão e séries históricas podem fornecer estimativas preliminares confiáveis da resistência ao avanço de uma embarcação, e assim reduzir o tempo despendido com ensaios em escala reduzida. Os métodos de regressão utilizam uma larga base de dados de embarcações distintas para fornecer correlações para o cálculo da resistência ao avanço. Já as séries históricas utilizam alguma forma particular de casco para então mensurar sua resistência ou a potência

efetiva (potência efetiva = resistência ao avanço x velocidade de avanço do navio). Entre as principais séries históricas e métodos de regressão usados para embarcações do tipo deslocante (e.g. navios mercantes, rebocadores, embarcações de apoio *offshore etc.*) são destacadas (MOLLAND *et al.*, 2011, p 198 - 202):

- Séries compiladas da *British Ship Research Association (BSRA)*;
- Série 60;
- *Average © Data*;
- *Holtrop e Mennen*.

De todos os métodos e séries listados acima, o mais utilizado em navios do tipo deslocante é o método de regressão proposto por *Holtrop e Mennen*. Este método decompõe a resistência total da seguinte forma; vide equação 3.3 (*Holtrop e Mennen (1982)* apud MOLLAND *et al.*, 2011, p. 202)):

$$R_T = R_F(1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A \quad (3.3)$$

Onde:

- R_F é a resistência de fricção de uma placa plana;
- R_{APP} é a resistência devido à presença dos apêndices;
- R_W é a componente resistência de onda;
- R_B é a resistência devido à presença do bulbo;
- R_{TR} é a componente de resistência devido ao espelho de popa;
- R_A é a resistência de correlação. Esta representa a parcela de perda de energia devido ao arrasto do ar;
- $1 + k_1$ é o fator de forma: estabelece a relação de forma entre o arrasto de uma placa plana e aquele obtido com o casco da embarcação.

3.3 PROPULSORES

Depois da estimativa da resistência ao avanço, o dimensionamento e seleção de um propulsor são necessários. Toda embarcação de apoio precisa de um propulsor adequado para sua função. E o papel de um propulsor é gerar a força propulsiva (*thrust*). Essa força surge devido à variação da quantidade de movimento do fluido. De forma simplificada, o propulsor exerce uma força sobre o fluido e o

fluido exerce uma força de reação de mesma magnitude e direção contrária sobre o propulsor (MOLLAND *et al.*, 2011, p. 246). Devido a este conjunto de ações e reações, a embarcação consegue navegar e efetuar suas respectivas tarefas.

3.3.1 Tipos de propulsores

Na engenharia naval a escolha do propulsor varia de acordo com os requisitos de projeto, tais como: rendimento, interação com o casco e cavitação (TRINDADE, 2012, p. 35). Os principais tipos de propulsores segundo Molland (2011, p. 248-251) e Carlton (2007, p. 13-20) são:

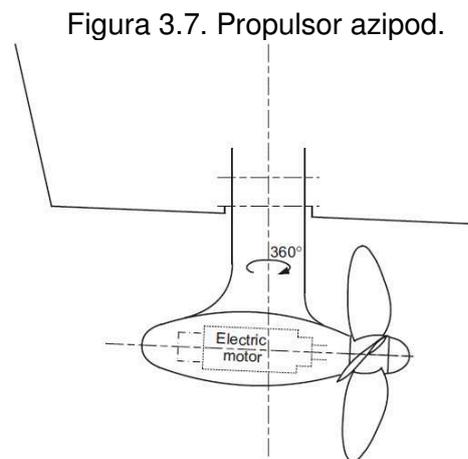
- Hélice de passo fixo: as pás deste tipo de hélice estão fixas no cubo do hélice. As fixações das pás no cubo podem ser feitas separadamente na fundição ou podem ser parte de um único bloco de fundição. Em geral a razão diâmetro do cubo pelo diâmetro do hélice está dentro da faixa de 0,18 a 0,20;
- Hélice de passo variável: esse tipo de propulsor permite a variação do passo para as diferentes condições de carregamento no hélice. Diferente do hélice de passo fixo sua razão diâmetro do cubo/diâmetro do hélice é em torno de 0,25. Seu custo inicial de aquisição e de manutenção também é maior em relação ao hélice de passo fixo. Apesar destes custos mais altos, este propulsor é útil em rebocadores, *trawlers*, *ferries* e embarcações de apoio *offshore*, tais como o *PSV*. Veja a figura 3.6;

Figura 3.6. Hélice de passo variável.



Fonte: Disponível em <http://www.nauticexpo.com>, acessado em junho de 2014.

- Hélice com duto: consiste em um hélice dentro de um duto. Ele pode ser separado em duto acelerador (*Accelerating Duct*) e duto desacelerador (*Decelerating duct*). O duto acelerador tem como objetivo principal ter uma maior eficiência em situações de forte carregamento do hélice e o duto desacelerador tem como meta a redução da cavitação;
- Propulsor contra-rotativo (ou *Contra-Rotating Propeller*): esta configuração permite a utilização de dois hélices em linha. Estes possuem sentidos de rotação diferentes com um eixo de rotação concêntrico. O propulsor contra-rotativo visa recuperar a perda de eficiência realinhando o escoamento. Em hélices, o escoamento de saída tem significativas componentes tangenciais e centrífugas;
- Propulsor tandem: semelhante ao *Contra-Rotating Propeller*, o propulsor tandem possui dois hélices em linha. Porém, estes hélices estão conectados ao mesmo eixo, conseqüentemente, possuem o mesmo sentido de rotação. Este sistema é usado quando um hélice só não é suficiente para o empuxo (*thrust*) necessário;
- Propulsor azimuthal e azipod: é um propulsor no qual o motor que fornece potência ao hélice pode estar dentro do pod (azipod) ou fixo no casco do navio (azimuthal). Na maioria dos propulsores do tipo azipod, o pod consegue girar 360 graus e nos dois tipos de propulsão não há a necessidade de leme. Estas características facilitam as tarefas que exigem uma boa manobrabilidade. Veja a figura 3.7;



Fonte: MOLLAND *et al.*, 2011

- Propulsor cicloidal (*Cycloidal Propeller*): também conhecido como propulsor *Voith Schneider*, este sistema possui as pás posicionadas na vertical e

não necessita de leme. O propulsor cicloidal é encontrado em rebocadores, *ferries* e embarcações de apoio;

- Propulsor lateral (*Lateral Thrust Units*): este propulsor é posicionado lateralmente nos navios e no início este era disposto na proa (*bow thruster*). Com a necessidade de maiores manobras por parte das embarcações este propulsor é atualmente aplicado tanto na proa quanto na popa. É comum encontrar este tipo de propulsor em embarcações de apoio *offshore*.

3.3.2 Principais coeficientes do hélice

Depois da escolha do tipo de propulsor, o dimensionamento do mesmo é necessário. Para correto dimensionamento, o escoamento não uniforme (ou esteira não uniforme) devido à presença da embarcação deve ser considerado. Entretanto, nos ensaios em escala reduzida o hélice é testado em condições no qual o fluxo que chega até ele é praticamente uniforme. Testando o hélice desta maneira, chega-se em relações não dimensionais nas quais só dependem das características do propulsor, ou seja, sem a influência da esteira formada pelo casco (TRINDADE, 2012, p. 45-46). Segundo Carlton (2007, p. 89), as principais relações adimensionais são (equações 3.4 até 3.7):

- Coeficiente de força propulsiva:

$$K_t = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (3.4)$$

- Coeficiente de torque:

$$K_q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (3.5)$$

- Coeficiente de avanço:

$$J = \frac{V_a}{nD} \quad (3.6)$$

- Número de cavitação:

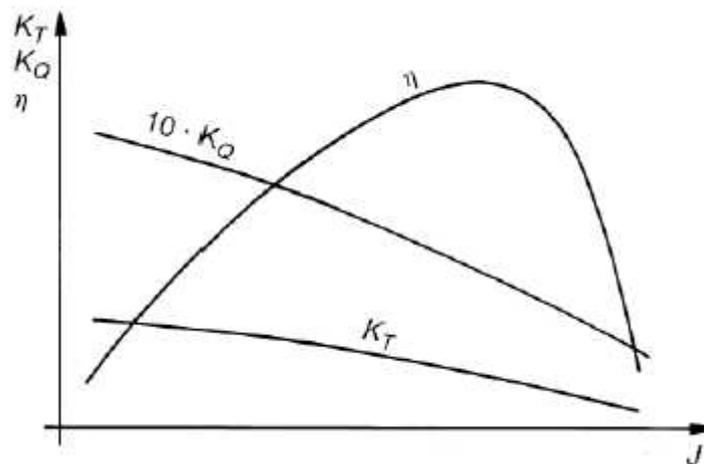
$$\sigma = \frac{P_o - P_v}{\rho n^2 D^4} \quad (3.7)$$

Onde:

- T é o empuxo;
- ρ é a densidade da água;
- n é a rotação;
- D é o diâmetro do hélice;
- Q é o torque do propulsor;
- V_a é a velocidade de avanço no hélice;
- P_o é a pressão estática no hélice;
- P_v é a pressão de vapor da água.

Através dos coeficientes de avanço, de torque e de força propulsiva consegue-se chegar até o diagrama em águas livres, onde η ou η_o é a eficiência em águas abertas. Este diagrama ilustra as principais características do hélice em diferentes condições de operação e é utilizado na etapa de projeto para dimensionar e/ou selecionar o propulsor. Veja a figura 3.8.

Figura 3.8. Diagrama de águas livres.



Fonte: TRINDADE, 2012

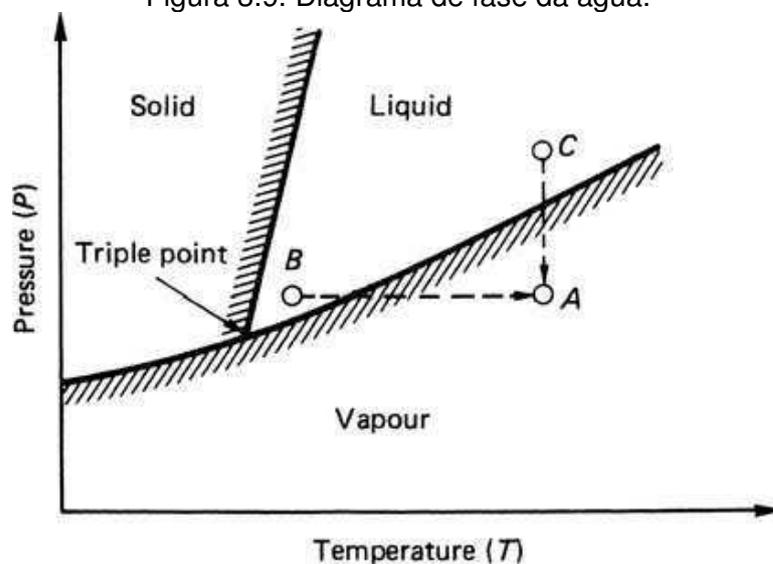
3.3.3 Cavitação

O fenômeno da cavitação é indesejado nos hélices navais e deve ser evitado ou tolerado a baixos níveis durante o funcionamento do mesmo. Trata-se de um fenômeno no qual a água muda de estado físico devido à baixa pressão a temperatura constante (Processo C→A). A figura 3.9 ilustra esta situação pelo trajeto do ponto 'C' para o ponto 'A'. Em geral, a cavitação ocorre no dorso do hélice, na zona de pico de sucção, dando origem a bolhas de vapor (MOLLAND *et al.*, 2011,

p. 270-272). Em seguida, a bolha colapsa na face do hélice devido ao aumento posterior de pressão (retornando ao estado líquido). A mudança de fase líquido-vapor e vapor-líquido provoca os seguintes danos ao propulsor (TRINDADE, 2012, p.53-54):

- Ruído;
- Vibração;
- Redução da eficiência no propulsor;
- Erosão da superfície das pás.

Figura 3.9. Diagrama de fase da água.



Fonte: CARLTON, 2007

3.3.4 Vibração e ruído

Após o dimensionamento do hélice e avaliação de critérios para evitar a cavitação, as questões relacionadas à vibração e ao ruído sonoro devem ser verificadas. Normalmente vibração e ruído sonoro excessivos podem ser causados por dois fenômenos: ressonância ou excitação forçada (CARLTON, 2007, p. 470). A ressonância ocorre devido a um ou mais componentes/estruturas possuírem a mesma frequência natural e vibrarem com esta mesma frequência, provocando oscilações perigosas. Já a excitação forçada é causada pela atuação de forças externas atuando na estrutura/componente, nas quais podem ser até mesmo periódicas (RAO, 2009, p. 8). As principais fontes de vibração e ruído em sistemas propulsivos navais são (MOLLAND *et al.*, 2011, p. 369-370):

- Forças de excitação induzidas pelo sistema motriz principal (e.g. motor diesel, turbina a gás etc.);
- Força causada devido ao fenômeno da cavitação do propulsor;
- Distribuição de força propulsiva não uniforme no hélice;
- Ressonância entre os componentes do sistema propulsivo e a estrutura da embarcação.

As questões relacionadas à vibração e ruído devem ser levadas em consideração quando for efetuada a escolha do tipo de propulsor, motor ou turbina e transmissão. Até a escolha do número de pás do propulsor deve ser levada em conta devido ao fenômeno da ressonância (CARLTON, 2007, p. 470).

3.3.5 Materiais usados em hélices

A escolha do material do propulsor é muito importante durante as etapas de dimensionamento, avaliação da cavitação e avaliação de vibração/ruído. Vale ressaltar que desde os anos de 1960 os materiais usados nos hélices mudaram devido à melhoria das propriedades mecânicas e os meios de fabricação utilizados nos mesmos. Durante as décadas de 60 e 70, os aços inoxidáveis eram bem utilizados, entretanto, nos anos seguintes estes tipos de aços perderam espaço para as ligas de cobre (CARLTON, 2007, p. 383-385).

O cobre é um material muito dúctil e com boa resistência à corrosão. A ductilidade excessiva do cobre não é uma característica desejada ao hélice naval. Uma solução viável para diminuir sua ductilidade é acrescentar elementos de liga de maneira a atingir a rigidez adequada, assim criando a liga de cobre (CALLISTER, 2002, p. 256-258). Em geral, as características mais desejadas nos materiais usados nos propulsores navais são (CARLTON, 2007, p.385):

- Elevada resistência à corrosão;
- Elevada resistência à erosão devido à cavitação;
- Boa resistência mecânica em condições de erosão corrosiva e fendas devido à corrosão;
- Vida útil longa;
- Elevada resistência à fadiga.

Os principais materiais usados nos propulsores navais que satisfazem as características acima e segundo Carlton (2007, p.385) são:

- Latão de alta resistência;
- Bronze-Alumínio;
- Aço inoxidável;
- Ferro fundido;
- Aço fundido;
- Compósitos de fibra de carbono.

3.4 MÁQUINA PROPULSORA

A escolha da máquina propulsora é, em geral, realizada a partir do conhecimento da potência necessária a ser entregue ao hélice, calculada depois do dimensionamento do propulsor (TRINDADE, 2012, p. 58). Após calculada a potência, os parâmetros como custo inicial, consumo de combustível, níveis de ruído e vibração, manutenção, quantidade de emissão de gases poluentes, peso e rotação da máquina propulsora são também avaliados na escolha do sistema motriz principal (MOLLAND *et al.*, 2011, p. 296).

3.4.1 Tipos de máquinas propulsoras

As principais máquinas propulsoras aplicadas em navios de grande e médio porte são (MOLLAND, 2008, 332-336):

- Motor diesel: é o sistema motriz mais comum encontrado em navios mercantes. Possui uma eficiência térmica em torno de 30% e tem a capacidade de consumir combustíveis menos refinados e baratos (pesados). O motor diesel é separado em três categorias: de baixa, de média e de alta rotação;
- Turbina a gás: possui uma ótima relação potência/peso, além de uma eficiência superior ao motor diesel. Sua aplicação gira em torno destes navios: cruzeiros, *ferries*, porta-containers de maior velocidade, militares e navios de transporte de gás natural liquefeito (LNG *carries*);
- Turbina a vapor: usualmente é aplicada quando se necessita de grandes potências. Possui baixos índices de vibração, ocupa pouco espaço e pouco peso. Uma desvantagem considerável é o seu consumo de combustível, o qual é

maior que o de um motor diesel. Este sistema é geralmente usado em submarinos nucleares e LNG *carries*;

- Motor elétrico: neste caso um gerador fornece energia a um motor elétrico. Este motor elétrico possui o eixo diretamente acoplado ao propulsor.

3.5 CONFIGURAÇÕES DE INSTALAÇÕES PROPULSORAS

A configuração de uma instalação propulsora é uma tarefa que deve ser analisada de acordo com requisitos da embarcação e das possibilidades de transmissão do torque oriundo da máquina principal ao elemento propulsor. A transmissão de potência do sistema motriz principal até o propulsor varia de acordo com o tipo de operação da embarcação. A transmissão pode acontecer de duas maneiras nos navios: direta ou indiretamente. A transmissão direta é definida quando o eixo do propulsor é o mesmo da máquina propulsora. Já o caso da indireta ocorre quando o eixo da máquina principal não está acoplado diretamente no eixo propulsivo (TRINDADE, 2012, p. 67).

3.5.1 Arranjos de instalações propulsoras

Os *layouts* das instalações propulsoras são frequentemente divididos em cinco vertentes (MOLLAND *et al.*, 2011, p. 296 - 299):

- Acoplamento direto diesel: motor diesel acoplado diretamente no eixo propulsor. Este motor opera em baixa rotação, numa faixa de 90 até 130 rotações por minuto (rpm). Este arranjo é usado em navios tanques, graneleiros, cargueiros e porta-containers;
- Motor diesel com caixa de redução: possui um ou dois motores de média rotação, em torno de 500 até 600 rpm. O eixo da máquina motriz principal fica acoplado a uma caixa de redução e, por conseguinte o eixo do propulsor fica acoplado a esta caixa de transmissão. Este sistema pode ser aplicado em navios *ferries*, cruzeiros, cargueiros e embarcações de apoio *offshore*;
- Diesel-elétrico ou turbina-elétrico: nada mais que um sistema motriz acoplado a um gerador elétrico no qual fornece energia ao motor elétrico. Este maquinário possui uma boa flexibilidade de arranjo, de fácil controle e possui baixo

índice de vibração. São geralmente aplicados em navios de passageiros, militares e embarcações de apoio;

- Sistema híbrido: é um sistema no qual possui um/dois motores diesel e um/duas turbinas a gás acoplados a uma caixa de transmissão. Usado em navios de guerra, pois em situações de economia de energia usa-se o motor diesel e no caso de situações onde há a necessidade de maior velocidade, utiliza-se a turbina a gás;
- Propulsores de alta velocidade: em geral possui uma máquina motriz que varia entre 500 a 1000 rpm acoplada a uma caixa de transmissão. Esta potência gerada pode ser usada para um propulsor jato d'água ou um *surface piercing propeller* (propulsores utilizados para embarcações a altas velocidades, a partir de 40 nós ou mais).

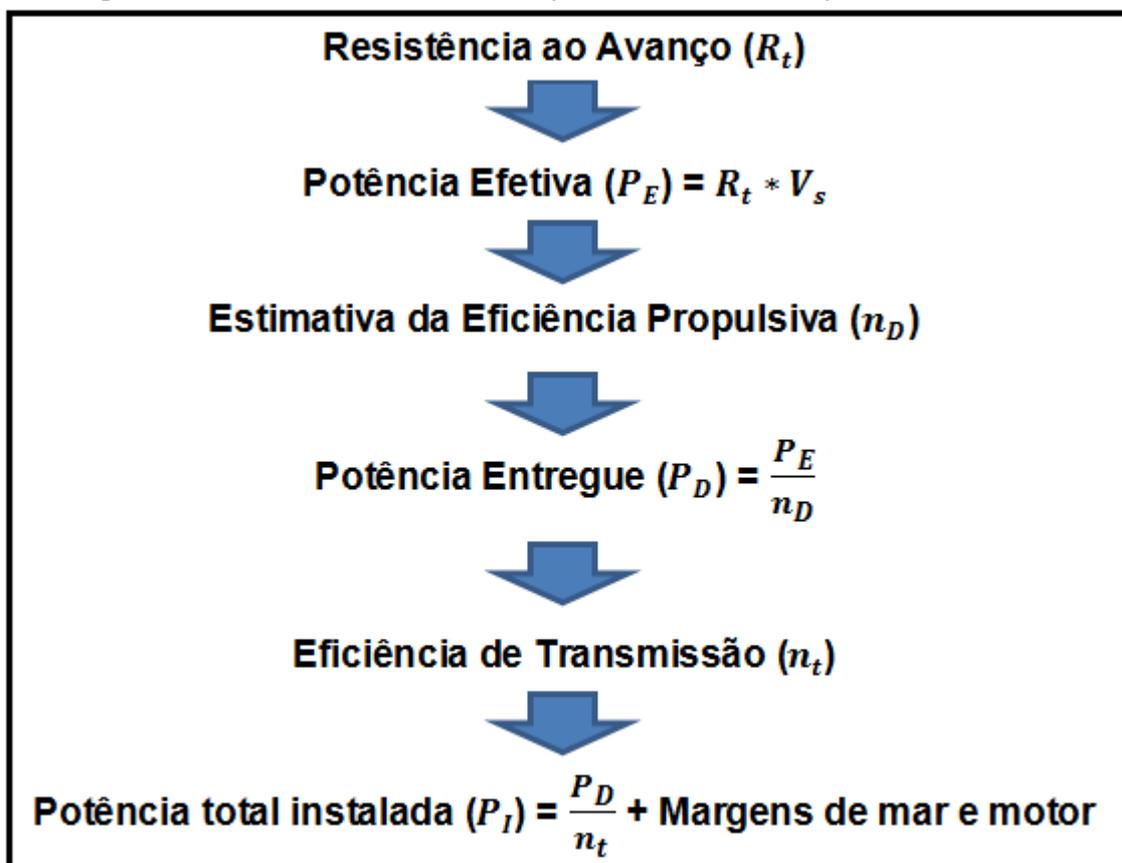
3.6 MARGENS DE MAR E MOTOR

Definido o arranjo da instalação propulsora, a potência da máquina motriz deve ser calculada. E neste cálculo, margens de potência são acrescentadas no sistema propulsivo para garantir a correta operação quando a resistência ao avanço for maior que a de projeto (MAN, 2010, p. 28-29):

- Margens de mar: A embarcação nem sempre vai operar em condições de mar calmo e o seu casco vai apresentar um maior nível de rugosidade com o passar do tempo. Para situações de mar agitado e casco mais rugoso ou encrustado são acrescentados de 15% até 30% de margem na potência instalada (P_I);
- Margens de motor: em geral, o motor deve operar em uma condição mais leve que sua operação máxima. Então, é acrescentada a margem de motor na potência instalada total, ou seja, a embarcação vai operar com 90% ou 85% de sua capacidade máxima em condições de projeto.

Definidas as margens de mar e motor de um determinado projeto de sistema propulsivo, a potência instalada total pode ser estimada. A figura 3.10 ilustra os processos de estimativa necessários em um projeto de sistema propulsor naval (MOLLAND *et al.*, 2011, p. 10). Esta sequência começa com o cálculo da resistência ao avanço e termina na estimativa de potência instalada total.

Figura 3.10. Processos necessários para a estimativa da potência instalada.



Fonte: Autor.

4 SELEÇÃO DO SISTEMA PROPULSIVO

Neste capítulo será discutida a escolha do tipo de sistema propulsivo. Nesta escolha estará juntamente à decisão de qual hélice, transmissão e motor para este projeto preliminar de sistema propulsivo.

4.1 ESCOLHA DO TIPO HÉLICE

O sistema propulsivo de uma embarcação do tipo *PSV* necessita de um propulsor que forneça uma boa capacidade de manobra (MATHEDI, 2010, p.8). Então, foram selecionados dois hélices de passo variável, pois fornecem boa navegabilidade e são amplamente usados em *PSVs*. Esta boa capacidade de navegação surge devido ao hélice de passo variável possuir características de diferentes propulsores em um só hélice (MOLLAND *et al.*, 2011, p. 248).

4.2 ARRANJO DO MAQUINÁRIO

O hélice selecionado aperfeiçoa operações com diferentes combinações de passo e rotação. Da mesma maneira que este hélice foi selecionado para aprimorar as operações *offshore*, a planta diesel-elétrica foi escolhida pelas seguintes vantagens (MAN, 2011, p. 3-4):

- Facilidade de configurar a disposição do *layout* do maquinário devido a sua alta flexibilidade e praticidade de montagem e instalação;
- Boa confiabilidade devido à possibilidade de permitir mais de um motor em seu arranjo;
- Permite configurações com propulsores de passo variável;
- Menores índices de ruído e vibração;
- Baixo custo de manutenção e de operação.

Para o arranjo preliminar de maquinário, os seguintes equipamentos são usuais em arranjos de *PSVs* e foram selecionados (MAN, 2011, p. 1-16):

- Quatro motores-geradores;
- Dois painéis de controle e proteção;
- Dois transformadores;

- Dois conversores de frequência;
- Dois motores elétricos;
- Duas caixas de redução.

5 ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO

Definida a instalação propulsora, a próxima etapa é estimar a resistência ao avanço. Para realizar este cálculo é necessário utilizar alguma série histórica ou regressão linear para barcos deslocantes que se enquadre nas dimensões da embarcação e nas características de operação. Foi escolhida a regressão proposta por *Holtrop e Mennen*; implementado no software *MATLAB®*. As informações da embarcação selecionada se encaixam nas faixas de L/B e $Fr_{máximo}$ de navios pesqueiros e rebocadores. Dados de entrada para o método em questão são especificados abaixo. A tabela 5.1 ilustra os dados da embarcação do tipo *PSV Bram Brasil*.

Tabela 5.1. Dados da Embarcação.

Comprimento na linha da água (L)	88,392	m
Calado (T)	7,01	m
Boca (B)	18,29	m
Centro longitudinal de carena	47,521	m
Coeficiente de meia nau	0,992	
Coeficiente plano de flutuação (C_{wp})	0,842	
Coeficiente prismático (C_p)	0,743	
Área molhada do espelho de popa (A_t)	10,731	m ²
Área molhada total (S)	2621,01773	m ²
Velocidade de serviço (V_s)	13,8	nós
Deslocamento	8280,4	ton
Diâmetro do <i>thruster</i>	2,85	m
Área transversal do bulbo (A_{bt})	30,139	m ²
Centroide vertical de A_{bt} (h_b)	2,46	m ²

Fonte: Autor

A equação 3.3 exhibe os componentes necessários para calcular a resistência ao avanço pelo método de *Holtrop e Mennen*. O fator forma $1 + k_1$, que associa a resistência de forma, decorrente da distribuição de pressão sobre o casco, à resistência viscosa, é calculada através da equação 5.1. O parâmetro L_r é dado pela equação 5.2.

$$1 + k_1 = + c_{13} * (0,93 + c_{12} * ((B/L_r)^{92497}) * ((0,95 - C_p)^{-0,521448}) * ((1 - C_p + 0,0225 * lcb)^{0,6906})) \quad (5.1)$$

$$L_r = L * (1 - C_p + (0,06 * C_p * lcb)/(4 * C_p - 1)) \quad (5.2)$$

onde lcb é o centro de carena em % do comprimento na linha da água medido a partir do centro da embarcação, e os coeficientes c_{13} e c_{12} são dependentes da forma, comprimento na linha da água e do calado da embarcação.

O fator $1 + k_1$ é multiplicado pela resistência de placa plana, R_f , a qual é obtida pela equação 5.3. O coeficiente de placa plana (C_f) é exibido na equação 5.4.

$$R_f = \frac{1}{2} * 1025 * V^2 * S * C_f \quad (5.3)$$

$$C_f = \frac{0,075}{(\log(Re)-2)^2} \quad (5.4)$$

Outro componente de relevância ao cálculo da resistência ao avanço é a resistência de onda. Através deste método, a resistência de onda pode calculada de três maneiras, de acordo com a faixa de *Froude* (F_r): $F_r < 0,40$; $F_r > 0,55$ e $0,4 < F_r < 0,55$. O número de *Froude* para 13,8 nós é de 0,241 e, dessa forma, a resistência de onda para este número é dada pela equação 5.5:

$$R_w = c_1 * c_2 * c_5 * 9,81 * deslocamento * \exp(m_1 * (F_r^{-0,9}) + m_2 * \cos(\lambda * (F_r^{-2})) \quad (5.5)$$

onde c_1 , c_2 , c_5 , m_1 , m_2 e λ são coeficientes calculados através do calado, boca, comprimento na linha da água e dos coeficientes de forma do navio.

Prosseguindo, obtém-se a resistência de apêndices, a qual é estimada através da equação 5.6.

$$R_{app} = \frac{1}{2} * 1025 * V^2 * S_{app} * C_f * (1 + k_2) + R_{thrusters} \quad (5.6)$$

Onde:

- $1+k_2$ é o fator forma equivalente dos apêndices obtida através de tabela;
- $R_{thrusters}$ é a resistência total dos 3 *thrusters* laterais da embarcação (veja a equação 5.7);
- S_{app} é a área total dos apêndices.

$$R_{thrusters} = 3 * 1025 * (V^2) * \pi * ((d_{thruster} + 0,1)^2) * C_{bto} \quad (5.7)$$

Onde:

- A parcela $d_{thruster} + 0,1$ representa o diâmetro do túnel do propulsor lateral;
- O coeficiente C_{bto} varia de 0,003 até 0,012. Considerando que os *thrusters* laterais sejam projetados para provocar pouco arrasto, adota-se um valor de 0,004.

As resistências da área molhada do espelho de popa, do bulbo e de correlação são representadas nas equações 5.8, 5.9 e 5.10 respectivamente.

$$R_{tr} = 0,5 * 1025 * (V^2) * A_t * c_6 \quad (5.8)$$

$$R_b = 0,11 * \exp(-3 * (Pb^2)) * (F_{ri}^3) * (Abt^3) * 1025 * 9,81 / (1 + (F_{ri}^2)) \quad (5.9)$$

$$R_a = 0,5 * 1025 * (V^2) * S * C_a \quad (5.10)$$

Onde:

- O coeficiente c_6 depende da velocidade, A_t , B e C_{wp} ;
- P_b é calculado através de A_{bt} , calado à vante (o qual é o mesmo que o calado a ré) e h_b ;
- F_{ri} é o número de *Froude* modificado;
- C_a é o coeficiente de correlação, que é calculado através de L , pelo coeficiente de bloco (C_b) e por algumas dimensões do navio.

Os resultados de resistência ao avanço e suas parcelas são representados na tabela 5.2.

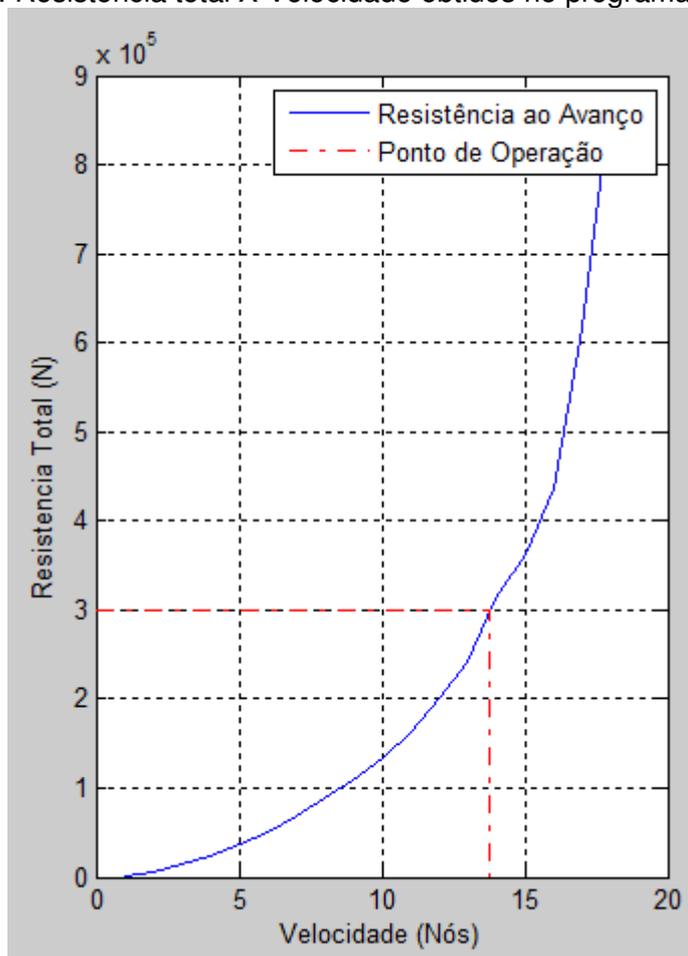
Tabela 5.2. Resultados da resistência ao avanço na velocidade de serviço (13,8 nós).

Resistência Total	298,72	kN
Resistência de Casco Nu	214,50	kN
Resistência Viscosa	150,12	kN
Resistência de Onda	64,38	kN
Resistência do Bulbo	3,57	kN
Resistência de Correlação	36,89	kN
Resistência do Espelho de Popa	23,95	kN
Resistência de Apêndices	19,81	kN

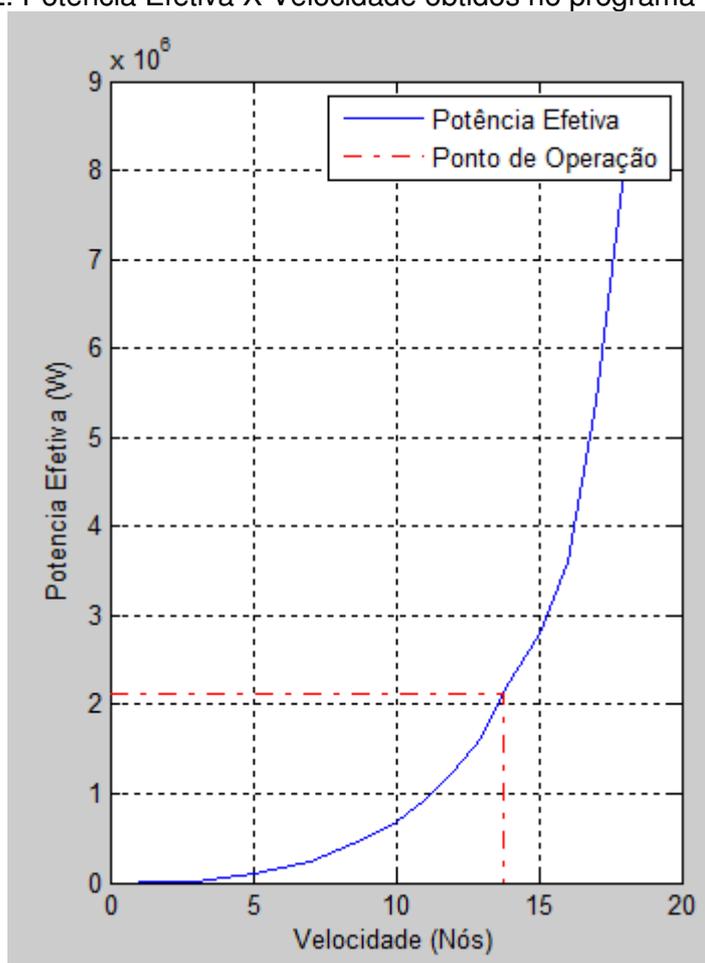
Fonte: Autor

O comportamento da resistência ao avanço e da potência efetiva da embarcação em função da velocidade são ilustradas nas figuras 5.1 e 5.2 respectivamente.

Figura 5.1. Resistência total X Velocidade obtidos no programa *MATLAB*®.



Fonte: Autor

Figura 5.2. Potência Efetiva X Velocidade obtidos no programa *MATLAB*®.

Fonte: Autor

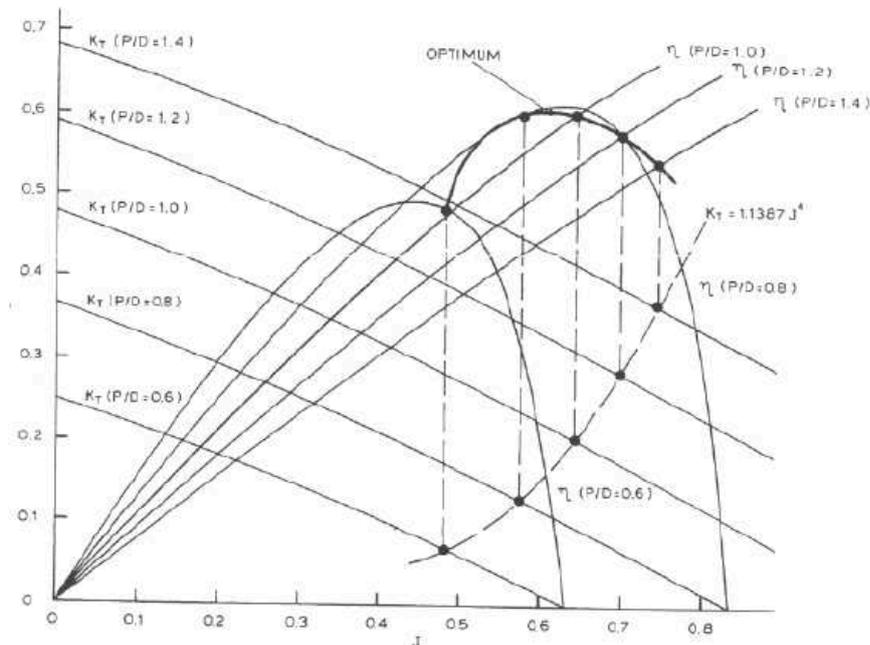
6 DIMENSIONAMENTO DO HÉLICE

Após a estimativa da resistência ao avanço, projeta-se o elemento propulsor (nesse caso, hélice de passo variável) mais adequado para a embarcação. Na tentativa de encontrar o propulsor ótimo deve-se utilizar alguma família de hélices. Segundo Molland (2011, p. 385), as séries para propulsores de passo fixo podem ser usadas para o dimensionamento de hélices de passo variável admitindo uma perda de eficiência de 2 a 3%, caso seja considerado um aumento de 40% na razão diâmetro do cubo/diâmetro do hélice. Para realizar os cálculos de dimensionamento do hélice foi criado um código em *MATLAB®*, utilizando os polinômios da série de hélices de *Wageningen* (CARLTON, 2007, p. 16).

Este código procura o coeficiente de avanço, J , ótimo através da equação do coeficiente de empuxo, Eq. (6.1), e assim busca-se o ponto de eficiência máxima. Note que a Eq. (6.1) é obtida através das Eqs. (3.4) e (3.6). A dedução de empuxo (t), a fração de esteira (w) e o diâmetro (D) são os dados de entrada e é estabelecida uma relação entre K_t e J através da Eq. (6.1). Ao ser encontrado o coeficiente de avanço que proporciona a maior eficiência propulsiva através do método da bissecção, o código armazena as características do hélice para aquele ponto (e.g. passo/diâmetro, eficiência em águas abertas, K_t etc.). A figura 6.1 ilustra um exemplo para encontrar o J ótimo.

$$K_t = \frac{T*J^2}{\rho*D^2*V_a^2} \quad (6.1)$$

Figura 6.1. Curva traçada no diagrama de águas livres para encontrar o J ótimo.



Fonte: TRINDADE, 2012

As equações 6.2 e 6.3 foram usadas para obter a dedução de empuxo (t) e a fração de esteira (w) (HOLTROP e MENNEN, 1982, p. 3). Em seguida, estas são usadas para obter T e V_a para cada hélice através do código que procura o propulsor ótimo (veja as equações 6.4 e 6.5).

$$t = 0.325 * C_b - 0.1885 * (D / ((B * T)^{0.5})) \quad (6.2)$$

$$w = 0.3095 * C_b + 10 * C_v * C_b - 0.23 * (D / ((B * T)^{0.5})) \quad (6.3)$$

$$T = \frac{R_t}{2 * (1 - t)} \quad (6.4)$$

$$V_a = (1 - w) * V \quad (6.5)$$

Os resultados obtidos para a dedução de empuxo para cada hélice, fração de esteira, empuxo e velocidade de avanço são apresentados na tabela 6.1.

Tabela 6.1. Resultados de t , w , T e V_a .

Diâmetro (m)	t	w	T (kN)	V_a (m/s)
2,8	0,1978	0,196	186,19	5,71
3,15	0,191	0,1885	184,62	5,76
3,5	0,1851	0,1814	183,29	5,81
3,85	0,1793	0,1743	181,99	5,86
4,2	0,1735	0,1672	180,71	5,91

Fonte: Autor.

Com T e V_a encaminhados, o cálculo consecutivo é a estimativa do diâmetro. A estimativa do diâmetro pode ser baseada em uma porcentagem do calado. Verificando *layouts* e imagens de *PSVs*, esta porcentagem varia em torno de 40% a 60% do calado da embarcação. Então, os diâmetros teste usados nos cálculos assumem os valores de 2,80; 3,15; 3,50; 3,86 e 4,20; pois estes estão dentro da faixa usual de diâmetro do propulsor de um *PSV*.

Determinados os diâmetros teste, a etapa seguinte é estimar as demais eficiências para encontrar a eficiência global do sistema propulsivo. Assim, a eficiência rotativa relativa, de casco e propulsiva são representadas nas equações 6.6 até 6.8 respectivamente.

$$\eta_r = 0,9737 + 0,111 * (C_p - 0,0225 * lcb) - 0,06325 * P/D \quad (6.6);$$

$$\eta_h = \frac{1-t}{1-w} \quad (6.7);$$

$$\eta_D = \eta_r * \eta_h * \eta_o \quad (6.8).$$

onde η_o é a eficiência em águas abertas e P é o passo do hélice.

Os resultados das eficiências máximas e os principais parâmetros (conforme as tabelas 6.2 até 6.6) são para 4 pás. Número que representa um hélice mais fácil de ser balanceado, reduzindo níveis de vibração devido o balanceamento.

Tabela 6.2. Resultados ótimos para o diâmetro de 2,8 metros.

BAR	0,650
K_t	0,149
K_q	0,017
P/D	0,720
η_D	0,630
Rotação (rpm)	267,086

Fonte: Autor.

Tabela 6.3. Resultados ótimos para o diâmetro de 3,15 metros.

BAR	0,700
K_t	0,144
K_q	0,018
P/D	0,760
η_D	0,666
Rotação (rpm)	213,778

Fonte: Autor.

Tabela 6.4. Resultados ótimos para o diâmetro de 3,5 metros.

BAR	0,700
K_t	0,140
K_q	0,018
P/D	0,800
η_D	0,696
Rotação (rpm)	175,204

Fonte: Autor.

Tabela 6.5. Resultados ótimos para o diâmetro de 3,85 metros.

BAR	0,750
K_t	0,135
K_q	0,018
P/D	0,840
η_D	0,720
Rotação (rpm)	147,039

Fonte: Autor.

Tabela 6.6. Resultados ótimos para o diâmetro de 4,2 metros.

BAR	0,750
K_t	0,130
K_q	0,019
P/D	0,880
η_D	0,741
Rotação (rpm)	125,216

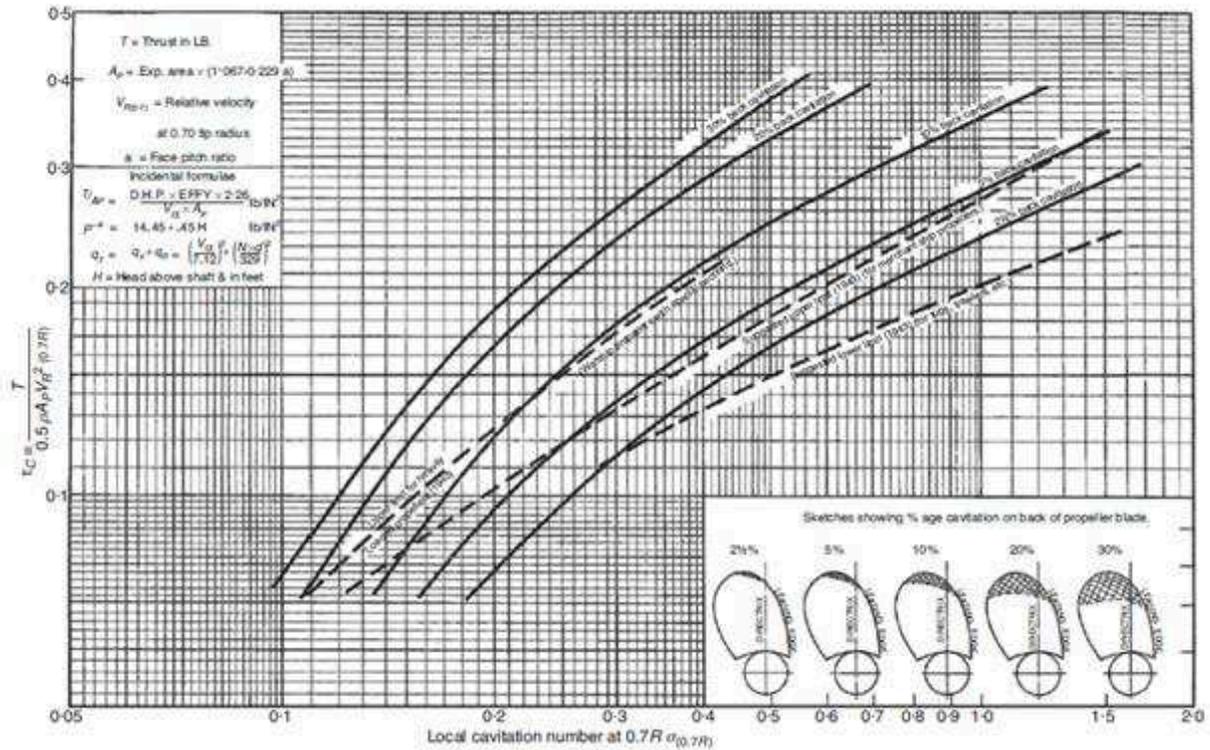
Fonte: Autor.

A eficiência propulsiva, η_D , se comportou de maneira esperada, pois a eficiência é função do diâmetro do hélice, D . Com o aumento de D , observa-se um aumento em η_D de 63,0% até 74,1%. Todavia, devem ser verificados quais valores de razão de área obedecem ao critério de cavitação.

O critério de cavitação utilizado foi calculado através da linha do diagrama de Burrill (conforme a figura 6.2) para embarcações com hélices carregados como rebocadores e *trawlers*. Estes últimos apresentam propulsores com características semelhantes aos de um *PSV*. A equação 6.9 representa a linha para rebocadores, *trawlers* e embarcações semelhantes (MOLLAND *et al.*, 2011, p. 282 - 284).

$$\tau = 0.21 * (\sigma - 0.04)^{0.46} \quad (6.9)$$

onde τ é o coeficiente de *Burrill*; número adimensional contemplando razão entre empuxo e a força associada à pressão dinâmica.

Figura 6.2. Diagrama de *Burrill* com linha selecionada em vermelho.

Fonte: MOLLAND *et al.*, 2011.

A equação 6.9 representa apenas uma linha de referência. Se o ponto de operação está acima desta linha, o critério de cavitação não é obedecido. Caso contrário, o ponto de operação atende ao critério de cavitação imposto. As tabelas 6.7 até 6.11 ilustram os resultados ótimos para o critério de cavitação de cada diâmetro. O critério é imposto através da equação 6.10 (ponto de operação) e 6.9 (linha de referência).

$$\tau = \frac{T}{0.5 \cdot \rho \cdot A_p \cdot (V_a^2 + (0.7 \cdot \pi \cdot n \cdot D)^2)} \quad (6.10)$$

Na equação 6.10, n é a velocidade de rotação (rps) e A_p é a área projetada do hélice obtida através da equação 6.11 (MOLLAND *et al.*, 2011, p. 282).

$$A_p = BAR \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot (1,067 - 0,229 \cdot \frac{P}{D}) \quad (6.11)$$

Tabela 6.7. Resultados do critério de cavitação para o diâmetro de 2.8 metros.

BAR	Critério de Cavitação
0,3	Não Passou
0,35	Não Passou
0,4	Não Passou
0,45	Não Passou
0,5	Não Passou
0,55	Não Passou
0,6	Não Passou
0,65	Passou
0,7	Passou
0,75	Passou
0,8	Passou
0,85	Passou
0,9	Passou
0,95	Passou
1	Passou
1,05	Passou

Fonte: Autor.

Tabela 6.8. Resultados do critério de cavitação para o diâmetro de 3.15 metros.

BAR	Critério de Cavitação
0,3	Não Passou
0,35	Não Passou
0,4	Não Passou
0,45	Não Passou
0,5	Não Passou
0,55	Não Passou
0,6	Passou
0,65	Passou
0,7	Passou
0,75	Passou
0,8	Passou
0,85	Passou
0,9	Passou
0,95	Passou
1	Passou
1,05	Passou

Fonte: Autor.

Tabela 6.9. Resultados do critério de cavitação para o diâmetro de 3.5 metros.

BAR	Critério de Cavitação
0,3	Não Passou
0,35	Não Passou
0,4	Não Passou
0,45	Não Passou
0,5	Não Passou
0,55	Passou
0,6	Passou
0,65	Passou
0,7	Passou
0,75	Passou
0,8	Passou
0,85	Passou
0,9	Passou
0,95	Passou
1	Passou
1,05	Passou

Fonte: Autor.

Tabela 6.10. Resultados do critério de cavitação para o diâmetro de 3.85 metros.

BAR	Critério de Cavitação
0,3	Não Passou
0,35	Não Passou
0,4	Não Passou
0,45	Não Passou
0,5	Passou
0,55	Passou
0,6	Passou
0,65	Passou
0,7	Passou
0,75	Passou
0,8	Passou
0,85	Passou
0,9	Passou
0,95	Passou
1	Passou
1,05	Passou

Fonte: Autor.

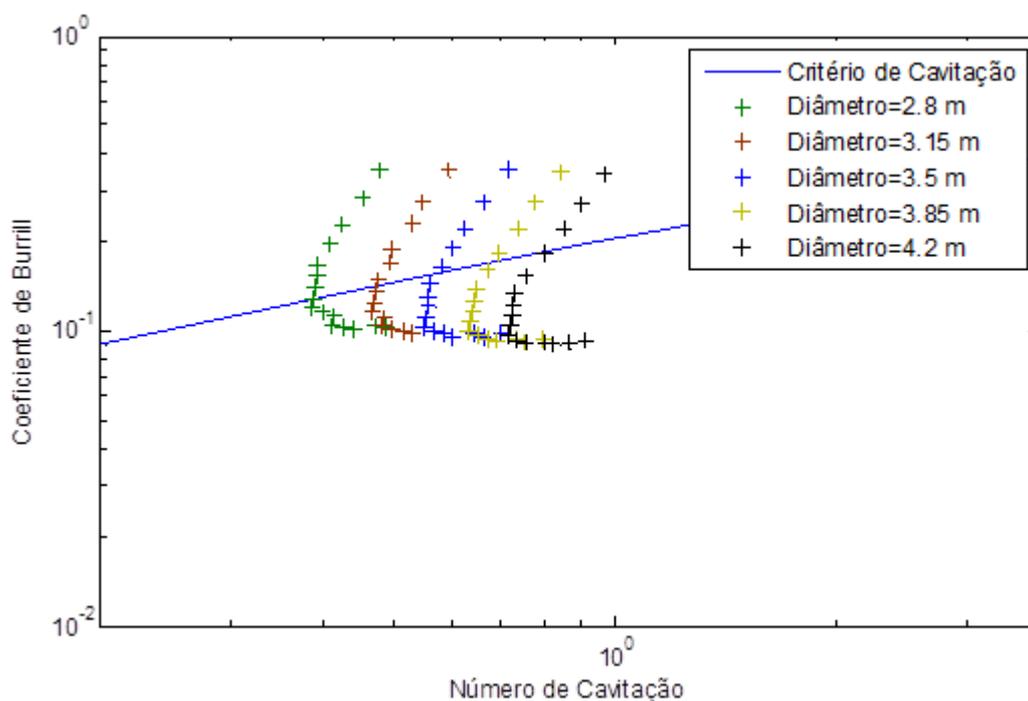
Tabela 6.11. Resultados do critério de cavitação para o diâmetro de 4.2 metros.

BAR	Critério de Cavitação
0,3	Não Passou
0,35	Não Passou
0,4	Não Passou
0,45	Passou
0,5	Passou
0,55	Passou
0,6	Passou
0,65	Passou
0,7	Passou
0,75	Passou
0,8	Passou
0,85	Passou
0,9	Passou
0,95	Passou
1	Passou
1,05	Passou

Fonte: Autor.

A visualização do diagrama de Burrill para os resultados das tabelas 6.7 até 6.11 estão representados na figura 6.3.

Figura 6.3. Resultados do critério de cavitação no diagrama de Burrill.



Fonte: Autor.

Nenhum dos resultados ótimos anteriormente obtidos foram reprovados no critério de cavitação, exibidos nas tabelas 6.7 a 6.11. Desta maneira o diâmetro selecionado para o hélice foi de 3.5 metros. Este valor de diâmetro oferece uma boa eficiência (69.6 %) e sua dimensão é adequada: entre 40% a 60% do comprimento do calado, ou seja, este valor permite uma ótima flexibilidade de arranjos de maquinário. A tabela 6.12 ilustra as características principais do hélice na sua condição nominal, ou seja, na condição de rotação ótima encontrada para velocidade de serviço da embarcação. Foi admitida uma perda de eficiência propulsiva de 2% devido ao maior tamanho do cubo do hélice de passo variável se comparado ao propulsor de passo fixo.

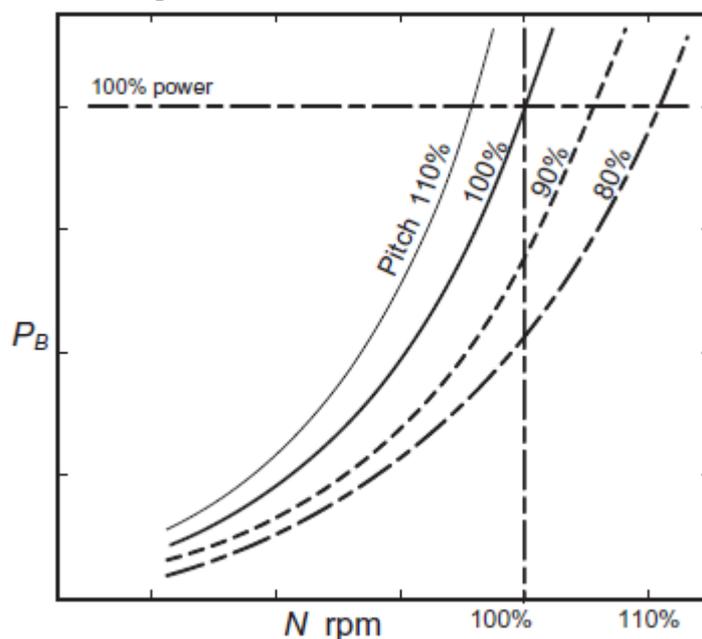
Tabela 6.12. Características nominais do hélice selecionado.

BAR	0,700
K_t	0,140
K_q	0,018
P/D	0,800
η_D	0,676
Rotação (rpm)	175,204

Fonte: Autor.

A tabela 6.12 exhibe a característica do hélice para a razão P/D de projeto. Segundo Molland (2011, p. 301), a figura 6.4 é uma forma de visualizar o comportamento do propulsor de passo variável usando a potência do motor principal e a rotação do hélice (figura 6.4 é apresentada como P_B – Potência de *brake* e N respectivamente).

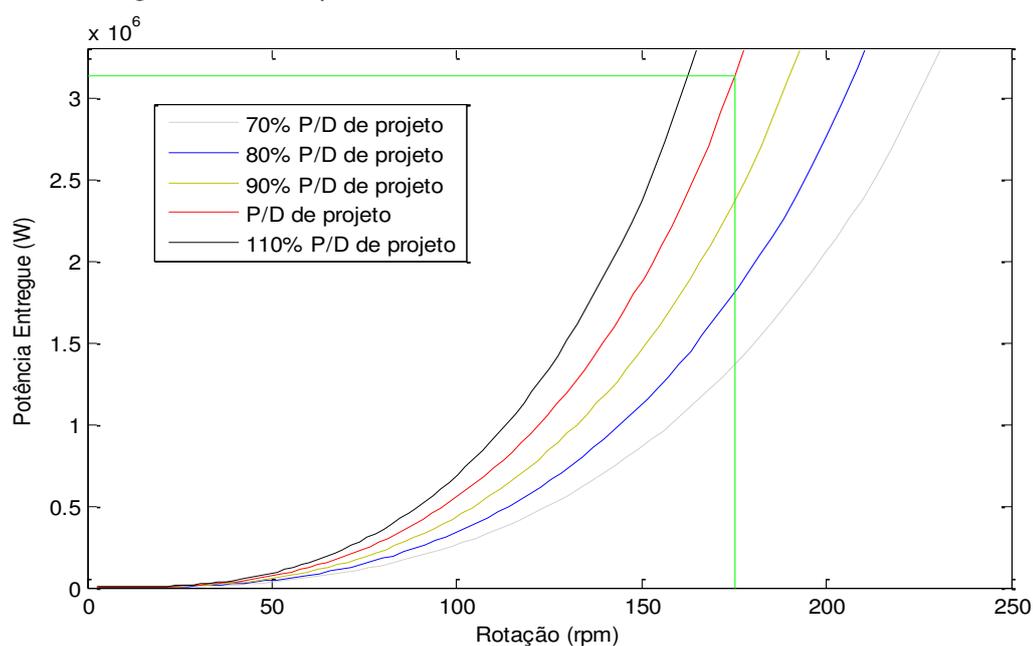
Figura 6.4. Características do Hélice.



Fonte: MOLLAND *et al.*, 2011.

Variando a rotação, obtém-se a potência entregue para cada razão P/D , e dessa forma é possível visualizar de forma análoga o comportamento característico do hélice selecionado, pois em fases mais avançadas de projeto é necessário saber o desempenho do propulsor de passo variável em função do passo (P). A figura 6.5 ilustra esse comportamento, destacando-se a intersecção das linhas em verde o ponto de projeto.

Figura 6.5. Comportamento característico do hélice selecionado.



Fonte: Autor.

7 DIMENSIONAMENTO DOS MOTORES-GERADORES PRINCIPAIS, CAIXAS REDUTORAS E MOTORES ELÉTRICOS

Neste capítulo será apresentado o processo de dimensionamento de motores-geradores principais, caixas redutoras e motores elétricos nos quais compõem esta instalação propulsora.

O dimensionamento da motorização total é efetuado através da estimativa da potência instalada, calculada através da equação 7.1.

$$P_I = \frac{P_E}{\eta_D} * \frac{1}{\eta_t} * \frac{1,30}{0,85} \quad (7.1)$$

Onde:

- η_t é a eficiência de transmissão. Foi admitido igual a 85.8% devido à presença de caixa de redução e dos equipamentos eletrônicos (MOLLAND *et al.*, 2011, p. 4). Os valores de perda dos geradores, painel, transformador, conversor de frequência e motor elétrico são em torno de: 3%; 0,2%; 1%; 1,5% e 4%, respectivamente (MAN, 2011, p. 4);
- O valor 1,30 se refere a 30% de margens de mar. Tal valor é típico de embarcações do tipo *PSV* devido às possíveis condições adversas de operação (MATHEDI, 2010, p. 13-21);
- O valor 0,85 se refere a 85% da taxa máxima contínua. Valor selecionado para os motores principais operarem em condições nominais de operação.

Os resultados de potência efetiva, potência entregue e potência instalada são apresentados na tabela 7.1.

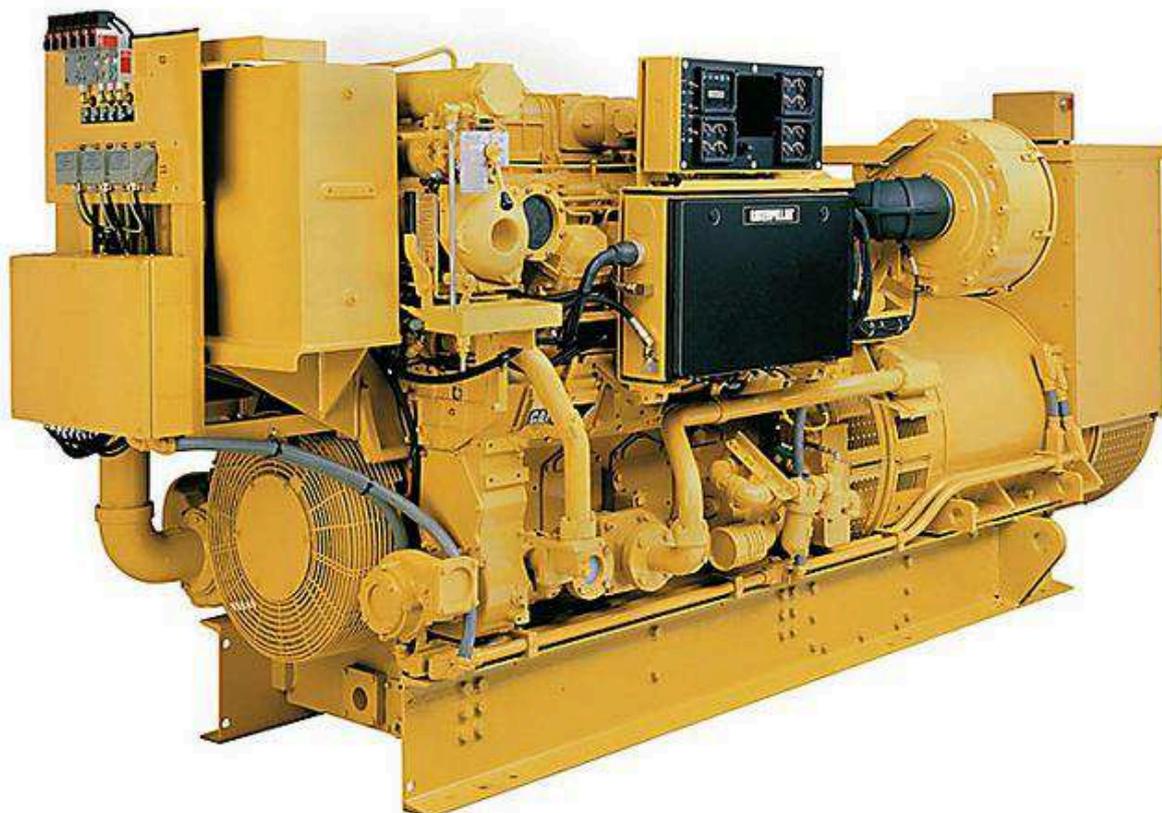
Tabela 7.1. Potências estimadas.

	kW	HP
P_E	2120,5	2843,7
P_D	3137,1	4205,3
P_I	5593	7497,3

Fonte: Autor.

A potência instalada total assumiu o valor de 5593 kW, enquanto a potência total dos motores-geradores Diesel assumiu o valor de 5413,2 kW. O projeto da instalação propulsora para esta embarcação possui 4 motores-geradores (1353.3 kW para cada motor-gerador). O motor comercial que procede com os valores encontrados para cada motor-gerador é o 3512B da empresa *Caterpillar*. A figura 7.1 ilustra o equipamento selecionado.

Figura 7.1. Motor-gerador selecionado.



Fonte: Disponível em <http://www.cat.com>, acessado em outubro de 2014.

As principais características do motor gerador selecionado são:

- Faixa de potência: 880-1360 kW;
- Faixa de rotação: 1000-1800 rpm;
- Motor ciclo diesel 4 tempos com 12 pistões;
- Comprimento: 4.536 metros;
- Altura: 2.053 metros;
- Largura: 1.703 metros.

Depois de efetuado o processo de estimativa da potência de cada motor-gerador principal e seleção dos mesmos, a etapa consecutiva foi selecionar um

motor elétrico que se adequa as especificações estabelecidas. Para a faixa de potência máxima, em torno de 1360 kW para cada unidade motor-gerador, pode-se admitir uma eficiência total de 93.3% nos demais equipamentos eletrônicos (MAN, 2011, p. 4). Utilizando-se dois motores elétricos, cada um deve ter uma potência de 2537.8 kW. O motor elétrico selecionado que atende aos critérios impostos é o J560 LC4 da empresa *Norwegian Electric Systems*. Este motor possui uma potência entregue máxima de 2700 kW e rotação máxima de 1496 rpm. A figura 7.2 ilustra o motor elétrico selecionado.

Figura 7.2. Motor elétrico selecionado.



Fonte: Disponível em <http://www.norwegianelectric.com>, acessado em outubro de 2014.

Seguindo a metodologia de projeto, a etapa consecutiva é selecionar a caixa de transmissão. Para calcular os parâmetros da caixa de redução foi usado o coeficiente de torque (K_t), rotação de projeto (n), potência entregue (P_D), rotação máxima dos motores elétricos e a potência máxima dos motores elétricos. Então, a caixa de redução deve atender:

- Razão de transmissão maior que 10,16:1;
- Torque máximo de saída maior que 83,31 kN*m;

- Torque máximo de entrada maior que 17,23 kN*m;
- Rotação máxima de saída maior que 250 rpm (aproximadamente 142% da rotação de projeto);
- Rotação máxima de entrada maior que 1496 rpm.

A caixa de redução AGHC-S da empresa *Rolls-Royce* atende as especificações estabelecidas. A figura 7.3 ilustra a caixa de redução selecionada junto a um sistema de passo variável.

Figura 7.3. Caixa de redução selecionada em azul.

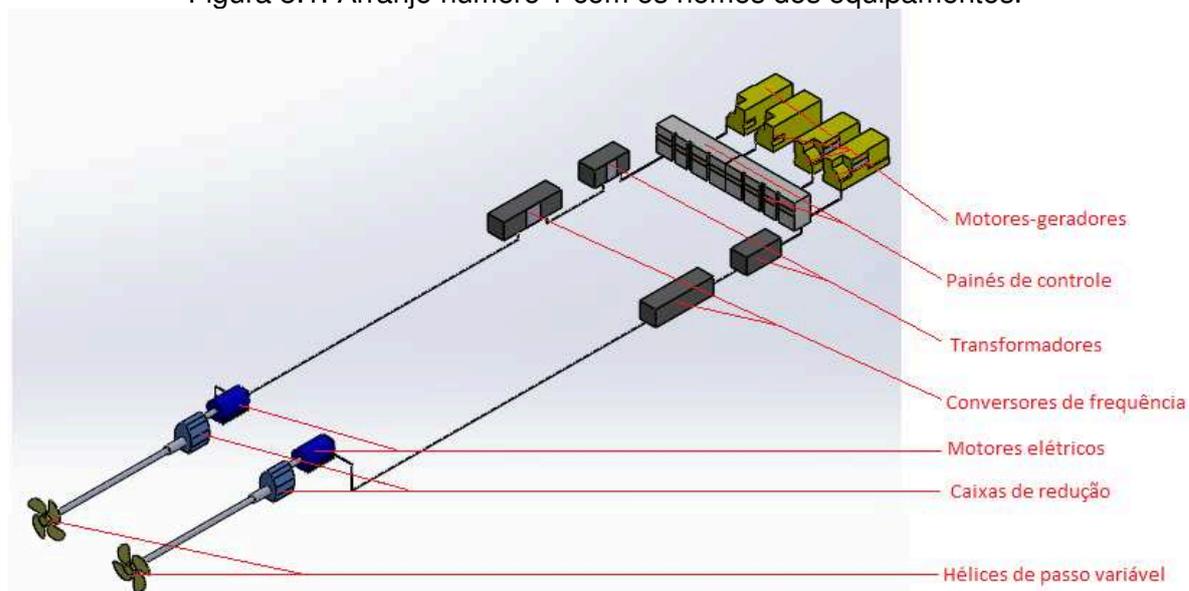


Fonte: Disponível em <http://www.directindustry.com>, acessado em outubro de 2014.

8 ARRANJO PRELIMINAR DA INSTALAÇÃO PROPULSORA

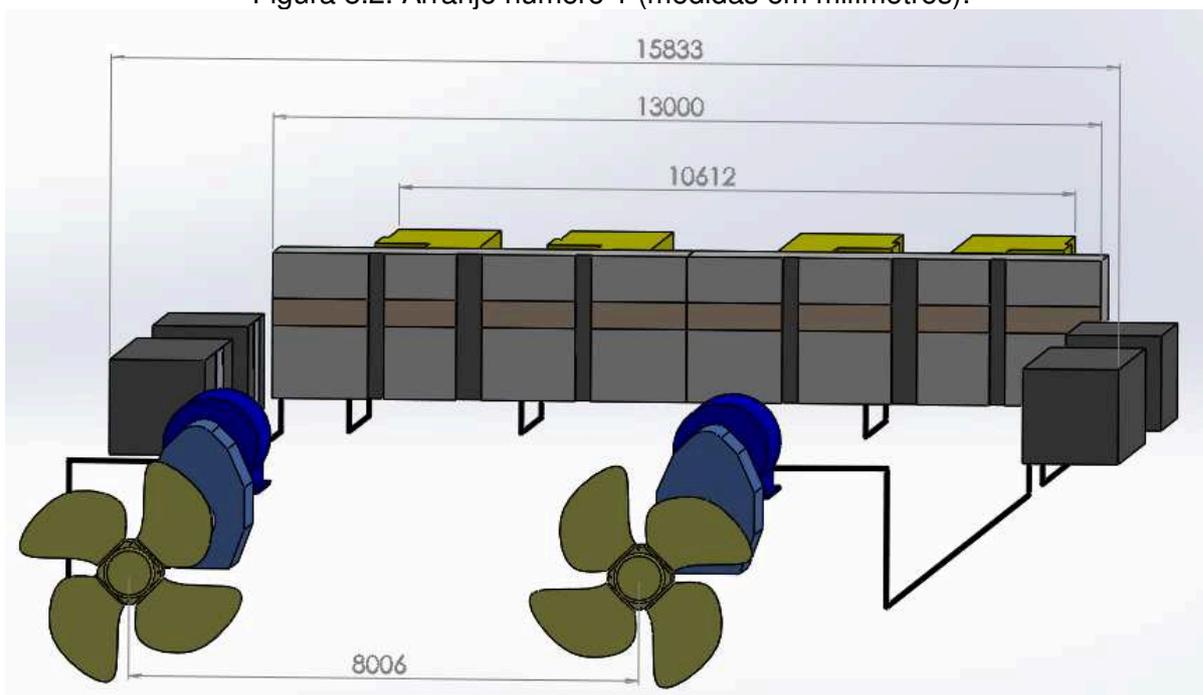
Dando sequência ao projeto, a etapa seguinte é efetuar o dimensionamento do arranjo da instalação propulsora. O dimensionamento não possui uma regra definida por norma ou equações que podem ser úteis para o dimensionamento da mesma. Dessa forma, o arranjo da instalação propulsora deste projeto foi baseado em arranjos de instalações propulsoras de *PSVs* com os comprimentos da linha d'água variando entre 58 e 86 metros. Através destes arranjos foram desenhadas duas configurações de arranjo propulsivo preliminar. As figuras 8.1 até 8.4 ilustram o arranjo preliminar de número 1 da instalação propulsora feita através do programa *SolidWorks®*.

Figura 8.1. Arranjo número 1 com os nomes dos equipamentos.



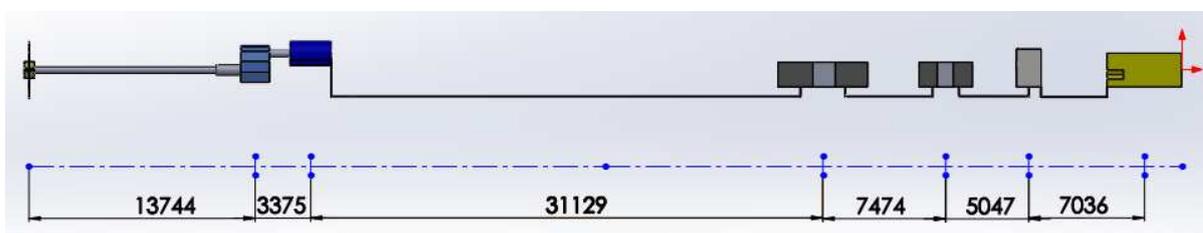
Fonte: Autor.

Figura 8.2. Arranjo número 1 (medidas em milímetros).



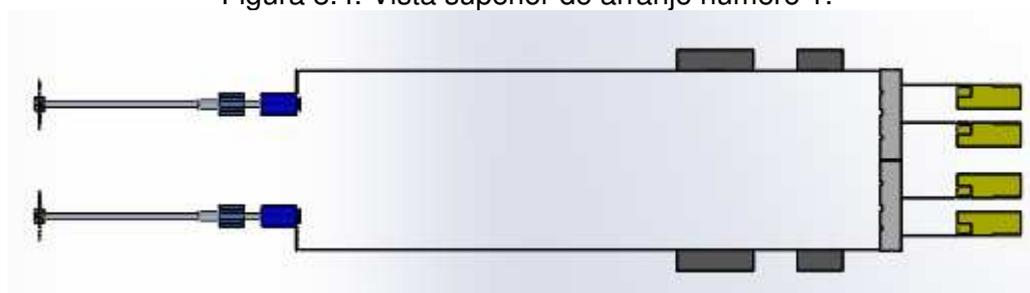
Fonte: Autor.

Figura 8.3. Vista de perfil do arranjo número 1 (medidas em milímetros).



Fonte: Autor.

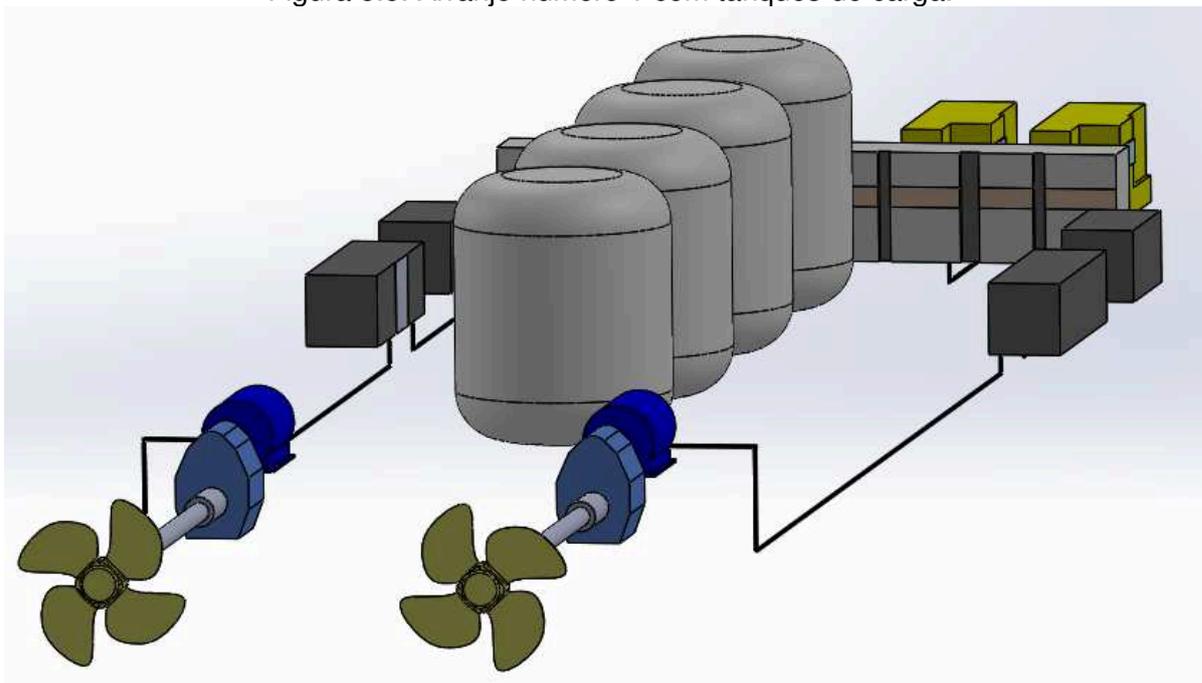
Figura 8.4. Vista superior do arranjo número 1.



Fonte: Autor.

A figura 8.5 ilustra a visualização de acomodação de tanques para transporte de carga em granel supondo que os tanques tenham diâmetro de 4,5 metros e altura de 6,5 metros.

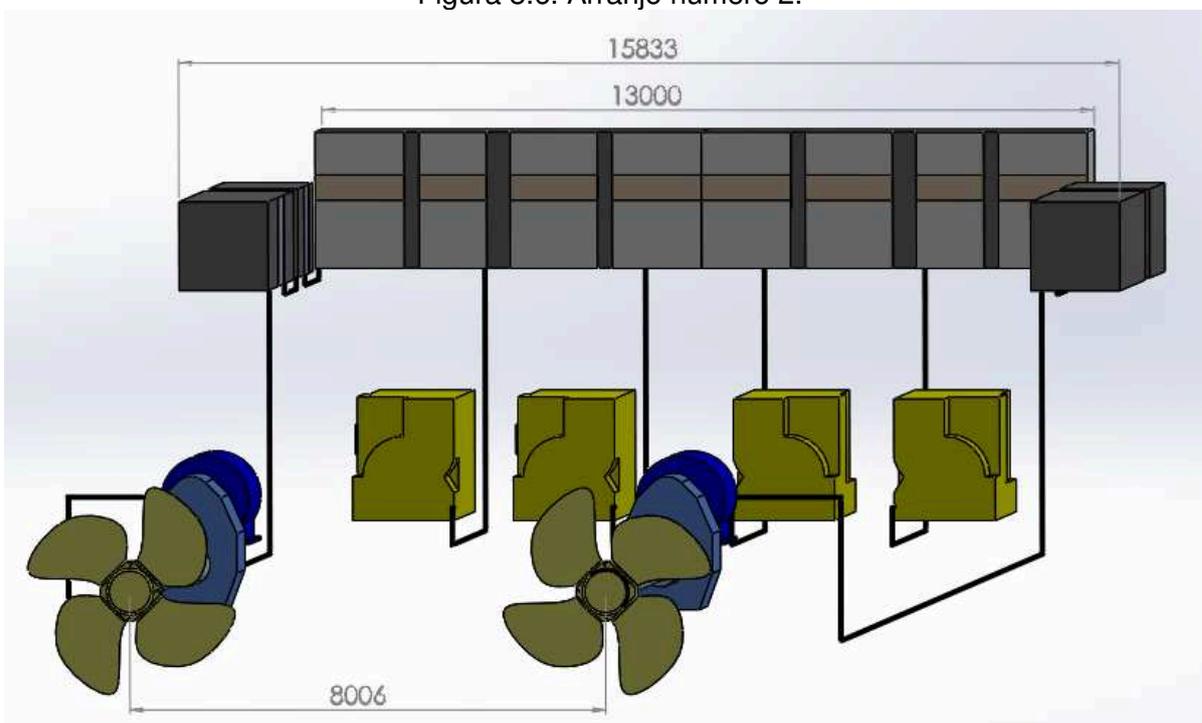
Figura 8.5. Arranjo número 1 com tanques de carga.



Fonte: Autor.

Já as figuras 8.6 até 8.8 ilustram o arranjo propulsivo número 2, no qual os transformadores, conversores de frequência e o painel de controle se encontram um deck acima do piso dos motores.

Figura 8.6. Arranjo número 2.



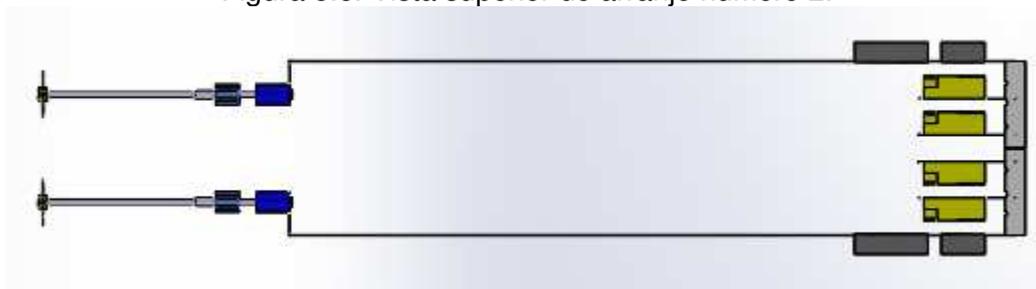
Fonte: Autor.

Figura 8.7 Vista de perfil do arranjo número 2 (medidas em milímetros).



Fonte: Autor.

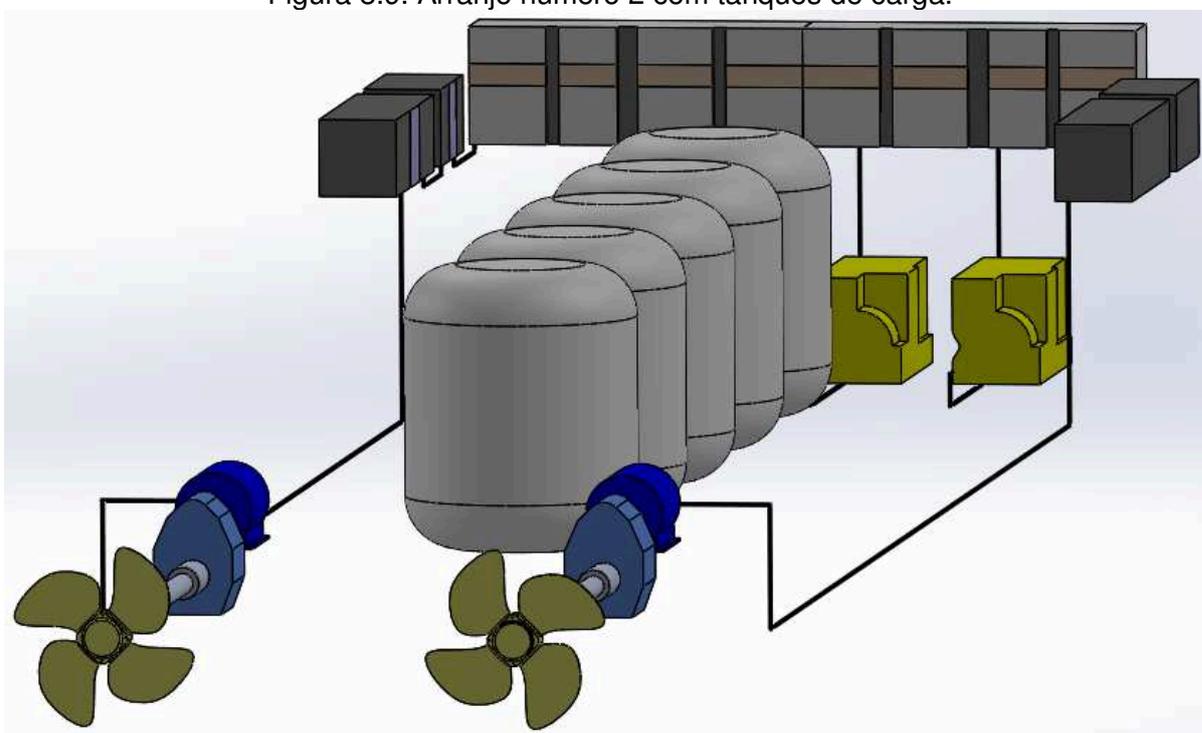
Figura 8.8. Vista superior do arranjo número 2.



Fonte: Autor.

De forma análoga a figura 8.5, a figura 8.9 ilustra a visualização de acomodação de tanques de carga.

Figura 8.9. Arranjo número 2 com tanques de carga.



Fonte: Autor.

Como pode-se ver na figura 8.9, as dimensões do arranjo número 2 em relação ao arranjo número 1 se adequam melhor para o projeto de sistema propulsivo. Posicionando os equipamentos desta maneira, a embarcação pode acomodar mais um tanque, fornecer mais espaço para a instalação de outros sistemas e espaço adequado para a mobilidade da tripulação.

9 OBSERVAÇÕES FINAIS

A demanda por embarcações de apoio *offshore* vem aumentando desde os anos 2000 devido à expansão da área petrolífera e, mais recentemente, com a questão de suporte à exploração do pré-sal. Esse suporte é principalmente garantido por embarcações do tipo *PSV*, sendo o Brasil um dos maiores fabricantes. Esta embarcação opera em situações variadas e o seu sistema de propulsão deve ser adequadamente dimensionado para esse propósito.

Um projeto de instalação propulsora apresenta vários processos iterativos. Neste trabalho, o tempo de processamento foi otimizado em função dos códigos criados. As estimativas apresentadas nos algoritmos foram suficientemente precisas para executar o dimensionamento dos componentes nas etapas finais. Os métodos usados nos algoritmos desenvolvidos para este projeto de instalação propulsora se apresentaram eficientes, pois mais de 500 tipos de hélices foram verificados. Os polinômios de *Wageningen* usados nos códigos apresentaram diagramas idênticos aos publicados em 1981 para o Reynolds do hélice igual a 2×10^6 .

Os resultados obtidos se apresentaram dentro da ordem de grandeza esperada. Como exemplo, cita-se que a potência da instalação propulsora principal para embarcações do tipo *PSV*, entre 80 e 90 metros de comprimento da linha da água, se encontram na faixa de 6000 a 9000 HP. A potência instalação propulsora principal neste projeto foi de 7500 HP.

O arranjo preliminar possui uma característica importante em instalações propulsoras: o posicionamento dos equipamentos elétricos. Posicionando alguns componentes elétricos em um deck acima dos motores principais, o espaço obtido no deck da praça de máquinas pode ser usado para outras funções, o que é usual em arranjos de *PSVs*. E, não só os painéis, conversores de frequência e transformadores dos motores-geradores principais precisam permanecer na mesma sala, mas outros sistemas eletrônicos da embarcação podem ser posicionadas ali, tendo intuito de ter boa parte dos componentes elétricos no mesmo local a fim de otimizar o espaço da embarcação.

Os algoritmos criados podem ser usados por alunos de graduação em engenharia naval. Até mesmo a otimização dos algoritmos podem ser realizadas,

tais como: utilizar mais se uma série de regressão para a estimativa de resistência ao avanço ou mais de uma família de hélices possa ser usada para encontrar as características do propulsor ótimo. Este trabalho também pode ser fonte de inspiração para projetos acadêmicos de instalações propulsoras mais detalhadas, com análises de custos e centro de pesos envolvidos, ou até em dimensionamento de propulsores laterais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEAM. **Frota de Embarcações de Apoio Marítimo em Operação no Brasil**, 2014. <<http://www.abeam.org.br/>>. Acesso em: 7 Jun. 2014, às 20h00.

BATISTA, Bruni César Destro. **ANÁLISE DAS OPERAÇÕES COM EMBARCAÇÕES DE APOIO OFFSHORE NA BACIA DE CAMPOS – RJ**, 2005. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Oceânica, Ufrj, Rio de Janeiro, 2005.

Conexão Marítima. **Demanda por barcos de apoio a plataformas deve movimentar quase US\$ 3 bilhões até 2020**, 2014. <<http://www.conexaomaritima.com.br/> >. Acesso em: 7 Jun. 2014, às 18h00.

CALLISTER JUNIOR, Willian D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: S.a, 2002.

CARLTON, John S. **Marine propellers and propulsion**. 1. ed. Burlington: Elsevier, 2007.

COSTA, Ricardo Cunha da; PIRES, Victor Hugo; LIMA, Guilherme Penin Santos de. **Mercado De Embarcações De Apoio Marítimo Às Plataformas De Petróleo: Oportunidades E Desafios**, 2008. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br>>. Acesso em: 03 jun. 2014, às 18h00.

JESUS, Claudiana Guedes de; GITAHY, Leda Maria Caira. **Transformações na indústria de construção naval brasileira e seus impactos no mercado de trabalho (1997-2007)**, 2007. Disponível em: <<http://www.apdr.pt> >. Acesso em: 22 abr. 2014.

MAN. **Basic Principles of Ship Propulsion**, 2010. Disponível em: <<http://www.mandieselturbo.com>>. Acesso em: 20 mai. 2014, às 18h00.

MAN. **Diesel-Electric Drives**, 2011. Disponível em: <<http://www.mandieselturbo.com>>. Acesso em: 20 out. 2014, às 18h15.

MATHEDI, Josué Octávio Plácido. **Embarcações de Apoio à Exploração de Petróleo e Gás**. São Paulo: Agbook, 2010.

MARQUES, Felipe. **Posicionamento Dinâmico**. Disponível em: <<http://portalmaritimo.com/2011/03/16/posicionamento-dinamico/>>. Acesso em: 03 jun. 2014.

MOLLAND, Anthony F; TURNOCK, Stephen R; HUDSON, Dominic. **Ship resistance and propulsion practical estimation of propulsive power**. New York: Cambridge University Press, 2011.

MOLLAND, Anthony F. **Maritime Engineering Reference Book**. New York: Elsevier, 2008.

TRINDADE, Jorge. **Hidrodinâmica e Propulsão**. Lisboa: ENIDH, 2013.

RAO, Singiresu. **Vibrações Mecânicas**. São Paulo: Person, 2009.

RUAS, José Augusto Gaspar. *et al.* **Relatório de acompanhamento setorial - indústria naval.**, 2009. Disponível em: <<http://www.abdi.com.br> >. Acesso em: 28 abr. 2014, às 21h00.

RUGGERI, Felipe; DINIZ, Giovani; SAMPAIO, Claudio Mueller Prado. **Projeto racional de propulsores por métodos numéricos.**, 2011. Disponível em: <<http://www.ipen.org.br> >. Acesso em: 09 abr. 2014, às 18h15.

SILVA, Osvaldo Pinheiro de Souza E. **Modelo numérico simplificado para análise da vibração excessiva no casco, superestrutura e praça de máquinas de navio**. 2011. Monografia (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://objdig.ufrj.br>>. Acesso em: 22 abr. 2014, às 20h00.

VALLE, Gilberto Dória do. **Avaliação das instalações de máquinas em navios visando redução do uso de combustível fóssil**, 2011. Monografia (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo. São Paulo.

WINNES, Hulda. **Air pollution from ships - emission measurements and impact assessments**. 2010. Monografia (Doutorado em Filosofia) - CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Gothenburg. Disponível em: <<http://www.lighthouse.nu> >. Acesso em: 23 abr. 2014, às 17h30.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 – ALGORITMO PARA ESTIMAR A RESISTÊNCIA AO AVANÇO

```

fprintf ('Método de Regressão Holtrop e Mennen 1982 + livro Molland \n');

L = 88.392;
Lpp = 88.392;
Tf = 7.01;
Ta = 7.01;
B = 18.29;
lcb = ((-Lpp/2)+47.521)/Lpp);
Vnos = 13.8;
volume = 8280.4*1.025;
V=Vnos*0.5144 ;
T = (Ta + Tf)/2 ;
Cb = volume/(L*B*T);
Cm = 0.992; %
Cwp = 0.842; %
Cp = 0.743; %
At = 10.731;
d_thruster = 2.0; % diâmetro do thruster
Lr = L*(1-Cp+(0.06*Cp*lcb)/(4*Cp-1));
cstern = 0 ;%digite -10 para proa em formato V, 0 para proa normal e 10
para proa em U = ');
% coeficiente 13 -----
c13 = 1 + 0.003*cstern ;
% código abaixo encontra c12 -----
if (T/L > 0.05)
    c12 = (T/L)^0.2228446 ;
end

if (T/L <= 0.05 && T/L >= 0.02)
    c12 = (48.20*(T/L - 0.02)^2.078) + 0.479948 ;
end

if (T/L < 0.02)
    c12 = 0.479948 ;
end
% -----
k1 = -1 + c13*(0.93 + c12*((B/Lr)^0.92497)*((0.95-Cp)^-0.521448)*((1-
Cp+0.0225*lcb)^0.6906)) ;
% existência de bulbo -----
Existe_bulbo = 1; % sim=1 não=0
if (Existe_bulbo == 0)
    Abt = 0;
    hb = 0;
end
if (Existe_bulbo == 1)
    Abt = 30.139;
    hb = 2.46;
end
%-----
% se area molhada é conhecida ou não -----
Sconhecido = 0; % se area molhada é conhecida? sim = 1, não = 0
if (Sconhecido == 0)
    S = 2621.01773;
end
if (Sconhecido == 1)

```

```

    S = L*(2*T+B)*(Cm^0.5)*(0.453+(0.453*Cb)-0.2862*Cm-
0.003467*(B/T)+0.3696*Cwp)+2.38*(Abt/Cb);
end
% reinolds -----
Re = (V*L)/(1.14*(10^-6));
% ITTC -----
Cf = 0.075 / ((log10(Re) - 2)^2);
% Froude -----
Fr = V/((9.81*L)^0.5) ;
% coeficiente c7 -----
if (B/L < 0.11)
    c7 = 0.229577*((B/L)^0.33333) ;
end
if (B/L > 0.11 || B/L < 0.25)
    c7 = B/L;
end
if (B/L > 0.25)
    c7 = 0.5 - 0.0625*(L/B);
end
% ângulo de entrada ie -----
calcular_ie = 0;
if (calcular_ie==0) % se ie não é conhecido
    ie = 1 + 89*exp(-((L/B)^0.80856)*((1-Cwp)^0.30484)*((1-Cp-
0.0225*lcb)^0.6367)*((Lr/B)^0.34574)*((100*volume/(L^3)))^0.16302);
end
if (calcular_ie==1) % se ie é conhecido
    ie = input ('digite o valor de ie =');
end
% coeficiente c1 -----
c1 = 2223105*(c7^3.78613)*((T/B)^1.07961)*((90-ie)^-1.37565);

% coeficiente c3 -----
c3 = 0.56*(Abt^1.5)/(B*T*(0.31*(Abt^0.5)+Tf-hb));

% coeficiente c2 -----
c2 = exp(-1.89*(c3^0.5));

% coeficiente c5 -----
c5 = 1 - 0.8*At/(B*T*Cm);

% coeficiente c15 -----
if ((L^3)/volume)<512)
    c15 = -1.69385 ;
end
if ((L^3)/volume>1727.91)
    c15 = 0.0 ;
end
if ((L^3)/volume<1727.29 && (L^3)/volume>512)
    c15 = -1.69385 + ((L/(volume^(1/3)))-8.0)/2.36;
end
d=-0.9;
% coeficiente c16 -----
if (Cp<=0.80)
    c16 = 8.0781*Cp - 13.8673*(Cp^2)+6.984388*(Cp^3);
end
if (Cp>0.80)
    c16 = 1.73014-0.7067*Cp;
end
% coeficiente lambda -----
if (L/B<12)
    lambda = 1.446*Cp - 0.03*(L/B) ;

```

```

end
if (L/B>12)
    lambda = 1.446*Cp - 0.36 ;
end
% coeficiente m1 -----
Fr = V/((9.81*L)^0.5) ;
m1 = 0.0140407*(L/T)-1.75254*((volume^(1/3))/L)-4.79323*(B/L)-c16;
% coeficiente m2 -----
m2 = c15 * (Cp^2)*exp(-0.1*(Fr^-2));
% coeficiente Pb-----
Pb = 0.56 * (Abt^0.5)/(Tf-1.5*hb);
% coeficiente Fni -----
Fri = V/sqrt(9.81*(Tf-hb-0.25*(Abt^0.5))+0.15*(V^2));
% resistência do bulbo -----
Rb = 0.11 * exp (-3*(Pb^-2))*(Fri^3)*(Abt^1.5)*1025*9.81/(1+(Fri^2));
% coeficiente Fnt -----
Fnt = V/((2*9.81*At/(B+B*Cwp))^0.5);
% coeficiente c6 -----
if (Fnt < 5)
    c6 = 0.2*(1-0.2*Fnt);
end
if (Fnt >= 5)
    c6 = 0;
end
Rtr = 0.5*1025*(V^2)*At*c6;
% coeficiente c4 -----
if (Tf/L<=0.04)
    c4 = Tf/L;
end
if (Tf/L>=0.04)
    c4 = 0.04;
end
%coeficiente m4 -----
m4 = c15*0.4*exp(-0.034*(Fr^-3.29));
% coeficiente Ca -----
Ca = 0.006*((L+100)^-0.16)-0.00205+0.003*((L/7.5)^0.5)*(Cb^4)*c2*(0.04-c4)
% resistência de correlação -----
Ra = 0.5 *1025*(V^2)*S*Ca
% resistencia ITTC -----
Re = (V*L)/(1.14*(10^-6));
Cf = 0.075 / ((log10(Re) - 2)^2);
Rf = 0.5*1025*(V^2)*Cf*S;
% coeficiente c17 -----
c17 = 6919.3*(Cm^1.3346)*((volume/(L^3))^2.00977)*((L/B)-2)^1.40692);
% coeficiente m3 -----
m3 = -7.2035*((B/L)^0.326869)*((T/B)^0.605375);
% 1+k2 equivalente para apendices -----
area_aprox_leme = (0.5*T)*(0.5*T*(2/3)); % area aproximada para um leme
area_aprox_pe_de_galinha = 2*(0.5*1.3*T)*1; % area aproximada de um pé de
galinha
area_aprox_propulsor= 2*(3.1415*((0.5*T)^2))/4; % area molhada aproximada
para um hélice
Sapp =
(2*area_aprox_pe_de_galinha+2*area_aprox_leme+2*area_aprox_propulsor);
um_mais_k2 = ((2.8*2*area_aprox_leme +
4*3*area_aprox_pe_de_galinha+2.8*2*area_aprox_propulsor))/Sapp; %1+k
equivalente
% Resistencia dos thrusters;
Cbto = 0.004;
R_thruster = 3*1025*(V^2)*3.1415*((d_thruster+0.1)^2)*Cbto; % 3 thrusters
% Resistencia de apendices-----

```

```

Rapp = 0.5*1025*(V^2)*Sapp*um_mais_k2*Cf+R_thruster;
% resistência de onda Fr < 0.40-----
Rw40 = c1 * c2 * c5 * 1025*9.81*volume*exp(m1*(Fr^d)+m2*cos(lambda*(Fr^-
2)));
% resistência de onda Fr > 0.55 -----
Rw55 = c17*c2*c5*volume*1025*9.81*exp((m3*Fr^d)+m4*cos(lambda*Fr^-2));
% resistência de onda Fr < 0.55 ou Fr >0.4-----
Rw4055 = Rw40 + ((10*Fr-4)*(Rw55 - Rw40)/1.5);
% resistencia total -----
if (Fr<0.40)
    Rw = Rw40;
end
if (Fr>0.55)
    Rw = Rw55;
end
if (Fr>=0.40 && Fr<=0.55)
    Rw = Rw4055;
end
Rt = Rf*(1+k1)+Rapp+Rw+Rb+Ra+Rtr ;

Resistencia_total = Rt
Resistencia_casco_nu = Rf*(1+k1)+Rw
Resistencia_onda = Rw
Resistencia_Viscosa = Rf*(1+k1)
Resistencia_bulbo = Rb
Resistencia_correlacao = Ra
Resistencia_transon=Rtr
Resistencia_apendices=Rapp
parcela_casco_Ra_Rt=Ra/Rt
Um_mais_k1=1+k1
Potencia_efetiva = Rt * V
% os três vetores abaixo são usados para marcar o ponto de resistencia e de
% potencia efetiva nos gráficos
marcacao_potencia_efetiva=[Potencia_efetiva Potencia_efetiva 0
Potencia_efetiva];
marcacao_resistencia_total=[Resistencia_total Resistencia_total 0
Resistencia_total];
marcacao_velocidade=[0 Vnos Vnos Vnos];
% calculo dos parâmetros do hélice -----
% fator dedução de esteira -----artigo molland
D=4.20; %diâmetro suposto
if (B/Ta<=5)
    c8 = B*S/(L*D*Ta);
end
if (B/Ta>5)
    c8=S*(7*B/Ta - 25)/(L*D*(B/Ta - 3));
end
if (c8<=28)
    c9=c8;
end
if (c8>28)
    c9=32 - (16/(c8-24));
end
if (Ta/D<=2)
    c11=Ta/D;
end
if (Ta/D>2)
    c11=0.0833333*((Ta/D)^3)+1.33333;
end
Cv = (1+k1)*Cf + Ca; % coeficiente de resistência viscosa
Cp1=1.45*Cp-0.315-0.0225*lcb;

```

```

w=0.3095*Cb+10*Cv*Cb-0.23*(D/((B*T)^0.5)) % dedução de esteira para dois
hélices
% dedução de empuxo -----
if (L/B>=5.2)
    c10 = B/L;
end
if (L/B<5.2)
    c10=0.25-0.003328402/((B/L)-0.134615385);
end
t=0.325*Cb-0.1885*(D/((B*T)^0.5))% dedução de empuxo para dois hélices
Z=4; % número de pás
patm = 101300; % pressão atm N/m²
h=D/2;% localização aproximada do centro do propulsor
H = T-h; % distância entre a superfície da água e o extremo do propulsor
po = patm + 1025*9.81*H;
pv = 1646; % (N/m²) pressão de vapor da água a 15 graus
T_empuxo=Rt/(1-t)
% velocidade de avanço Va -----
Va=V*(1-w)
% criação dos vetores para Plotar os gráficos -----
ponto = 0;
% alocando espaço para os vetores -----
Resistencia_avanco=1:length(Vnos+5);
Velocidade=1:length(Vnos+5);
Resistencia_fri = 1:length(Vnos+5);
Resistencia_on = 1:length(Vnos+5);
Pot_efe=1:length(Vnos+5);
% o for abaixo armazena as informações nos vetores -----
for i=1:(Vnos+5)
    Vnos = i;
    V=Vnos*0.5144;
    Lr = L*(1-Cp+(0.06*Cp*lcb)/(4*Cp-1));
    cstern = 0;
    % coeficiente 13 -----
    c13 = 1 + 0.003*cstern ;
    % código abaixo encontra c12 -----
    if (T/L > 0.05)
        c12 = (T/L)^0.2228446 ;
    end

    if (T/L <= 0.05 && T/L >= 0.02)
        c12 = (48.20*(T/L - 0.02)^2.078) + 0.479948 ;
    end

    if (T/L < 0.02)
        c12 = 0.479948 ;
    end
end
% -----
k1 = -1 + c13*(0.93 + c12*((B/Lr)^0.92497)*((0.95-Cp)^-0.521448)*((1-
Cp+0.0225*lcb)^0.6906)) ;
% existência de bulbo -----
Existe_bulbo = 0;
if (Existe_bulbo == 1)
    Abt = input ('área transversal do bulbo= ');
    hb = input ('Digite o valor do centro da area do bulbo acima da quilha
= '); % centro de área trans. do bulbo
end
if (Existe_bulbo == 0)
    Abt = 30.139;
    hb = 2.46;
end
end

```

```

%-----
% se area molhada é conhecida ou não -----
Sconhecido = 0; %input ('se area molhada é conhecida? sim = 1, não = 0 :
');
if (Sconhecido == 0)
    S = 2621.01773;
end
if (Sconhecido == 1)
    S = L*(2*T+B)*(Cm^0.5)*(0.453+(0.453*Cb)-0.2862*Cm-
0.003467*(B/T)+0.3696*Cwp)+2.38*(Abt/Cb);
end
% reinolds -----
Re = (V*L)/(1.14*(10^-6));
% ITTC -----
Cf = 0.075 / ((log10(Re) - 2)^2);
% resistência de apendices -----
Rapp = 0;
% Froude -----
Fr = V/((9.81*L)^0.5) ;
% coeficiente c7 -----
if (B/L < 0.11)
    c7 = 0.229577*((B/L)^0.33333) ;
end
if (B/L > 0.11 || B/L < 0.25)
    c7 = B/L;
end
if (B/L > 0.25)
    c7 = 0.5 - 0.0625*(L/B);
end
% ângulo de entrada ie -----
calcular_ie = 0;
if (calcular_ie==0)
    ie = 1 + 89*exp(-((L/B)^0.80856)*((1-Cwp)^0.30484)*((1-Cp-
0.0225*lcb)^0.6367)*((Lr/B)^0.34574)*((100*volume/(L^3)))^0.16302);
end
if (calcular_ie==1)
    ie = input ('digite o valor de ie =');
end
% coeficiente c1 -----
c1 = 2223105*(c7^3.78613)*((T/B)^1.07961)*((90-ie)^-1.37565);

% coeficiente c3 -----
c3 = 0.56*(Abt^1.5)/(B*T*(0.31*(Abt^0.5)+Tf-hb));

% coeficiente c2 -----
c2 = exp(-1.89*(c3^0.5));

% coeficiente c5 -----
c5 = 1 - 0.8*At/(B*T*Cm);

% coeficiente c15 -----
if ((L^3)/volume)<512)
    c15 = -1.69385 ;
end
if ((L^3)/volume>1727.91)
    c15 = 0.0 ;
end
if ((L^3)/volume<1727.29 && (L^3)/volume>512)
    c15 = -1.69385 + ((L/(volume^(1/3)))-8.0)/2.36;
end
d=-0.9;

```

```

% coeficiente c16 -----
if (Cp<=0.80)
    c16 = 8.0781*Cp - 13.8673*(Cp^2)+6.984388*(Cp^3);
end
if (Cp>0.80)
    c16 = 1.73014-0.7067*Cp;
end
% coeficiente lambda -----
if (L/B<12)
    lambda = 1.446*Cp - 0.03*(L/B) ;
end
if (L/B>12)
    lambda = 1.446*Cp - 0.36 ;
end
% coeficiente m1 -----
Fr = V/((9.81*L)^0.5) ;
m1 = 0.0140407*(L/T)-1.75254*((volume^(1/3))/L)-4.79323*(B/L)-c16;
% coeficiente m2 -----
m2 = c15 * (Cp^2)*exp(-0.1*(Fr^-2));
% coeficiente Pb-----
Pb = 0.56 * (Abt^0.5)/(Tf-1.5*hb);
% coeficiente Fni -----
Fri = V/sqrt(9.81*(Tf-hb-0.25*(Abt^0.5))+0.15*(V^2));
% resistência do bulbo -----
Rb = 0.11 * exp (-3*(Pb^-2))*(Fri^3)*(Abt^1.5)*1025*9.81/(1+(Fri^2));
% coeficiente Fnt -----
Fnt = V/((2*9.81*At/(B+B*Cwp))^0.5);
% coeficiente c6 -----
if (Fnt < 5)
    c6 = 0.2*(1-0.2*Fnt);
end
if (Fnt >= 5)
    c6 = 0;
end
% coeficiente c4 -----
if (Tf/L<=0.04)
    c4 = Tf/L;
end
if (Tf/L>=0.04)
    c4 = 0.04;
end
%coeficiente m4 -----
m4 = c15*0.4*exp(-0.034*(Fr^-3.29));
% coeficiente Ca -----
Ca = 0.006*((L+100)^-0.16)-0.00205+0.003*((L/7.5)^0.5)*(Cb^4)*c2*(0.04-c4);
% resistência de correlação -----
Ra = 0.5 *1025*(V^2)*S*Ca;
% resistencia ITTC -----
Re = (V*L)/(1.14*(10^-6));
Cf = 0.075 / ((log10(Re) - 2)^2);
Rf = 0.5*1025*(V^2)*Cf*S;
% coeficiente c17 -----
c17 = 6919.3*(Cm^1.3346)*((volume/(L^3))^2.00977)*((L/B)-2)^1.40692);
% coeficiente m3 -----
m3 = -7.2035*((B/L)^0.326869)*((T/B)^0.605375);
if (At>0)
% resistencia devido ao transom -----
Frt = V/((2*9.81*At/(B+B*Cwp))^0.5);
if (Frt < 5)
    c6 = 0.2*(1-0.2*Frt);
end
end

```

```

    if (Frt >= 5)
        c6 =0;
    end
    Rtr = 0.5*1025*(V^2)*At*c6;
end
if (At==0)
    Rtr = 0;
end
% 1+k2 equivalente para apendices -----
area_aprox_leme = (0.5*T)*(0.5*T*(2/3)); % area aproximada para um leme
area_aprox_pe_de_galinha = 2*(0.5*1.3*T)*1; % area aproximada de um pé de
galinha
area_aprox_propulsor= 2*(3.1415*((0.5*T)^2))/4; % area molhada aproximada
para um hélice
Sapp =
(2*area_aprox_pe_de_galinha+2*area_aprox_leme+2*area_aprox_propulsor);
um_mais_k2 = ((2.8*2*area_aprox_leme +
4*3*area_aprox_pe_de_galinha+2.8*2*area_aprox_propulsor))/Sapp; %1+k
equivalente
% Resistencia dos thrusters;
Cbto = 0.004;
R_thruster = 3*1025*(V^2)*3.1415*((d_thruster+0.1)^2)*Cbto; % 3 thrusters
% Resistencia de apendices-----
Rapp = 0.5*1025*(V^2)*Sapp*um_mais_k2*Cf+R_thruster;
% resistência de onda Fr < 0.40-----
Rw40 = c1 * c2 * c5 * 1025*9.81*volume*exp (m1*(Fr^d)+m2*cos(lambda*(Fr^-
2)));
% resistência de onda Fr > 0.55 -----
Rw55 = c17*c2*c5*volume*1025*9.81*exp ((m3*Fr^d)+m4*cos(lambda*Fr^-2));
% resistência de onda Fr < 0.55 ou Fr >0.4-----
Rw4055 = Rw40 + ((10*Fr-4)*(Rw55 - Rw40)/1.5) ;
% resistencia total -----
if (Fr<0.40)
    Rw = Rw40;
end
if (Fr>0.55)
    Rw = Rw55;
end
if (Fr>=0.40 && Fr<=0.55)
    Rw = Rw4055;
end
Rt = Rf*(1+k1)+Rapp+Rw+Rb+Ra+Rtr ;

Resistencia_total = Rt;
Resistencia_onda = Rw;
Resistencia_friccao = Rf;
Potencia_efetiva = Rt * V;
ponto=ponto+1;
Resistencia_avanco(ponto) = Rt;
Resistencia_fri(ponto) = Rf;
Resistencia_on(ponto) = Rw;
Pot_efe(ponto) = Potencia_efetiva;
Velocidade(ponto) = Vnos;

end

% criação dos gráficos -----
subplot(131), plot(Velocidade, Resistencia_avanco, 'b',
marcacao_velocidade, marcacao_resistencia_total, 'r-.')
ylabel('Resistencia Total (N)')
xlabel('Velocidade (Nós)')

```

```

legend('Resistência ao Avanço','Ponto de Operação')
grid
subplot(132), plot(Velocidade, Resistencia_fri, 'b-.', Velocidade,
Resistencia_on, 'r')
ylabel('Resistencia (N)')
xlabel('Velocidade (Nós)')
legend('Resistência de fricção','Resistência de onda')
grid
subplot(133), plot(Velocidade, Pot_efe, 'b',marcacao_velocidade,
marcacao_potencia_efetiva, 'r-.')
ylabel('Potencia Efetiva (W)')
xlabel('Velocidade (Nós)')
legend('Potência Efetiva','Ponto de Operação')
grid

```

APÊNDICE 2 – ALGORITMO PARA ESTIMAR O COEFICIENTE DE EMPUXO

```

function K_t = Estima_Kt(BAR, J, Re, PD, Z)

polynomial_coefficients=[1,0.00880496,0,0,0,0,1,0.00379368,0,0,0,0;
2,-0.20455400,1,0,0,0,2,0.00886523,2,0,0,0;
3,0.16635100,0,1,0,0,3,-0.032241,1,1,0,0;
4,0.15811400,0,2,0,0,4,0.00344778,0,2,0,0;
5,-0.14758100,2,0,1,0,5,-0.0408811,0,1,1,0;
6,-0.48149700,1,1,1,0,6,-0.108009,1,1,1,0;
7,0.41543700,0,2,1,0,7,-0.0885381,2,1,1,0;
8,0.01440430,0,0,0,1,8,0.188561,0,2,1,0;
9,-0.05300540,2,0,0,1,9,-0.00370871,1,0,0,1,;
10,0.01434810,0,1,0,1,10,0.00513696,0,1,0,1;
11,0.06068260,1,1,0,1,11,0.0209449,1,1,0,1;
12,-0.01258940,0,0,1,1,12,0.00474319,2,1,0,1;
13,0.01096890,1,0,1,1,13,-0.00723408,2,0,1,1;
14,-0.13369800,0,3,0,0,14,0.00438388,1,1,1,1;
15,0.00638407,0,6,0,0,15,-0.0269403,0,2,1,1;
16,-0.00132718,2,6,0,0,16,0.0558082,3,0,1,0;
17,0.16849600,3,0,1,0,17,0.0161886,0,3,1,0;
18,-0.05072140,0,0,2,0,18,0.00318086,1,3,1,0;
19,0.08545590,2,0,2,0,19,0.015896,0,0,2,0;
20,-0.05044750,3,0,2,0,20,0.0471729,1,0,2,0;
21,0.01046500,1,6,2,0,21,0.0196283,3,0,2,0;
22,-0.00648272,2,6,2,0,22,-0.0502782,0,1,2,0;
23,-0.00841728,0,3,0,1,23,-0.030055,3,1,2,0;
24,0.01684240,1,3,0,1,24,0.0417122,2,2,2,0;
25,-0.00102296,3,3,0,1,25,-0.0397722,0,3,2,0;
26,-0.03177910,0,3,1,1,26,-0.00350024,0,6,2,0;
27,0.01860400,1,0,2,1,27,-0.0106854,3,0,0,1;
28,-0.00410798,0,2,2,1,28,0.00110903,3,3,0,1;
29,-0.000606848,0,0,0,2,29,-0.000313912,0,6,0,1;
30,-0.004981900,1,0,0,2,30,0.0035985,3,0,1,1;
31,0.002598300,2,0,0,2,31,-0.00142121,0,6,1,1;
32,-0.000560528,3,0,0,2,32,-0.00383637,1,0,2,1;
33,-0.001636520,1,2,0,2,33,0.0126803,0,2,2,1;
34,-0.000328787,1,6,0,2,34,-0.00318278,2,3,2,1;
35,0.000116502,2,6,0,2,35,0.00334268,0,6,2,1;
36,0.000690904,0,0,1,2,36,-0.00183491,1,1,0,2;
37,0.004217490,0,3,1,2,37,0.000112451,3,2,0,2;
38,0.0000565229,3,6,1,2,38,-0.0000297228,3,6,0,2;
39,-0.001465640,0,3,2,2,39,0.000269551,1,0,1,2;
40,0.0003333,0,0,0,0,40,0.00083265,2,0,1,2;
41,0,0,0,0,0,41,0.00155334,0,2,1,2;

```

```

42,0,0,0,0,0,42,0.000302683,0,6,1,2;
43,0,0,0,0,0,43,-0.0001843,0,0,2,2;
44,0,0,0,0,0,44,-0.000425399,0,3,2,2;
45,0,0,0,0,0,45,0.0000869243,3,3,2,2;
46,0,0,0,0,0,46,-0.0004659,0,6,2,2;
47,0,0,0,0,0,47,0.0000554194,1,6,2,2];

% Montando as matrizes para os coeficientes de dedução de empuxo e de torque
Coefficients_Kt=zeros(39, 6);%alocar espaço para a matriz Coefficients_Kt
for i=1:39 %agregando os valores para a matriz Coefficients_Kt
    Coefficients_Kt(i,1:6) = polynomial_coefficients(i, 1:6);
end
Kt=0;
for i=1:39
    Cn= Coefficients_Kt(i,2);
    sn= Coefficients_Kt(i,3);
    tn= Coefficients_Kt(i,4);
    un= Coefficients_Kt(i,5);
    vn= Coefficients_Kt(i,6);
    Kt = Cn*(J^sn)*(PD^tn)*(BAR^un)*(Z^vn)+Kt;
end

P1 = 0.000353485;
P2 = - 0.00333758*BAR*(J^2);
P3 = -0.00478125*BAR*PD*J;
P4 = 0.000257792*((log10(Re)-0.301)^2)*BAR*(J^2);
P5 = 0.0000643192*(log10(Re)-0.301)*(PD^6)*(J^2);
P6 = -0.0000110636*((log10(Re)-0.301)^2)*(PD^6)*(J^2);
P7 = -0.0000276305*((log10(Re)-0.301)^2)*Z*BAR*(J^2);
P8 = 0.0000954*((log10(Re)-0.301))*Z*BAR*PD*J;
P9 = 0.0000032049*((log10(Re)-0.301))*(Z^2)*BAR*(PD^3)*J;

delta_Kt = P1+P2+P3+P4+P5+P6+P7+P8+P9;
K_t = Kt +delta_Kt;

```

APÊNDICE 3 – ALGORITMO PARA ESTIMAR O COEFICIENTE DE TORQUE

```

function K_q = Estima_Kq(BAR, J, Re, PD, Z)

polynomial_coefficients=[1,0.00880496,0,0,0,0,1,0.00379368,0,0,0,0;
2,-0.20455400,1,0,0,0,2,0.00886523,2,0,0,0;
3,0.16635100,0,1,0,0,3,-0.032241,1,1,0,0;
4,0.15811400,0,2,0,0,4,0.00344778,0,2,0,0;
5,-0.14758100,2,0,1,0,5,-0.0408811,0,1,1,0;
6,-0.48149700,1,1,1,0,6,-0.108009,1,1,1,0;
7,0.41543700,0,2,1,0,7,-0.0885381,2,1,1,0;
8,0.01440430,0,0,0,1,8,0.188561,0,2,1,0;
9,-0.05300540,2,0,0,1,9,-0.00370871,1,0,0,1;
10,0.01434810,0,1,0,1,10,0.00513696,0,1,0,1;
11,0.06068260,1,1,0,1,11,0.0209449,1,1,0,1;
12,-0.01258940,0,0,1,1,12,0.00474319,2,1,0,1;
13,0.01096890,1,0,1,1,13,-0.00723408,2,0,1,1;
14,-0.13369800,0,3,0,0,14,0.00438388,1,1,1,1;
15,0.00638407,0,6,0,0,15,-0.0269403,0,2,1,1;
16,-0.00132718,2,6,0,0,16,0.0558082,3,0,1,0;
17,0.16849600,3,0,1,0,17,0.0161886,0,3,1,0;
18,-0.05072140,0,0,2,0,18,0.00318086,1,3,1,0;
19,0.08545590,2,0,2,0,19,0.015896,0,0,2,0;
20,-0.05044750,3,0,2,0,20,0.0471729,1,0,2,0;
21,0.01046500,1,6,2,0,21,0.0196283,3,0,2,0;

```

```

22,-0.00648272,2,6,2,0,22,-0.0502782,0,1,2,0;
23,-0.00841728,0,3,0,1,23,-0.030055,3,1,2,0;
24,0.01684240,1,3,0,1,24,0.0417122,2,2,2,0;
25,-0.00102296,3,3,0,1,25,-0.0397722,0,3,2,0;
26,-0.03177910,0,3,1,1,26,-0.00350024,0,6,2,0;
27,0.01860400,1,0,2,1,27,-0.0106854,3,0,0,1;
28,-0.00410798,0,2,2,1,28,0.00110903,3,3,0,1;
29,-0.000606848,0,0,0,2,29,-0.000313912,0,6,0,1;
30,-0.004981900,1,0,0,2,30,0.0035985,3,0,1,1;
31,0.002598300,2,0,0,2,31,-0.00142121,0,6,1,1;
32,-0.000560528,3,0,0,2,32,-0.00383637,1,0,2,1;
33,-0.001636520,1,2,0,2,33,0.0126803,0,2,2,1;
34,-0.000328787,1,6,0,2,34,-0.00318278,2,3,2,1;
35,0.000116502,2,6,0,2,35,0.00334268,0,6,2,1;
36,0.000690904,0,0,1,2,36,-0.00183491,1,1,0,2;
37,0.004217490,0,3,1,2,37,0.000112451,3,2,0,2;
38,0.0000565229,3,6,1,2,38,-0.0000297228,3,6,0,2;
39,-0.001465640,0,3,2,2,39,0.000269551,1,0,1,2;
40,0.0003333,0,0,0,0,40,0.00083265,2,0,1,2;
41,0,0,0,0,0,41,0.00155334,0,2,1,2;
42,0,0,0,0,0,42,0.000302683,0,6,1,2;
43,0,0,0,0,0,43,-0.0001843,0,0,2,2;
44,0,0,0,0,0,44,-0.000425399,0,3,2,2;
45,0,0,0,0,0,45,0.0000869243,3,3,2,2;
46,0,0,0,0,0,46,-0.0004659,0,6,2,2;
47,0,0,0,0,0,47,0.0000554194,1,6,2,2];

```

```

% Montando as matrizes para os coeficientes de dedução de empuxo e de torque
Coefficients_Kq=zeros(47, 6);%alocar espaço para a matriz Coefficients_Kt
for i=1:47 %agregando os valores para a matriz Coefficients_Kt
    Coefficients_Kq(i,1:6) = polynomial_coefficients(i, 7:12);
end
Kq=0;
for i=1:47
    Cn= Coefficients_Kq(i,2);
    sn= Coefficients_Kq(i,3);
    tn= Coefficients_Kq(i,4);
    un= Coefficients_Kq(i,5);
    vn= Coefficients_Kq(i,6);
    Kq = Cn*(J^sn)*(PD^tn)*(BAR^un)*(Z^vn)+Kq;
end

P1 = -0.000591412;
P2 = 0.00696898*PD;
P3 = -0.0000666654*Z*(PD^6);
P4 = 0.0160818*(BAR^2);
P5 = -0.000938091*(log10(Re)-0.301)*PD;
P6 = -0.00059593*(log10(Re)-0.301)*(PD^2);
P7 = 0.0000782099*((log10(Re)-0.301)^2)*(PD^2);
P8 = 0.0000052199*(log10(Re)-0.301)*Z*BAR*(J^2);
P9 = -0.00000088528*((log10(Re)-0.301)^2)*Z*BAR*PD*J;
P10 = 0.0000230171*(log10(Re)-0.301)*Z*(PD^6);
P11 = -0.00000184341*((log10(Re)-0.301)^2)*Z*(PD^6);
P12 = -0.00400252*(log10(Re)-0.301)*(BAR^2);
P13 = 0.000220915*((log10(Re)-0.301)^2)*(BAR^2);

delta_Kq = P1+P2+P3+P4+P5+P6+P7+P8+P9+P10+P11+P12+P13;

K_q = Kq + delta_Kq;

```

APÊNDICE 4 – ALGORITMO PARA ESTIMAR AS CARACTERÍSTICAS ÓTIMAS DO HÉLICE E AS POTÊNCIAS DE OPERAÇÃO

```

format short g
J= zeros();%aloca espaço para o vetor J
Cp = 0.743; % coeficiente prismático
Lpp = 88.392;
lcb = ((-(Lpp/2)+47.521)/Lpp);
D=4.2; % diametro em metros dado de entrada
t=0.1735;% dedução de empuxo para dois hélices
w=0.1672; % fração de esteira dado de entrada
Vnos=13.8; % dado de entrada
Rt= Estima_Rt(Vnos); %resistência ao avanço em N
V=Vnos*0.5144; % velocidade em m/s
nh = ((1-t)/(1-w)); %eficiencia do casco
T =Rt/(2*(1-t));%cada hélice produz metade do empuxo
p= 1025;%densidade da água salgada a 15 graus celsius
Va = V*(1-w);%velocidade de avanço
Kt_0= zeros();%alocando espaço para Kt
x=zeros();%vetor para plotar gráfico da equação
BAR=0.25;%BAR varia 0.3 até 1.05 dentro do laço FOR
npas=4;%numero de pas
Eficiencia_transmissao=0.903*0.95;%para caixa de redução 5% e 10% de perdas
para sistema elétrico (sem gerador)
margem_mar=1.3; % de margens de mar
mcr=0.85;% mcr
Matriz_eficiencia=zeros();%alocando espaço
Matriz_passo=zeros();%alocando espaço, passo referente a maior eficiência
Matriz_rotacao=zeros();%alocando espaço, rotação referente a maior
eficiência
Matriz_Kt=zeros();%alocando espaço, Kt referente a maior eficiência
Matriz_Kq=zeros();%alocando espaço, Kq referente a maior eficiência
Resultados = zeros(); % inserir todos resultados em uma só matriz para
plotar os gráficos no Excel
% bloco de código abaixo varia BAR e passo para encontrar a maior
eficiencia
rotacao=80; % estimativa inicial para calcular o Re do hélice
for v=1:16
    BAR=BAR+0.05; %variação do BAR
    passo=0.5; % varia de 0.5 até 1.4
    Passo=0; % encontrar o maior P/D
    Eficiencia1=0;%variável para encontrar a maior eficiencia
    VR = sqrt((Va^2)+((0.7*3.1415*rotacao*D)^2));%velocidade relativa
    Rn=(0.520*BAR*D*VR)/(1.14e-6); % aproximação para o Reynolds do HÉLICE
    for u=1:(((1.4-0.5)/0.02)+1)
        Coef_avanco1=Jo(BAR, Rn, passo, npas ,T, D, Va);
        KT=Estima_Kt(BAR, Coef_avanco1, Rn, passo, npas);
        KQ=Estima_Kq(BAR, Coef_avanco1, Rn, passo, npas);
        Eficiencia = (KT*Coef_avanco1)/(KQ*2*pi);
        if Eficiencia>Eficiencia1
            Eficiencia1=Eficiencia;
            nr = 0.9737+0.111*(Cp-0.0225*lcb)-0.06325*passo;%eficiencia
rotativa relativa
            Matriz_eficiencia(1,v) = Eficiencia1*nr*nh; % armazena as
maiores eficiências propulsivas (nd) ;
            Matriz_Kt(1,v)=KT;
            Matriz_Kq(1,v)=KQ;
            Passo=passo;
            Matriz_passo(1,v)=Passo; % armazena o passo das maiores
eficiencias

```

```

        Coef_avanco=Coef_avanco1;
        Matriz_rotacao(1,v)= (Va/ (Coef_avanco1*D)) *60;
        rotacao=(Va/ (Coef_avanco1*D)) *60;
        Resultados(1,v)=KT;
        Resultados(2,v)=KQ;
        Resultados(3,v)=Passo;
        Resultados(4,v)=Matriz_eficiencia(1,v);
        Resultados(5,v)=Matriz_rotacao(1,v);
    end
    passo = passo+0.02;
end
end
Eficiencia_maxima=0;
coluna=0; %coluna relativa ao ponto de máxima eficiência
for v=1:16 %encontrar eficiência máxima
    if Matriz_eficiencia(1,v)>Eficiencia_maxima
        Eficiencia_maxima=Matriz_eficiencia(1,v);
        coluna=v;
    end
end
end
% Exibir os resultados
BAR1=0.25;%variar o BAR do bloco FOR abaixo
patm = 101300; % pressão atm N/m²
h=D/2;
Calado=7.01;
H = Calado-h;
po = patm + 1025*9.81*H;
pv = 1646; %(N/m²) pressão de vapor da água a 15 graus
Matriz_sigma=zeros();
Matriz_sigmal=(0.2:(4-0.2)/16:(4-(4-0.2)/16));
Matriz_tau1=zeros();
Matriz_tau=zeros();
fprintf('    BAR        Critério de cavitação  \n')
for i=1:16
    %verificar o critério de cavitação do gráfico e na lógica
    BAR1 = BAR1+0.05;
    AE = BAR1*(3.1415/4)*(D^2);%área expandida (trindade)
    PD=Matriz_passo(1,i);
    Ap = AE*(1.067-0.229*PD);%área projetada
    VR2 = (Va^2)+((0.7*3.1415*(Matriz_rotacao(1,i)/60)*D)^2);%velocidade
    relativa ao quadrado
    Matriz_sigma(1,i)=(po - pv)/(0.5*p*VR2);%vetor para plotar o diagrama
    da cavitação
    Matriz_tau1(1,i)=0.21*((Matriz_sigmal(1,i)-0.04)^0.46);%vetor para
    plotar o diagrama da cavitação
    tau = 0.21*((Matriz_sigma(1,i)-0.04)^0.46);
    Matriz_tau(1,i)=T/(0.5*p*Ap*VR2); %vetor para plotar o diagrama da
    cavitação
    % if para testar se cavita ou não
    if (Matriz_tau(1,i)>=tau)
        Cavita=char('Não passou');
    else
        Cavita=char('Passou');
    end
    fprintf('%4g          %s ',BAR1, Cavita)
    fprintf('\n')
end
fprintf('\n    BAR        P/D        Rotação(rpm)        Kt        Kq\n')
BAR1=0.25;%variar o BAR do bloco FOR abaixo
for i=1:16

```

```

%este bloco gera um print de Kt e Kq das maiores eficiencias
BAR1 = BAR1+0.05;
if (Matriz_tau(1,i)>=tau)
    Cavita=char('Não passou');
else
    Cavita=char('Passou');
end
fprintf(' %8.2f %8.2f %13.3e %13.3e
%13.3e',BAR1,Matriz_passo(1,i),Matriz_rotacao(1,i),Matriz_Kt(1,i),
Matriz_Kq(1,i))
fprintf('\n')

end
j=0;
while j<=Coef_avanco % plota a equação  $((T*rotacao^2)/(p*Va^4))*(j^4)$  até a
raiz.
    i=i+1;
    x(1,i) = j;
    Kt_0(1,i) = (T/(p*(Va^2)*(D^2)))*(j^2);
    j=j+(Coef_avanco/1000);
end
teste2=[Coef_avanco, Coef_avanco];% vetor para criar reta de visualização
do ponto da solução
teste=[0, Estima_Kt(BAR, Coef_avanco, Rn, Passo, npas)]; % vetor para criar
reta de visualização do ponto da solução
resultado_equacao=(T/(p*(Va^2)*(D^2)))*(Coef_avanco^2)
resultado_polinomio=Estima_Kt(BAR, Coef_avanco, Rn, Passo, npas)
passo=Resultados(3,coluna); %passo de eficiência máxima
Eficiencia_propulsiva=(Eficiencia_maxima-0.02) %admitindo 2% de perda de
eficiencia propulsiva
Eficiencia_final=Eficiencia_propulsiva*Eficiencia_transmissao
Potencia_efetiva=(Estima_Rt(Vnos))*(Vnos*0.5144)
Potencia_entregue=Potencia_efetiva/Eficiencia_propulsiva
Potencia_instalada=((Estima_Rt(Vnos)*(Vnos*0.5144))/(Eficiencia_final))*(ma
rgem_mar/mcr)
Potencia_motor_gerador=(Potencia_instalada*Eficiencia_transmissao)/(0.933*0
.95)

```

APÊNDICE 5 – ALGORITMO PARA GERAR O GRÁFICO DA POTÊNCIA ENTREGUE VERSUS ROTAÇÃO PARA DIFERENTES P/D

```

% Este código gera o gráfico Pd X Rotação para P/D entre 80% e 110% do P/D
D=3.5;%d ótimo
t=0.1851; % dedução de empuxo dado de entrada
w=0.1814; % fração de esteira dado de entrada
Passo_otimo=0.8;%dado de entrada
nh = ((1-t)/(1-w)); %eficiencia do casco
Cp=0.743; %
Vnos=13.8;
Lpp = 88.392;
lcb = ((-Lpp/2)+47.521)/Lpp);
npas=4;%numero de pas selecionado
porcentagem=0.7; %para calcular em % do passo ótimo
Matriz_rotacao=zeros(); % alocando espaço para matriz rotação
Pd=zeros();% alocando espaço para matriz da potência entregue (delivered)
BAR=0.7;%BAR ótimo em D=3.5 metros
step=5;
rotacao=14; % estimativa inicial para calcular o Rn
for i=1:5 %varia o passo
    passo=Passo_otimo*(porcentagem); %dado de entrada

```

```

nr = 0.9737+0.111*(Cp-0.0225*lcb)-0.06325*passo;%eficiencia rotativa
relativa
porcentagem=porcentagem+0.1;
for j=1:15*step %varia a velocidade
    Rt= Estima_Rt(j/step); %resistência ao avanço em N
    T =Rt/(2*(1-t));%cada hélice produz metade do empuxo
    Va=0.5144*(j/step)*(1-w);
    VR = sqrt((Va^2)+((0.7*pi*rotacao*D)^2));%velocidade relativa
    Rn=(0.520*BAR*D*VR)/(1.14e-6); % aproximação para o Reynolds do
HÉLICE
    Coef_avanco1=Jo(BAR, Rn, passo, npas ,T, D, Va);
    rotacao=(Va/(Coef_avanco1*D))*60;
    KT=Estima_Kt(BAR, Coef_avanco1, Rn, passo, npas);
    KQ=Estima_Kq(BAR, Coef_avanco1, Rn, passo, npas);
    Eficiencia = (KT*Coef_avanco1)/(KQ*2*pi);
    Matriz_rotacao(i,j)=rotacao;
    Pd(i,j) = (Rt*(j/step)*0.5144)/(nr*nh*Eficiencia-0.02); %menos 2%
devido o cubo ser maior
    if i ==4 && j==13.8*step %este if armazena as informações do ponto
de projeto
        Potencia_entregue=Pd(i,j)
        rot=rotacao;

    end
end
rotacao=rot;
marcacao_potencia_entregue=[Potencia_entregue Potencia_entregue 0
Potencia_entregue];
marcacao_velocidade=[0 rotacao rotacao rotacao];
plot (Matriz_rotacao(1,(1:14*step)), Pd(1,(1:14*step)), 'b-
.',Matriz_rotacao(2,(1:14*step)),
Pd(2,(1:14*step)), 'b',Matriz_rotacao(3,(1:14*step)), Pd(3,(1:14*step)), 'k-
-', Matriz_rotacao(4,(1:14*step)), Pd(4,(1:14*step)),
'r',Matriz_rotacao(5,(1:14*step)), Pd(5,(1:14*step)), 'k',
marcacao_velocidade, marcacao_potencia_entregue, 'g')
legend('70% P/D de projeto','80% P/D de projeto','90% P/D de projeto','P/D
de projeto','110% P/D de projeto')
ylabel('Potência Entregue (W)')
xlabel('Rotação (rpm)')

```