



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

**ESTRATÉGIA DE PROJETO DE UM PROPULSOR PARA TRIMARÃ COM USO
DE ENERGIA SOLAR**

RAÍZA OLIVEIRA PEREIRA DA SILVA

Recife, 2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

Curso de Graduação em Engenharia Naval

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Naval do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, pela aluna Raíza Oliveira Pereira da Silva, sob a orientação do Prof. Dr. Miguel Angel Celis Carbajal, para obtenção do grau de Bacharela em Engenharia Naval.

TERMO DE RESPONSABILIDADE

Por este Termo, eu, abaixo assinado, assumo a inteira responsabilidade de autoria do conteúdo deste Trabalho de Conclusão de Curso, estando ciente das sanções legais previstas referentes ao plágio (art. 3 da Lei 9.610/98 e art. 184 do Código Penal Brasileiro). Portanto, ficam a instituição e o orientador isentos de qualquer ação negligente da minha parte, pela veracidade e originalidade desta obra.

Recife, _____ de 2018.

Raíza Oliveira Pereira da Silva

FOLHA DE APROVAÇÃO

ESTRATÉGIA DE PROJETO DE UM PROPULSOR PARA TRIMARÃ COM USO DE ENERGIA SOLAR

Projeto apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, pela aluna Raíza Oliveira Pereira da Silva, sob orientação do Prof. Dr. Miguel Angel Celis Carbajal, como requisito para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Naval.

Data da Aprovação: ____ / ____ / ____.

Banca Examinadora:

Orientador:

Prof. Dr. Miguel Angel Celis Carbajal, UFPE

Examinador:

Prof. Dr. César Augusto Salhua Moreno, UFPE

Examinadora:

Prof^a. Dr. Paula Suemy Arruda Michima, UFPE

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Luiz Henrique e Edilene, e
a toda minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que participaram da minha formação pessoal e acadêmica. Em especial à minha família, composta pela minha mãe, meu pai, tias, tios, primos e primas. Aos meus pais, Edilene e Luiz Henrique, por proverem minha educação e ensinamentos para a vida, pela paciência e afago em momentos difíceis. À minha avó Maria da Luz, pelo amor e carinho ao longo da vida. À minha tia Ednalda pelo apoio incondicional. Agradeço em especial ao meu orientador prof. Dr. Miguel Angel Celis Carbajal pela direção e instigação. Ao Programa de Formação de Recursos Humanos, PFRH PB204, pela oportunidade de desenvolver pesquisa com o prof. Dr. Armando Hideki Shinohara e com o prof. Dr. César Augusto Salhua Moreno. Agradeço à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, ANP.

RESUMO

A aplicação de energia renovável neste projeto de navio busca implementar os conceitos de sustentabilidade e eficiência energética, amplamente discutidos no meio tecnológico. O presente projeto direciona esforços para o desenvolvimento de um sistema propulsivo ótimo aplicado ao trimarã alimentado com energia solar. Os fundamentos que sustentam este projeto são a forma do navio, a aplicação de painéis fotovoltaicos e o sistema propulsivo. O sistema propulsivo tipo *Pod* (vagem) foi definido realizando a seleção de seus componentes e o projeto do hélice. Apresentam-se análises realizadas sobre o casco trimarã, as quais definem estabilidade estática e estabilidade dinâmica adequadas, além do hélice projetado para atender à demanda requerida de empuxo.

Palavras-chave: trimarã; energia solar; resistência ao avanço; hélice; *Pod*.

ABSTRACT

The application of renewable energy to a ship project aims to implement sustainability and energy efficiency concepts widely discussed in the technological environment. Efforts are focused on the development of an optimized propulsion system applied on a trimaran that relies on solar power. The project basis of the propulsion system is grounded on hull shape generation, fotovoltaic panels application and power system development. The Pod propulsion system was defined through components selection and propeller design. Some analyses are presented taken for the trimaran hull, showing its static and dynamic stability. Further, the propeller is designed to attend the required thrust demand.

Keywords: trimaran; solar energy; streamwise resistance; propeller; Pod.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Configurações dos cascos laterais.....	18
Figura 2: Configurações adotadas para ensaio.	19
Figura 3: Coeficiente de resistência por geração de ondas do casco trimarã sobreposto aos dados numéricos e experimentais do modelo Wigley.....	21
Figura 4: Representação de um sistema propulsivo <i>Pod</i>	28
Figura 5: Diagrama de Velocidades e Forças.....	30
Figura 6: posições avaliadas para o casco trimarã.....	37
Figura 7: Análise de (a) resistência ao avanço e (b) potência requerida para diferentes posições dos cascos laterais.	38
Figura 8: Método Slender Body para o casco trimarã.	39
Figura 9: Curva de (a) resistência ao avanço e (b) potência requerida para trimarã selecionado.	39
Figura 10: Vista isométrica perspectiva com ênfase na popa.....	41
Figura 11: Curvas de áreas do casco trimarã, onde (a) são áreas submersas, e (b) são áreas totais.....	43
Figura 12: Curvas hidrostáticas do trimarã. Com (a) deslocamento, (b) coeficiente C_b , (c) L_{wl} e B_{wl} , (d) área molhada e área de linha de água, (e) LCB e LCF, (f) KM_T e KM_L , e (g) KB apresentados variando o calado de 0,015 m até 0,15 m.	45
Figura 13: Casco trimarã com painel e propulsor.....	48
Figura 14: Curva GZ do casco trimarã.	49
Figura 15: Malha desenvolvida para análise WAMIT.	51
Figura 16: Movimentos do navio nos seis graus de liberdade.....	52
Figura 17: Massa adicional na primeira coluna e amortecimento na segunda coluna para os movimentos de afundamento (a, b), jogo (c, d) e arfagem (e, f).	53
Figura 18: Massa adicional e amortecimento (A55, B55) com efeito da velocidade.....	55
Figura 19: Forças e momento excitante para aproamento de 180° avaliados para o movimento de avanço (a, b), afundamento (c, d), arfagem (e, f). Onde a primeira coluna é o módulo e a segunda é a fase.....	56
Figura 20: Forças e momentos excitantes para aproamento de 90° avaliados para o movimento de deriva (a, b), afundamento (c, d), jogo (e, f) e guinada (g, h). Onde a primeira coluna é o módulo e a segunda é a fase.....	57

Figura 21: RAO dos movimentos, onde a primeira coluna apresenta o módulo, e a segunda a fase. Avaliados com aproamento de 180° para os movimentos de avanço (a, b), afundamento (c, d) e arfagem (e, f).....	59
Figura 22: RAO dos movimentos, onde a primeira coluna apresenta o módulo, e a segunda a fase. Avaliados com aproamento de 90° para os movimentos de deriva (a, b), afundamento (c, d), jogo (e, f) e guinada (g, h).	60
Figura 23: Espectro de onda de JONSWAP.....	62
Figura 24: RAO do ponto avaliado no convés.	63
Figura 25: Espectro de resposta $S_r(we)$	63
Figura 26: Esquema da configuração adotada no projeto.....	66
Figura 27: Painel fotovoltaico com dimensões 1,5x0,668x0,046 m (140W e 12,9 kg).	67
Figura 28: Curvas Corrente x Tensão e rendimento.....	68
Figura 29: Modelo do MPPT e funcionamento.	69
Figura 30: Taxa de descarga da bateria chumbo-acido selada 12V - 5Ah.	70
Figura 31: Representação <i>Pod</i> e componentes. I – Motor; II – Capa frontal; III – Corpo; IV – Célula do Motor; V – Conexão; VI – Mancal; VII – Capa traseira; VIII – Eixo; IX – Vedação; X – Hélice.	71
Figura 32: Fluxograma de definição do propulsor utilizando Séries Sistemáticas.....	73
Figura 33: Cuvas de KT, KQ e eficiências para o propulsor B4.85.	74
Figura 34: Curvas para definição do ponto de operação do hélice para séries sistemáticas. ...	75
Figura 35: Fluxograma do código MATLAB para projeto do hélice.....	76
Figura 36: Curvas dT e dQ para diferentes rotações.	78
Figura 37: Cuvas K_t , K_q e η do hélice projetado e construído.	79
Figura 38: Curvas para definição do ponto de operação do hélice para elemento de pá.....	80
Figura 39: Representação do hélice de 4 pás desenvolvido.	81
Figura 40: Vista frontal e vista expandida da pá do hélice.....	82
Figura 41: Apresentação do hélice durante e após impressão.	83
Figura 42: Hélice após laminação com fibra de carbono.	83
Figura 43: Curvas dos motores avaliadas para as condições energéticas e do hélice por série B e por elemento de pá.	86
Figura 44: Perfil NACA2410, 3° ângulo de ataque.....	103
Figura 45: Curvas características C_l/C_d , C_l/α , C_m/α e C_d/α	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Diferentes eficiências entre os materiais existentes no mercado.....	27
Tabela 2: Características entre modelo e protótipo.	36
Tabela 3: Valores de resistência total e potência requerida (EHP) para o casco trimarã.	40
Tabela 4: Características principais para trimarã com 28,4 kg de deslocamento.....	42
Tabela 5: Componentes do peso da embarcação com seus respectivos centros de gravidade.	49
Tabela 6: Dados de entrada do WAMIT. Valores de massa, Inércia e raio de giro.	51
Tabela 7: Coeficientes hidrodinâmicos de massa adicional, amortecimento e restauração.	54
Tabela 8: Valores obtidos para frequência e período naturais correspondentes.....	54
Tabela 9: Dados de ensaio do painel fotovoltaico realizado pela Kyocera.	67
Tabela 10: Condições de operação para diferentes configurações disponíveis.....	70
Tabela 11: Pré-requisitos definidos para projeto do hélice.	72
Tabela 12: Dados avaliados para projeto do hélice.	73
Tabela 13: Matriz de eficiências relacionando P/D e Ae/Ao.	74
Tabela 14: Análise do ponto de operação do hélice para séries sistemáticas.....	75
Tabela 15: Ângulos de ataque do perfil NACA 2410.	77
Tabela 16: Valores de empuxo T, momento Q e potência Qp para as rotações definidas.	79
Tabela 17: Análise do ponto de operação do hélice para elemento de pá.	80
Tabela 18: Dados do hélice desenhado e fabricado.....	82
Tabela 19: Eficiências e Potências envolvidas nos sistemas.....	84
Tabela 20: Dados dos motores avaliados.	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
AGM	Absorbent Glas Mat
BP	British Petroleum
CODED	Combined Diesel Electric Diesel
CODLAG	Combined Diesel Electric And Gas
DC	Corrente Continua
ESC	Eletronic Speed Control
IEP	Integrated Electric Propulsion
GPS	Global Positioning System
IFEP	Integrated Full Electric Propulsion
IMU	Inertial Measurement Unit
ITTC	International Towing Tank Conference
LOA	Length Overall
MPPT	Maximum Power Point Tracker
PID	Controle Proporcional Integral Derivativo
POD	Sistema Propulsivo tipo Vagem
RAO	Response Amplitude Operator
RAPS	Remote-Area Power Supply

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ	Deslocamento da embarcação
Δ_c	Deslocamento do casco central
Δ_l	Deslocamento do casco lateral
η	Eficiência do hélice
θ	Deslocamento angular do movimento em arfagem
$\dot{\theta}$	Velocidade angular do movimento em arfagem
$\ddot{\theta}$	Aceleração angular do movimento em arfagem
φ	Deslocamento angular do movimento em jogo
$\dot{\phi}$	Velocidade angular do movimento em jogo
$\ddot{\phi}$	Aceleração angular do movimento em jogo
A_e/A_o	Área expandida sobre a área do disco
B	Boca da embarcação
B_c	Boca do casco central
B_l	Boca do casco lateral
C_{bc}	Coefficiente de bloco do casco central
C_{bl}	Coefficiente de bloco do casco lateral
C_{pc}	Coefficiente prismático do casco central
C_{pl}	Coefficiente prismático do casco lateral
C_{wlc}	Coefficiente de linha de água do casco central
C_{wll}	Coefficiente de linha de água do casco lateral
D_H	Pontal da embarcação trimarã
D_B	Diâmetro do bosso [m]
D_P	Diâmetro do hélice [m]
J	Coefficiente de avanço
K_q	Coefficiente de torque
K_t	Coefficiente de empuxo
L/D_h	Razão de aspecto comprimento por pontal
L/B	Razão de aspecto comprimento e boca
$L/V^{1/3}$	Razão de aspecto comprimento linear e volumétrico
L_{pp}	Comprimento entre perpendiculares
N	Número de revoluções por segundo [Hz]

ρ	Massa Específica do fluido [kg/m ³]
P/D	Razão passo-diâmetro
Q	Torque no hélice [W]
T	Calado da embarcação
T _c	Calado do casco central
T _h	Empuxo fornecido pelo hélice [N]
T _l	Calado do casco lateral
V _a	Velocidade de avanço [m/s]
Z _H	Número de pás do hélice
Z	Deslocamento linear do movimento em afundamento
\dot{Z}	Velocidade linear do movimento em afundamento
\ddot{Z}	Aceleração linear do movimento em afundamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	FORMA DO CASCO TRIMARÃ.....	17
2.1.1	Método Slender Ship (Navio Esbelto) para avaliar resistência	20
2.1.2	Comportamento do trimarã frente às ondas regulares	21
2.2	O SISTEMA DE ENERGIA SOLAR.....	25
2.3	O SISTEMA DE PROPULSÃO.....	27
2.3.1	Metodologia de projeto do hélice por Séries Sistemáticas.....	29
2.3.2	Metodologia de projeto do hélice por Elemento de Pá.....	30
2.3.3	Eficiências envolvidas no sistema	31
2.4	O SISTEMA DE CONTROLE.....	33
2.4.1	Piloto automático	33
2.4.2	Pilotagem direta.....	34
2.4.3	Componentes do controle.....	34
3	DESENVOLVIMENTO DO CASCO TRIMARÃ	36
3.1	DEFINIÇÃO DA POSIÇÃO DOS CASCOS LATERAIS.....	36
3.2	LEVANTAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS DA FORMA	41
3.2.1	Curvas de áreas	43
3.2.2	Curvas hidrostáticas.....	44
3.2.3	Estimativa de pesos e cálculo do CG.....	47
3.3	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO EM ONDAS REGULARES UTILIZANDO WAMIT.....	50
3.3.1	Forças e Momentos de Excitação.....	55
3.3.2	Operador de Amplitude de Resposta (RAO).....	58
3.3.3	Probabilidade de água no convés.....	61
4	ENERGIA COM PAINEL FOTOVOLTAICO	65
4.1	CIRCUITO DE ABSORÇÃO DE ENERGIA	65
4.1.1	O painel solar.....	66
4.1.2	Rastreamento do ponto máximo de potência (MPPT).....	67
4.1.3	Conjunto de armazenamento de energia elétrica (baterias).....	69

4.2	CONFIGURAÇÕES DE OPERAÇÃO	70
5	SISTEMA PROPULSIVO	71
5.1	COMPONENTES DO SISTEMA <i>POD</i>	71
5.2	PROCEDIMENTO DE ELEIÇÃO DO HÉLICE.....	72
5.2.1	Metodologia de projeto do hélice por Séries Sistemáticas	73
5.2.2	Metodologia de projeto do hélice por Elemento de Pá.....	76
5.2.3	Método de Fabricação.....	80
5.2.3.1	<i>Passo Um: Desenho do Hélice.....</i>	81
5.2.3.2	<i>Passo Dois: Impressão 3D.....</i>	82
5.2.3.3	<i>Passo Três: Laminação fibra de carbono.....</i>	83
5.3	SELEÇÃO DO MOTOR.....	84
6	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
	APÊNDICE I – CÓDIGO MATLAB, TRATAMENTO DE DADOS DE SAÍDA	
	WAMIT	91
	APÊNDICE II – CÓDIGO MATLAB PARA CALCULO DA PROBABILIDADE DE	
	ÁGUA NO CONVÉS	97
	APÊNDICE III – CÓDIGO MATLAB PARA PROJETO DO HÉLICE APLICANDO A	
	METODOLOGIA ELEMENTO DE PÁ.....	98
	ANEXO I – VALIDAÇÃO DO MÉTODO <i>SLENDER SHIP</i> REALIZADO PELO	
	<i>MAXSURF</i>	100
	ANEXO II – PERFIL NACA2410.....	103

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do sistema propulsor da embarcação deve considerar diversos fatores para melhor adequação do sistema. A apresentação é dada de forma interativa, de modo que a etapa final do sistema propulsivo fundamenta-se nas etapas anteriores de desenvolvimento do casco e do sistema de alimentação. A participação em competições ao longo do curso de graduação, que exigiram o desenvolvimento do casco e seus sistemas, foi uma inspiração para o desenvolvimento deste trabalho.

Busca-se no projeto a definição do sistema propulsor mais adequado para a fonte de energia principal, a energia solar, considerando o melhor conjunto casco-hélice-motor. A embarcação desenvolvida possui aproximadamente 2 m de comprimento e não tem por finalidade o transporte de passageiros, ela não tem pretensão de seguir as regras estabelecidas pelas sociedades classificadoras. No entanto, a embarcação apresenta-se como o modelo em escala de uma embarcação que pode ser desenvolvida no futuro.

Este projeto busca atender à crescente demanda por eficiência energética no setor naval. A necessidade de reduzir a emissão de poluentes é uma demanda constante. O acordo fechado entre 170 países-membros da IMO, em abril de 2018, visa reduzir as emissões de CO₂ em pelo menos 50% até 2050, em relação aos níveis de 2008. (MARÍTIMO, 2018).

Desenvolver projetos sustentáveis é, então, uma questão atual, que também incentiva a realização deste projeto.

A organização da estrutura deste trabalho de conclusão de curso consiste na apresentação da fundamentação teórica no capítulo 2, que realiza breve revisão bibliográfica para explicar conceitos e apresentar o equacionamento aplicado ao longo do projeto nos capítulos seguintes. O projeto de forma do casco trimarã é realizado no capítulo 3, em que são apresentadas as características principais da forma, estimativa de resistência ao avanço, potência requerida e análises de comportamento estático e dinâmico no mar. O capítulo 4 define o sistema de alimentação utilizado para o modelo, que conta com os painéis fotovoltaicos e o armazenamento de energia elétrica. O capítulo 5 apresenta o sistema propulsor da embarcação tipo *Pod* (vagem), o projeto do hélice. Por fim, conclusões a respeito do trabalho desenvolvido são apontadas no capítulo 6 com as expectativas para desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A embarcação projetada com casco tipo trimarã conta com a energia solar, fonte sustentável, como alimentação principal. Autonomia e viabilidade são os principais desafios que o projeto enfrenta. Ele tem por motivação atender a demanda por inovação e transpor barreiras existentes na aplicação da energia solar. Neste contexto, o desenvolvimento da forma ideal para o casco e a definição do sistema propulsivo *Pod* são os estudos principais deste trabalho, cujo embasamento caracteriza-se por análises da forma e projeto do hélice. Os sistemas de alimentação por painéis fotovoltaicos e de controle são apresentados para compor o projeto.

O conjunto casco-hélice-motor está diretamente relacionado; para se obter melhor resultado do sistema em conjunto, deve-se considerar a interação entre casco, motor e hélice em todas as etapas do projeto. Os subcapítulos que seguem buscam expandir a introdução acerca dos componentes que fundamentam a temática. Dessa forma, são apresentadas revisões bibliográficas que corroboram o trabalho desenvolvido.

2.1 FORMA DO CASCO TRIMARÃ

O estudo de cascos tipo trimarã iniciou-se em meados dos anos 1960, enquanto a fabricação começa nos anos da década de 1970 de forma amadora. Segundo Randy (1985), neste período as primeiras embarcações à vela com casco trimarã apresentaram diversos problemas estruturais, sendo pouco acreditadas pela comunidade naval.

Para aplicação militar, um dos primeiros projetos de trimarã, que iniciou na década de 1990, foi o RV TRITON de 1.200 toneladas de deslocamento para o Ministério da Defesa Britânica lançado no ano de 2000. (UCL, acessado em 2018).

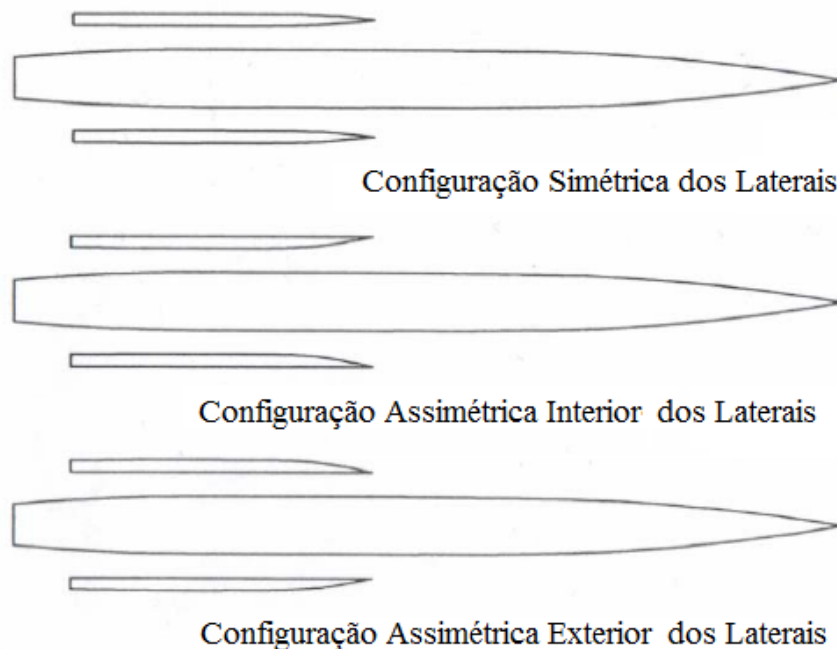
As características principais do casco trimarã são a baixa resistência ao avanço em altas velocidades e a grande área de convés disponível. Consequentemente, esse tipo de casco se adequa melhor a duas grandes áreas, são elas a militar e a comercial ou turística. Coppola & Mandarino (2001) destacam duas características principais do casco trimarã que se sobressaem e o torna mais competitivo frente ao monocasco e ao catamarã, que são apresentadas a seguir:

- O casco principal é esbelto quando comparado ao monocasco. A relação L/B gira em torno de 12 a 18, fato que reduz a resistência ao avanço;

- Os dois cascos laterais possuem deslocamento menor que o casco principal. Seu objetivo principal é aumentar a estabilidade transversal da embarcação. Conseqüentemente, a área de convés tende a ser maior que os monocascos.

Os cascos tipo trimarã possuem diferentes configurações que podem ser adotadas para desenvolvimento da forma dos cascos laterais. Essas configurações visam obter a interação ideal entre casco e ondas geradas. Segundo Ackers (1997), três tipos de configurações de cascos laterais podem ser empregados ao casco trimarã. Essas são observadas na Figura 1, os cascos simétricos, os cascos assimétricos interiores e os cascos assimétricos exteriores.

Figura 1: Configurações dos cascos laterais.



Fonte: Adaptado de Ackers (1997).

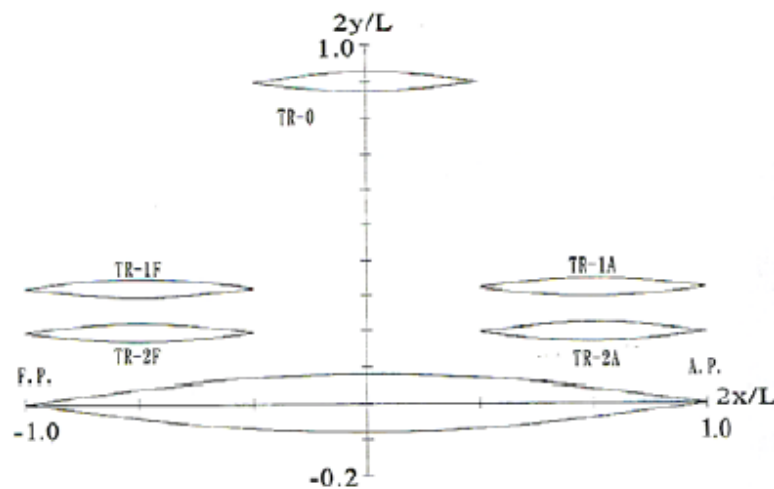
A procura dessa interação permite conhecer a diminuição ou acréscimo da resistência total ao avanço de diferentes configurações entre os cascos laterais e o principal. Testes de simulação numérica no software *Maxsurf* do presente trimarã são apresentados no capítulo 3, com o mesmo intuito de avaliar a resistência ao avanço com diferentes configurações. Bentley Systems (2001) apresenta metodologias e limitações empregadas pelo software.

A resistência ao avanço em águas calmas de uma embarcação pode ser avaliada por meio de diferentes contribuições. O valor obtido para essa resistência é uma composição de diferentes componentes que muitas vezes são difíceis de serem avaliadas separadamente. Inicialmente as resistências podem ser avaliadas entre a resistência por atrito e a residual. A

resistência por atrito pode ser estimada pelo atrito em uma placa plana com a mesma área da área submersa da embarcação. A resistência residual pode ser avaliada por um componente que contém os efeitos viscosos e outro com o efeito de geração de ondas.

A avaliação experimental da interação entre os cascos por geração de ondas é apresentada em Suzuki & Ikehata (1993). Naquele trabalho, diferentes posições longitudinais e transversais são avaliadas para cascos laterais simétricos. A Figura 2 apresenta as diferentes configurações adotadas para análise.

Figura 2: Configurações adotadas para ensaio.



Fonte: Suzuki & Ikehata (1993).

Como resultado da investigação realizada pelos autores, as seguintes conclusões podem ser destacadas:

- Por superposição linear das funções de amplitude, as resistências geradas por ondas podem ser minimizadas através da otimização da localização dos cascos laterais;
- Geralmente, os coeficientes de resistência residual do trimarã são maiores que os coeficientes de cada casco individualmente avaliado na condição de serviço. No entanto, realizando a otimização da posição dos cascos laterais, para uma faixa de número de Froude, a forma do casco trimarã possui menor coeficiente de resistência residual do que os cascos individuais.

Yang *et al.* (2001) apresentam uma abordagem para obter o ponto de mínimo para a resistência ao avanço gerada pelos cascos. A metodologia consiste no desenvolvimento em duas etapas: A primeira procura identificar as melhores formas dos cascos central e lateral, de

acordo com os resultados obtidos do coeficiente de geração de ondas, mantendo o mesmo deslocamento da forma inicial para cada casco. A segunda consiste na determinação da melhor posição para os cascos laterais com relação ao casco central por meio de uma análise de gradientes de pressão, obtendo a disposição que causa a superposição destrutiva de ondas. O método de ordem zero da teoria do navio esbelto (*Slender Ship*), apresentado pelos mesmos autores em 2000 e inicialmente por Nobless (1983), é adequado para a otimização da configuração dos cascos causando a redução da resistência ao avanço.

2.1.1 Método Slender Ship (Navio Esbelto) para avaliar resistência

A análise da resistência por formação de ondas foi avaliada pela teoria *Slender Ship* utilizando o software *Maxsurf* para o casco trimarã desenvolvido neste trabalho. O resultado apresenta o valor da resistência por geração de onda, ou a força requerida para propelar o corpo e superar o processo de dissipação de energia de ondas radiadas pelo casco na superfície livre. Esta teoria é conhecida na aerodinâmica por *Slender Body* (corpo esbelto).

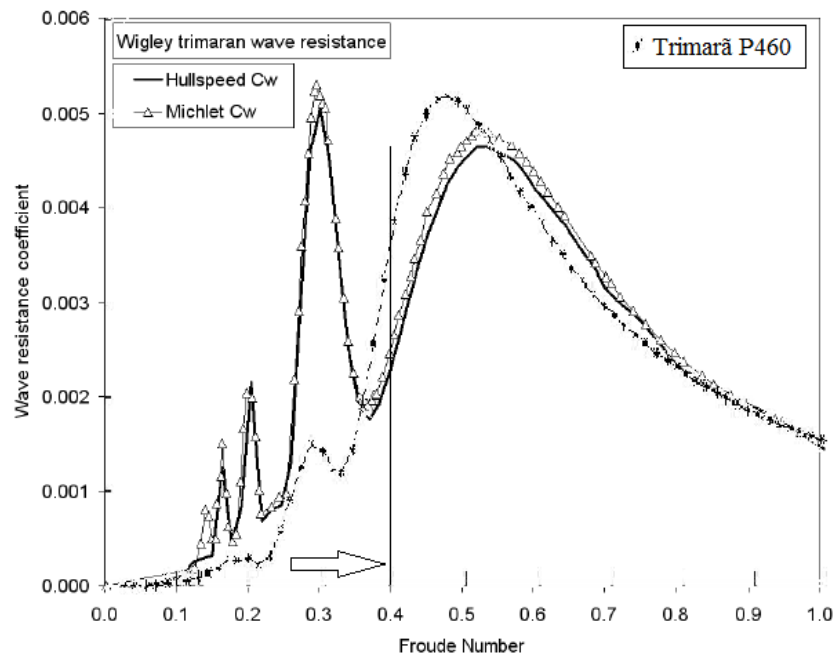
A primeira pesquisa utilizando a teoria *Slender Ship* para resistência de ondas foi realizada por Cummins (1956). Em sequência, investigações foram realizadas por Vossers (1960), Tuck (1963), Maruo (1962), entre outros. Todas essas investigações restringem o problema para o caso de águas profundas. (NEWMAN, 1970).

Slender Body é um método analítico que calcula a energia na superfície livre da onda gerada pelo navio segundo a teoria potencial e, conseqüentemente, a resistência por geração de onda do navio. Para calcular a resistência total, o software *Maxsurf* calcula e adiciona uma componente de resistência viscosa utilizando o coeficiente de resistência por atrito calculado pelo método apresentado no ITTC (1957) e aplicando o fator de forma especificada, este último considera a forma tri-dimensional do corpo.

O método possui limitação de velocidade e geométrica. Para a velocidade é avaliado o número de Froude, que deve compreender a faixa de 0,0 até 1,0, dependendo da relação L/B . Na limitação geométrica a relação $L/V^{1/3}$ deve ser maior que 4 ~ 7. Esse valor do limite é definido de acordo com o número de Froude. (BENTLEY SYSTEMS, 2012).

A Figura 3 apresenta o coeficiente de resistência por onda, avaliado pelo *Maxsurf*, que verifica a adequação do modelo ensaiado com valores experimentais e ensaiado pelo software. Nessa figura, sobrepõe-se a curva tracejada obtida para o casco trimarã avaliado nesse projeto trimarã (P460) para verificar adequação do método na análise de resistência ao avanço. Apresentam-se defasagem entre as curvas e picos iniciais de menor amplitude.

Figura 3: Coeficiente de resistência por geração de ondas do casco trimarã sobreposto aos dados numéricos e experimentais do modelo Wigley.



Fonte: Modificado do manual *Maxsurf Resistance*.

A região em destaque que inicia para o número de Froude igual 0,4 é a região de atuação do casco trimarã em estudo. Nesta região, os valores do coeficiente de resistência por ondas são inicialmente maiores que as curvas apresentadas para o casco Wigley. As duas curvas, de traço contínuo e de triângulos, ajustam-se melhor por serem dados avaliados para o mesmo casco. O casco em estudo não possui a forma Wigley, mas deve ser bem ajustado para o método de análise de resistência.

2.1.2 Comportamento do trimarã frente às ondas regulares

Para análise da estabilidade dinâmica do casco, apresenta-se, a seguir, o procedimento de cálculo que permite determinar uma aproximação da frequência natural dos movimentos que apresentam restauração: afundamento (*heave*), jogo (*roll*) e arfagem (*pitch*) da embarcação.

Seja apresentada a equação do movimento de afundamento, Z , pela equação (1) a seguir.

$$(M + A_{33})\ddot{Z} + B_{33}\dot{Z} + C_{33}Z = Z_{E33}\text{sen}(\omega t + \varepsilon_{33}) \quad (1)$$

Em que:

M : Massa do corpo;

A_{33} : Massa adicional do movimento de afundamento;

- \ddot{Z} : Aceleração linear do movimento de afundamento;
 B_{33} : Amortecimento do movimento de afundamento;
 \dot{Z} : Velocidade linear do movimento de afundamento;
 C_{33} : Restauração do movimento de afundamento;
 Z : Deslocamento do movimento de afundamento;
 F_{E33} : Força excitante do movimento de afundamento;
 ε_{33} : Fase do movimento de afundamento;
 w : Frequência de ondas incidentes.

Sejam apresentadas também as equações do movimento em jogo, ϕ , e arfagem, θ , respectivamente em (2) e (3).

$$(I_{xx} + A_{44})\ddot{\phi} + B_{44}\dot{\phi} + C_{44}\theta = M_{44}\cdot\text{sen}(w.t + \varepsilon_{44}) \quad (2)$$

Em que:

- I_{xx} : Inércia de massa no eixo x.
 A_{44} : Massa adicional do movimento de jogo;
 $\ddot{\phi}$: Aceleração angular do movimento de jogo;
 B_{44} : Amortecimento do movimento de jogo;
 $\dot{\phi}$: Velocidade angular do movimento de jogo;
 C_{44} : Restauração do movimento de jogo;
 ϕ : Deslocamento angular do movimento de jogo;
 M_{44} : Momento excitante do movimento de jogo;
 ε_{44} : Fase do movimento de jogo.

$$(I_{yy} + A_{55})\ddot{\theta} + B_{55}\dot{\theta} + C_{55}\theta = N_{55}\cdot\text{sen}(w.t + \varepsilon_{55}) \quad (3)$$

Em que:

- I_{yy} : Inércia de massa no eixo y.
 A_{55} : Massa adicional do movimento de arfagem;
 $\ddot{\theta}$: Aceleração angular do movimento de arfagem;
 B_{55} : Amortecimento do movimento de arfagem;
 $\dot{\theta}$: Velocidade angular do movimento de arfagem;
 C_{55} : Restauração do movimento de arfagem;
 θ : Deslocamento angular do movimento de arfagem;

- N_{55} : Momento excitante do movimento de arfagem;
 ε_{55} : Fase do movimento de arfagem.

A equação (1) descreve o movimento em afundamento da embarcação na forma desacoplada dos outros movimentos. De forma que, o movimento em um grau de liberdade não afeta o movimento em outro grau. A frequência natural em afundamento fica determinada pela equação (4).

$$\omega_{n3} = \sqrt{\frac{C_{33}}{M + A_{33}(\omega_{n3})}} = \sqrt{\frac{\rho g A_{wl}}{M + A_{33}(\omega_{n3})}} \quad (4)$$

Similarmente, a equação (2) que descreve o movimento em jogo da embarcação na forma desacoplada dos outros movimentos determina a frequência natural em jogo pela equação (5).

$$\omega_{n3} = \sqrt{\frac{C_{44}}{I_{xx} + A_{44}(\omega_{n4})}} = \sqrt{\frac{\rho g \nabla GM_T}{I_{xx} + A_{44}(\omega_{n4})}} \quad (5)$$

Assim como a equação (3) que descreve o movimento em arfagem, determina a frequência natural em arfagem pela equação (6).

$$\omega_{n3} = \sqrt{\frac{C_{55}}{[I_{yy} + A_{55}(\omega_{n5})]}} = \sqrt{\frac{\rho g \nabla GM_L}{[I_{yy} + A_{55}(\omega_{n5})]}} \quad (6)$$

A avaliação da componente da velocidade desenvolvida pela embarcação sobre os movimentos é apresentada por Lewis (1988).

Para o movimento de arfagem a massa adicional e amortecimento ficam determinados pelas equações 7 e 8, respectivamente.

$$A_{55}^U = \int x^2 A_{33} dx + \frac{U^2}{\omega_e^2} A_{33} = A_{55}^0 + \frac{U^2}{\omega_e^2} A_{33} \quad (7)$$

$$B_{55}^U = \int x^2 B_{33} dx + \frac{U^2}{\omega_e^2} B_{33} = B_{55}^0 + \frac{U^2}{\omega_e^2} B_{33} \quad (8)$$

Em que:

- U : Velocidade da embarcação;
 ω_e : Frequência de encontro.

A frequência de encontro fica determinada pela equação 9.

$$\omega_e = \omega - \omega^2 \frac{U}{g} \cos(\alpha) \quad (9)$$

Em que:

α : Ângulo de aproamento formado entre a direção da onda e a direção de deslocamento da embarcação.

Para realiza a análise de água no convés foi definida inicialmente a condição de mar, que segue o espectro de JOINSWAP. Como apresentado na equação 10.

$$S\omega(\omega) = 320 \cdot \frac{H_S}{T_P^4 \cdot \omega^5} \cdot e^{\left(\frac{-1950}{T_P^4 \cdot \omega^4} \cdot 3,3^A\right)} \quad (10)$$

Em que:

T_P : Período de picos;

H_S : Altura significativa;

$$A : A = e^{\left(-\left(\frac{\frac{\omega}{\omega_p} - 1}{0,07 \cdot \sqrt{2}}\right)^2\right)} \text{ para } \omega < \omega_p ;$$

$$A = e^{\left(-\left(\frac{\frac{\omega}{\omega_p} - 1}{0,09 \cdot \sqrt{2}}\right)^2\right)} \text{ para } \omega > \omega_p .$$

Avaliado para a frequência de encontro, é apresentado o espectro de resposta na equação 11.

$$S_R(\omega_e) = RAO_p^2(\omega_e) \cdot \left[S_\omega(\omega) / \left(1 - 2 \cdot \omega \frac{V}{g} \cos(\alpha) \right) \right] \quad (11)$$

Em que:

RAO_p é o RAO avaliado para o ponto considerando os movimentos de afundamento e arfagem. Apresentado na equação 12.

$$h_o = Z + X_B \cdot \theta \quad (12)$$

Em que:

h_o : Movimento absoluto no ponto;

Z : RAO do movimento em afundamento;

X_B : Posição longitudinal do ponto avaliado, na proa do trimarã;

θ : RAO do movimento em arfagem.

A área sob a curva do espectro de resposta obtida pela equação 13 é utilizada no cálculo da probabilidade de água no convés apresenta na equação 14.

$$m_{0Z} = \int S_R(w_e).dw_e \quad (13)$$

$$P(Z_p > H) = e^{\left(-\frac{H^2}{2.m_{0Z}}\right)} \quad (14)$$

Em que:

Z_p : Movimento avaliado no ponto de convés na proa;

H : Borda livre.

2.2 O SISTEMA DE ENERGIA SOLAR

A aplicação da energia solar como fonte principal de uma embarcação levanta discussões acerca da sustentabilidade, custo e autossuficiência energética. Construir um futuro sustentável é uma preocupação mundial. Para isso, ampliar a utilização de energias renováveis é fundamental para assegurar esse desenvolvimento. Groumpos & Papageorgiou (1987) apresentam que, apesar do custo inicial maior, o retorno é economicamente viável em longo prazo. A autossuficiência pode ser atendida através da utilização do conjunto de armazenamento de energia elétrica.

Pesquisas desenvolvidas nessa área visam fomentar a utilização da tecnologia de sistemas solares em diversos setores. O trabalho desenvolvido por Nasirudin *et al.* (2016) apresenta uma metodologia de projeto de um barco movido a energia solar, assim como o trabalho desenvolvido anteriormente por Utama *et al.* (2013).

A avaliação da viabilidade econômica de sistemas compostos por painéis fotovoltaicos e baterias é importante para incentivar a aplicação desse modelo de projeto no setor. Groumpos & Papageorgiou (1987) apresentam um método da análise de custo do ciclo de vida do sistema energético desenvolvido em 1983. No trabalho, os autores concluem que com o avanço tecnológico e o investimento nos processos de fabricação e montagem, o custo avaliado continuaria sendo reduzido.

A autossuficiência energética é avaliada por Jain (1988), realizando um levantamento de dados para formar uma média global de irradiação. Esse levantamento é importante para verificar em qual o período do ano a operação da embarcação é viável, dependendo do local

de operação. O dimensionamento do conjunto de baterias está diretamente ligado a essas condições.

A evolução do mercado de energia solar no mundo é apresentada brevemente para entendimento e prospecção de futuro da tecnologia aplicada neste trabalho. São comparados custos do módulo fotovoltaico, participação dos fabricantes, tecnologia de material aplicado, aplicação da tecnologia e capacidade instalada.

Os dados, apresentados por Tolmasquim (2003), compreendem o período entre os anos 1990 e 2000. O custo do módulo fotovoltaico variou pouco nas últimas décadas, estabilizando-se em torno de 3,5 US\$/Watts. O Japão aparece como detentor da maior produção, seguido dos EUA, o que se reflete na origem dos fabricantes que detêm os maiores percentuais de participação no mercado, que são a *Sharp*, a *BP Solar* e a *Kyocera* em ordem decrescente de participação. O destaque em aplicação dessa tecnologia é a área residencial conectada à rede, seguida da aplicação em comunicação e sinalização.

O material mais aplicado na fabricação da célula fotovoltaica é o silício. Segundo Tolmasquim (2003), as células fotovoltaicas que utilizam o silício são classificadas de acordo com o método de fabricação em três formas. São elas o silício monocristalino, o silício policristalino e o silício amorfo, descritos a seguir:

- Silício monocristalino: A célula é obtida a partir de barras cilíndricas de silício monocristalino produzidas em fornos especiais (processo Czochralski, por exemplo). São realizados cortes em forma de pastilha de 300 mm de espessura para processamento. Com eficiência de conversão de luz solar em eletricidade de 15%;
- Silício policristalino: As células são produzidas a partir da fusão de silício em moldes especiais. Nesse processo, os átomos não se organizam em um único cristal. Formando-se uma estrutura policristalina com superfícies de separação entre os cristais. Com eficiência de conversão de luz em eletricidade de 13%;
- Silício amorfo: A célula é obtida por meio da deposição de camadas muito finas de silício sobre superfícies de vidro ou metal. Com eficiência de conversão de luz em eletricidade de 5% a 7%.

A tecnologia mais aplicada em 2001 foi o silício policristalino p-Si (47,3%), seguido do silício monocristalino c-Si (35,0%). (MAYCOCK, 2002).

O desenvolvimento da tecnologia aplicada vem ocorrendo ao longo de anos e reflete diretamente na eficiência de conversão encontrada no setor de energia solar. Essa diferença é apresentada na Tabela 1, onde uma comparação entre os anos de 1998 e 2010 foi realizada para os materiais existentes, uma predição realizada em 1999, vide Tolmasquim (2003).

Tabela 1: Diferentes eficiências entre os materiais existentes no mercado.

Tecnologia da Célula	1998 (%)	2010 (%)
Silício monocristalino	14-16	22
Silício multicristalino (lingote)	13-15	20
Fitas (lâminas)	14	21
Concentradores (células de silício)	18	30
Silício amorfo (incluindo células tandem)	6-8	14
Disseleneto de cobre e índio (CIS)	7-8	14
Telureto de cádmio	7-8	14
Filme de silício	8-10	15

Fonte: Maycock, 1999 *apud* Tolmasquim, 2003.

2.3 O SISTEMA DE PROPULSÃO

O sistema propulsor mais aplicado às embarcações trimarã existentes, principalmente navios militares, é o sistema convencional interligado ao motor diesel. Para as embarcações de menor porte, utiliza-se motor elétrico ou propulsão à vela.

O sistema de alimentação principal da embarcação em questão é proveniente do conjunto de painéis solares, que transformam a energia solar em energia elétrica. Eles fornecem toda a carga elétrica necessária para suprir as necessidades energéticas da embarcação.

O motor principal selecionado para o presente projeto foi o motor elétrico. Dentre os motivos estão adequação à fonte de energia fotovoltaica, ao porte e à demanda, conforme descrito a seguir.

Alguns tipos de sistemas propulsores que utilizam o motor elétrico são o CODLAG (Sistema Combinado Diesel Elétrico e Gás), o IEP (Sistema Integrado Elétrico de Propulsão), IFEP (Sistema Totalmente Integrado de Propulsão) e o CODED (Sistema Combinado Diesel Elétrico Diesel). Os sistemas CODLAG, que combinam o motor elétrico com diesel e gás, requerem demanda energética elevada e porte grande, portanto não são indicados para o caso em estudo. São aplicáveis, quanto ao porte, apenas os sistemas IEP ou IFEP.

Alguns exemplos de aplicação dos sistemas IEP e IFEP são apresentados segundo Wärtsilä. São apresentados os projetos que entraram em serviço em 1989 e em 1990 aplicando esses sistemas.

“A Propulsão Elétrica Integral Parcial (IEP) foi empregada com um sucesso considerável nos Mine-Hunters de Função Única para Royal

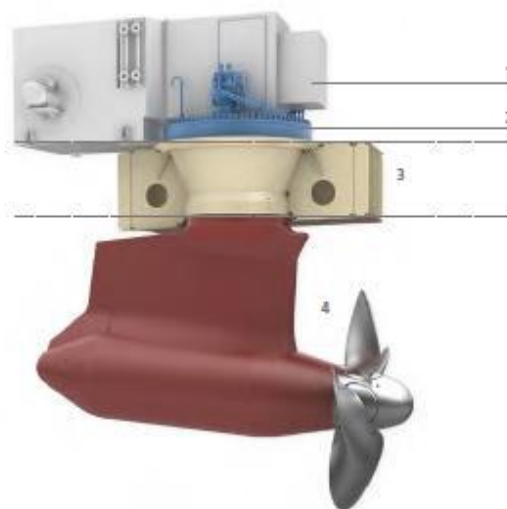
Navy. A primeira desta classe, HMS SANDOWN, entrou em serviço em 1989. A Propulsão Elétrica Integrada Parcial (IEP) também foi selecionada para o Tipo 23 em uma configuração CODAG. O primeiro de classe, o HMS NORFOLK, foi contratado em 1990. O primeiro sistema Totalmente Integrado de Propulsão (IFEP) completo enviado para a Royal Navy é o Auxiliary Oiler (AO) e a plataforma de aterragem Dock (substituição) HMS ALBION.” WÄRTSILÄ.

A Propulsão Elétrica Integrada Total (IFEP) supre a necessidade propulsora e a de serviço em uma embarcação, enquanto a Propulsão Elétrica Integrada Parcial (IEP) supre a demanda de serviço. A aplicação do sistema IEP é amplamente observada em embarcações mercantes de grande porte. Para o projeto, o sistema que será utilizado é o IFEP, visto que o foco está no dimensionamento de um sistema propulsor alimentado pela energia elétrica proveniente dos painéis fotovoltaicos e baterias.

O sistema propulsor deve ser compacto e fornecer empuxo suficiente para propelar a embarcação à velocidade de serviço. É analisado o sistema *Pod* que conta com motor elétrico e hélice diretamente acoplado. Nesse sistema, o motor é posicionado dentro de uma estrutura externa ao casco chamada de vagem pelo seu formato.

A estrutura apresentada na Figura 4 remete à aplicação em navios de grande porte enquanto apresenta um esquema com os componentes desse sistema. O *Pod* aplicado ao modelo discutido neste projeto possui simplificações quanto à estrutura da vagem e aos sistemas que compõem o sistema propulsivo, apresentados no capítulo 5.

Figura 4: Representação de um sistema propulsivo *Pod*.



Fonte: Catálogo *Rolls-Royce “Podded Propulsors”*.

O catálogo *Rolls-Royce* apresenta seu modelo em quatro partes, correspondentes aos sistemas presentes no *Pod*. A primeira (1) corresponde ao sistema de refrigeração. A segunda

(2) é responsável pela orientação da direção da vagem, onde opera um motor elétrico ou hidráulico. A terceira (3) é a estrutura de conexão, fixado no casco e suporta o *Pod*. A quarta (4) é a vagem com rotação de $360^\circ, \pm 35^\circ$ em trânsito.

A definição do hélice segue duas metodologias empregadas neste projeto, séries sistemáticas e elemento pá. Essas, apresentadas nos subcapítulos a seguir.

2.3.1 Metodologia de projeto do hélice por Séries Sistemáticas

A definição dos coeficientes do propulsor para Série B utiliza as seguintes equações para coeficiente de avanço, J , coeficiente de empuxo, K_t , coeficiente de torque, K_q , e eficiência, η_o . Apresentadas respectivamente pelas equações 15, 16, 17 e 18 a seguir:

$$J = \frac{V_A}{n \cdot D} \quad (15)$$

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \quad (16)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} \quad (17)$$

$$\eta_o = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_Q} \quad (18)$$

Os coeficientes K_t e K_q podem ser relacionados em termos de J , fornecendo valores de P/D , A_e/A_o para Z_H fixado em quatro pás. O número de pás do hélice é fixado para avaliar melhor as rotações que podem ser empregadas durante a operação. Visto que a fonte de energia solar é variável ao longo do dia, deve ser avaliada uma margem de operação de acordo com a rotação para o hélice projeto.

Para obter a velocidade de avanço, V_a , foi apresentada a equação 19 a seguir.

$$V_a = V(1 - w) \quad (19)$$

Alguns métodos podem ser utilizados para estimar o valor do coeficiente de esteira, w . O método escolhido foi o de Taylor apresentado na equação 20 a seguir.

$$w = 0,5.Cb - 0,05 \quad (20)$$

O empuxo requerido é avaliado utilizando o valor obtido no cálculo da resistência ao avanço. Obtêm-se o empuxo pela equação 21 a seguir.

$$T = R_T / (1 - t) \quad (21)$$

Segundo Lewis (1988) o coeficiente de dedução de empuxo, t , pode ser aproximado para propulsores com fixação tipo pé de galinha. Como o sistema POD comporta-se como se tivesse pé de galinha adotou-se a hipótese apresentada na expressão 22, a seguir.

$$t = 0,7w + 0,06 \quad (22)$$

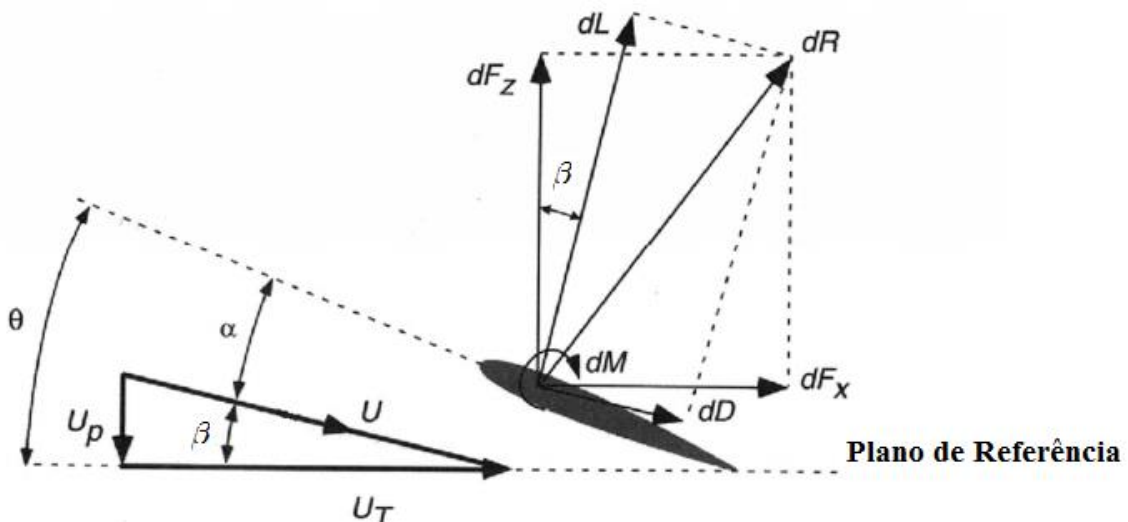
Em que:

w é obtido pela equação 20.

2.3.2 Metodologia de projeto do hélice por Elemento de Pá

A teoria do Elemento de Pá analisa o escoamento em torno da seção bidimensional da pá sem considerar o efeito do entorno. Desenvolvendo o diagrama de velocidades e forças é possível obter as componentes de força de empuxo (dT) e momento de torque (dQ/r), que apresentam-se nas equações 23 e 24. Na Figura 5, apresentam-se as componentes de velocidades e forças envolvidas na seção da pá. As equações apresentadas a seguir são fundamentadas em Lewis (1988).

Figura 5: Diagrama de Velocidades e Forças.



Fonte: Modificado de Cunha, F. S.

$$dT = Z_H \cdot dF_z = Z_H \cdot (dL \cdot \cos\beta - dD \cdot \sin\beta) \quad (23)$$

$$\frac{dQ}{r} = Z_H \cdot dF_x = Z_H \cdot (dL \cdot \sin\beta + dD \cdot \cos\beta) \quad (24)$$

Em que dL e dD são o diferencial de sustentação e arrasto obtidos através das equações 25 e 26.

$$dL = \frac{1}{2} \rho \cdot c \cdot dr \cdot \frac{V_A^2}{\sin^2 \beta} C_L \quad (25)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho \cdot c \cdot dr \cdot \frac{V_A^2}{\sin^2 \beta} C_D \quad (26)$$

O ângulo de incidência (β) é dado pela equação 27.

$$\beta = \tan^{-1} \frac{Va}{2\pi \cdot n \cdot r} \quad (27)$$

O ângulo de ataque (α) é dado pela relação 28.

$$\alpha = \theta - \beta \quad (28)$$

Em que θ é o ângulo de passo.

Integrando as equações 23 e 24 ao longo do diâmetro, obtêm-se os valores de força e empuxo e força de torque em uma pá. Então, esse valor deve ser multiplicado pelo número de pás, Z_H .

A teoria do elemento de pá foi proposta inicialmente por Drzewiecki em 1892. Um problema significativo para aplicação dessa teoria é que ela não considera as mudanças de fluxo devido à influência do hélice sobre ele, que altera a velocidade axial. (OKULOV, 2013).

Desta forma, o método é mais bem ajustado para hélices de pás longas e finas. Apresentando possivelmente valores elevados de eficiência, diferindo do valor real do hélice avaliado no presente trabalho.

2.3.3 Eficiências envolvidas no sistema

Na avaliação das eficiências envolvidas no sistema, devem-se avaliar inicialmente as potências EHP, BHP, SHP, DHP e THP. Essas potências são apresentadas a seguir pelas equações 29, 30, 31, 32 e 33.

A potência efetiva (EHP) é avaliada como a necessidade de propelir o navio na velocidade indicada de projeto. Dependente da resistência total e da velocidade desenvolvida.

$$EHP = R_T \cdot V \quad (29)$$

A potência ao freio (BHP) é indicada em função da capacidade do motor elétrico. Em que o MCR é o ponto máximo de operação do motor.

$$BHP = f(MCR_{motor}) \quad (30)$$

A potência entregue ao eixo (SHP) e ao hélice (DHP) são avaliadas utilizando as equações 31 e 32. O SHP avalia o torque transmitido pelo eixo e o DHP avalia o torque do hélice.

$$SHP = 2\pi \cdot n \cdot Q_T \quad (31)$$

$$DHP = 2\pi \cdot n \cdot Q \quad (32)$$

Em que:

Q_T : Torque transmitido pelo eixo;

Q : Torque do propulsor.

A potência entregue ao propulsor é avaliada pelo empuxo e velocidade de avanço (obtida em função do coeficiente de esteira).

$$THP = T \cdot V_A \quad (33)$$

As relações entre determinadas potências fornece valores de eficiências apresentadas nas equações 34, 35, 36 e 37.

$$\eta_H = EHP / THP = R_T \cdot V / (T \cdot V_A) = (1-t) / (1-w) \quad (34)$$

Em que η_H é a eficiência do casco.

$$\eta_{RR} = (1 / \eta_O) \cdot THP / DHP \quad (35)$$

Em que a eficiência relativa rotativa (η_{RR}) está inversamente relacionada à eficiência do hélice em águas abertas (η_O), definida na equação 18.

A eficiência ao eixo (η_S) é apresentada na equação 36 que relaciona a potência do propulsor à potência fornecida ao eixo.

$$\eta_S = DHP / SHP \quad (36)$$

A eficiência η_M relaciona a potência fornecida ao eixo com a potência ao freio.

$$\eta_M = SHP / BHP \quad (37)$$

A relação entre a potência efetiva (EHP) e a potência ao freio (BHP) é apresentada na equação 38.

$$EHP = \eta_H \cdot \eta_{RR} \cdot \eta_O \cdot \eta_S \cdot \eta_M \cdot BHP \quad (38)$$

2.4 O SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle constitui-se de vários componentes, sendo eles acelerômetro, sistema de geoposicionamento GPS, interface de comunicação Wi-Fi, microcontrolador Arduino e controle remoto. São expostas duas formas de controle possíveis, sendo a primeira a pilotagem direta e a segunda o piloto automático. Ambas as formas de controle utilizam o microcontrolador Arduino para determinar a posição e velocidade de rotação do hélice do trimarã.

O microcontrolador Arduino deve ser configurado para atuar como um controlador PID, de forma tal que o barco se mova na direção correta de forma a não sofrer grandes variações devido a forças externas como a do vento ou a de ondas incidentes.

No controle por pilotagem direta, a direção e velocidade de rotação do hélice são determinados pelo piloto utilizando controle remoto, que envia comandos para a interface de controle remoto, enquanto no controle por piloto automático, a direção e a velocidade do hélice são determinadas pelo microcontrolador Arduino atendendo à rota enviada pela interface Wi-Fi.

O controle por pilotagem direta está presente para que a equipe possa posicionar o barco para a largada e, caso necessário, trazê-lo para o barco da equipe para eventuais reparos ou ajustes. O controle por piloto automático, por sua vez, é usado durante a competição. Nas próximas seções, descritos respectivamente os sistemas de piloto automático e de pilotagem direta.

2.4.1 Piloto automático

O sistema de piloto automático instrui o barco a dirigir-se, em sequência, a uma série de pontos especificados como coordenadas de latitude e longitude. Essa lista de coordenadas pelas quais o barco deve passar é enviada ao barco através da interface Wi-Fi do sistema de controle.

O ciclo de funcionamento do sistema de piloto automático segue as seguintes etapas:

- Envio de coordenadas através da interface Wi-Fi;
- Leitura da posição atual através do GPS;
- Seleção do próximo ponto que deve ser atingido da lista de coordenadas;
- O piloto automático gera o vetor deslocamento entre a posição atual e a posição objetivo;

- O controlador PID no Arduino especifica a velocidade e direção do hélice para atingir o objetivo;
- O hélice é ativado;
- Durante o deslocamento a posição é atualizada pelo GPS e pelo acelerômetro que retorna valores de aceleração que são integrados no tempo para obter o vetor velocidade;
- A posição do barco é determinada pela combinação do retorno do GPS com a previsão de localização pelos dados obtidos do acelerômetro. O método estatístico “Filtro de Kalman” deve ser empregado para mater o erro de precisão em níveis aceitáveis;
- Atigindo o ponto especificado, o processo é retomado para o ponto seguinte da lista.

O Filtro de Kalman é um método que utiliza as medições realizadas ao longo do tempo, calculando uma média ponderada entre o valor predito e o valor medido.

2.4.2 Pilotagem direta

O sistema de pilotagem direta faz com que o barco siga direção e velocidade especificadas pelo operador. O ciclo de funcionamento do sistema de piloto direto segue as seguintes etapas:

- Através da interface Wi-Fi o barco altera seu controle de automático para direto;
- Utilizando um controle remoto, o controlador determina a direção e velocidade que devem ser atendidas;
- O controlador PID (proporcional integral derivativo) do Arduino especifica a movimento do hélice para atender o solicitado;
- O hélice é ativado;
- Retomam-se os passos anteriores caso haja qualquer alteração pelo controlador.

2.4.3 Componentes do controle

Os componentes que integram o sistema de controle da embarcação são: radio controle, IMU (unidade de medição inercial), GPS, microcontrolador Arduino e servo motor. A função desses foi apresentada na explicação dos tipos de pilotagem que podem ser aplicados ao projeto.

O IMU é um dispositivo eletrônico que fornece medidas de aceleração e força através de uma combinação de acelerômetros e giroscópios. Esses são extensivamente utilizados em aviões, navios, espaçonaves, mísseis e satélites para navegação. Um microcontrolador

processa as entradas e fornece a posição em cada instante através do método de navegação estimada.

Para este projeto devem ser utilizados dois servos. De maneira que um é responsável pelo controle da direção do *pod*, e o outro é responsável pela alteração do controle de manual para automático e o contrário também.

3 DESENVOLVIMENTO DO CASCO TRIMARÃ

A proposta do projeto é desenvolver uma embarcação movida a energia solar. Com o foco em eficiência energética, o casco selecionado foi do tipo trimarã que consiste num casco central acompanhado de dois cascos idênticos localizados nas laterais, e que possuem menor tamanho. A embarcação estudada neste projeto considera uma escala reduzida de 1:50. Sendo assim, o modelo reduzido apresenta as seguintes características geométricas observadas na Tabela 2.

Tabela 2: Características entre modelo e protótipo.

	Modelo	Protótipo
Comprimento	1,95 m	97,5 m
Boca	1,045 m	52,25 m
Calado	0,115 m	5,75 m
Velocidade	2 m/s (3,89 nós)	14,14 m/s (27,49 nós)

O presente projeto estimou um peso aproximado de 3550 toneladas para o deslocamento do protótipo incluindo o peso dos painéis e carga que pode ser pessoas e/ou produtos.

O modelo deve transportar os painéis, o sistema de governo e componentes eletrônicos. Não requer grande volume interno. O casco deve fornecer boa estabilidade, baixo deslocamento, e a distância entre os cascos deve ser suficiente para a área ocupada pelos painéis fotovoltaicos.

As condições ambientais têm grande influência na operação da embarcação. Além da carga gerada pelas ondas, a incidência solar também interfere no seu desempenho. Essas duas características ambientais afetam diretamente o projeto. Três condições de operação de acordo com a fonte energética são abordadas no capítulo 4.

A seguir, apresenta-se uma análise de influência da localização dos cascos laterais, em relação à resistência ao avanço.

3.1 DEFINIÇÃO DA POSIÇÃO DOS CASCOS LATERAIS

Para análise de resistência ao avanço e potência requerida o Método *Slender Ship* foi aplicado utilizando o software *Maxsurf*. Esse método foi bem-sucedido para embarcações

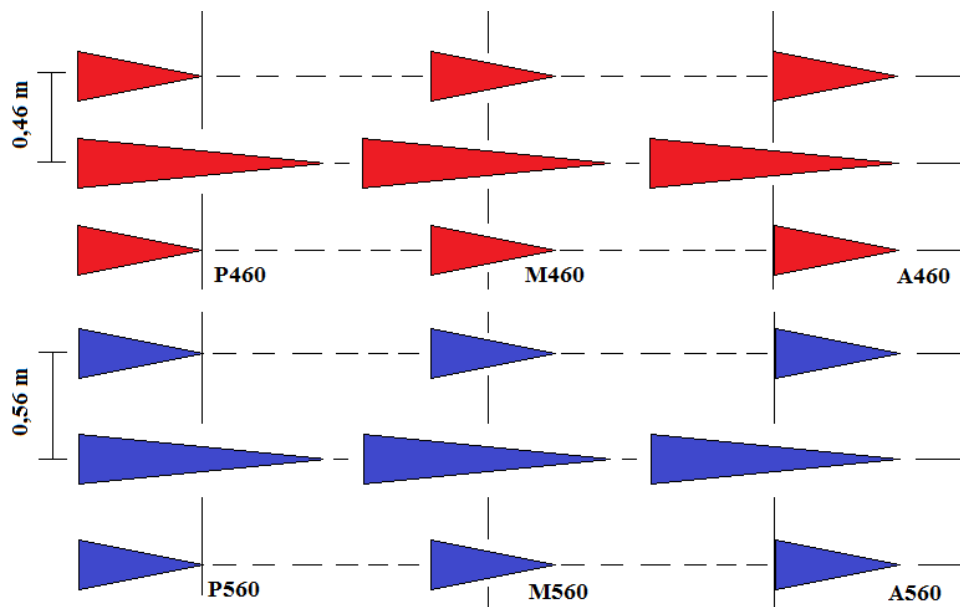
finas e tipo trimarã, como apresentado no Anexo I, análise realizada pelo *Maxsurf* no intuito de comprovar a aplicação do método para monocasco, catamarã e trimarã.

É conhecido que a geração de ondas de um casco interfere no escoamento do outro e esta interação pode ocasionar uma resistência adicional. Assim, quando não é possível avaliar a interferência entre cascos isoladamente pode ser adotada uma margem de resistência que procura suprir esse adicional na seleção do hélice, mas neste projeto foi realizada esta análise de interferências.

Os cálculos de resistência e potência foram realizados para a condição de 28,4 kg de deslocamento. Essa condição corresponde ao calado de 0,115 m. Os resultados de resistência e de potência foram obtidos utilizando o método *Slender Body* no software *Maxsurf Resistance*.

Os cascos laterais foram avaliados para definir a melhor posição a partir de seis configurações adotadas, apresentadas na Figura 6. São avaliadas duas posições transversais, 0,46 m e 0,56 m e três posições longitudinais, que são: mesma linha de popa, mesma linha de meio navio e mesma linha de proa. Os valores da resistência obtidos pela análise são apresentados na Figura 7.

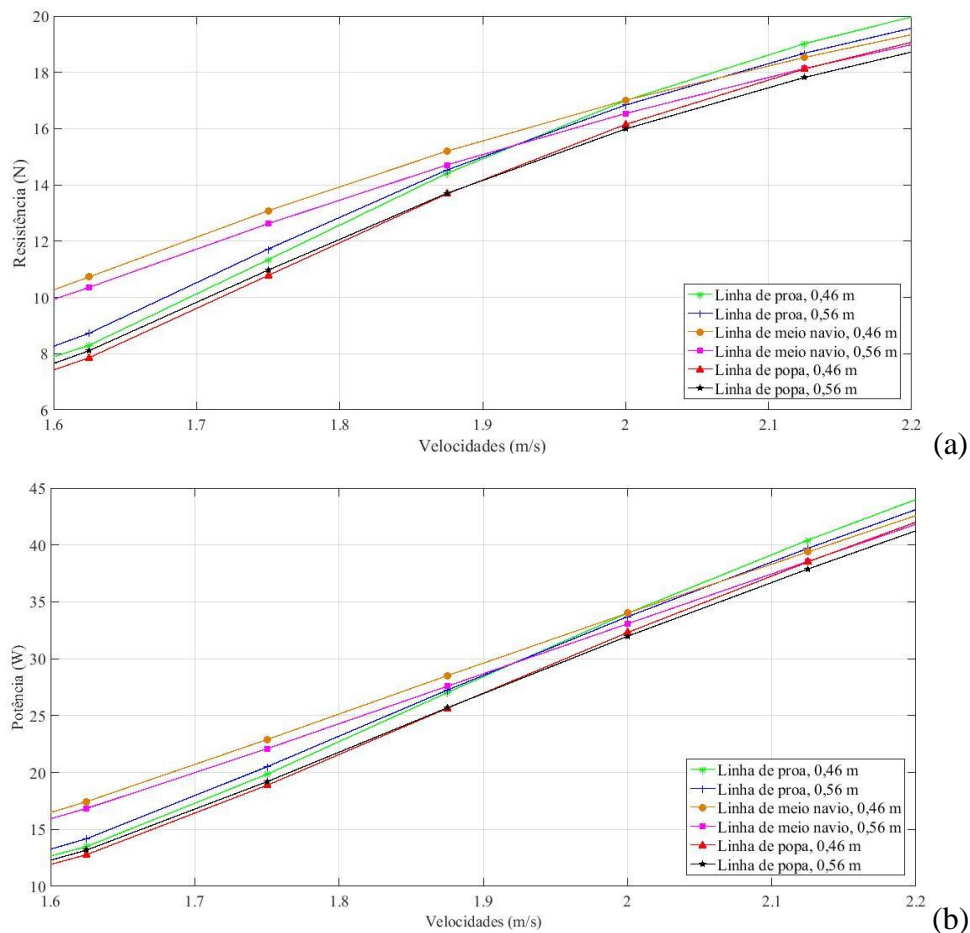
Figura 6: posições avaliadas para o casco trimarã.



Fonte: Autor.

Os valores das distâncias transversais foram definidos visualmente, e a diferença entre as duas de 0,1 m corresponde a um aumento de 10 m na boca da embarcação.

Figura 7: Análise de (a) resistência ao avanço e (b) potência requerida para diferentes posições dos cascos laterais.

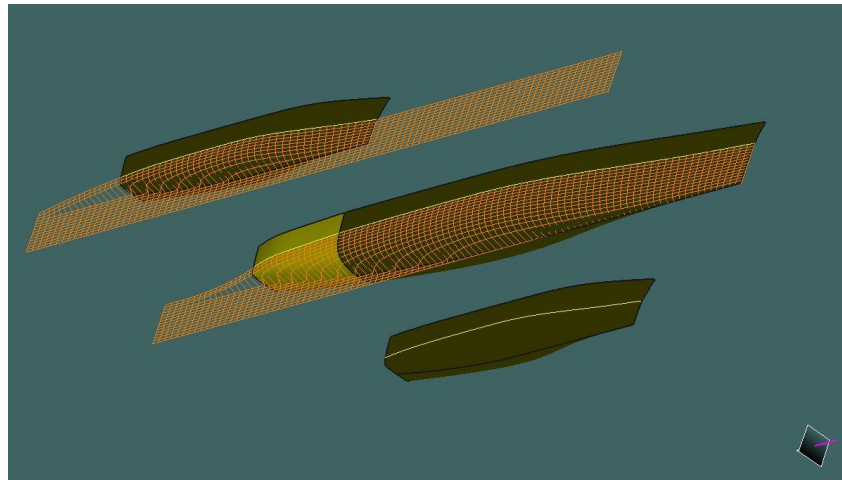


Fonte: Autor.

As menores resistências para propelar os cascos são obtidas para os que se posicionam na mesma linha de popa. A resistência ao avanço dos cascos laterais distanciados de 0,46 m quando a velocidade for menor que 1,875 m/s é menor que quando os cascos laterais distanciados de 0,56 m. A velocidade adotada para o modelo é de 2 m/s. Nesta, ocorre o caso contrário, a posição 0,56 m fornece menor valor. A diferença entre essas resistências é pequena (1%), referente ao valor total. Desta forma, o casco selecionado para o estudo foi o posicionado a 0,46 m, sem prejuízo quanto à resistência ao avanço.

A Figura 8 apresenta a malha desenvolvida pelo software *Maxsurf* para análise da resistência do casco trimarã. Mesmo sem possuir a forma da popa fina, o método pôde ser bem aplicado ao modelo.

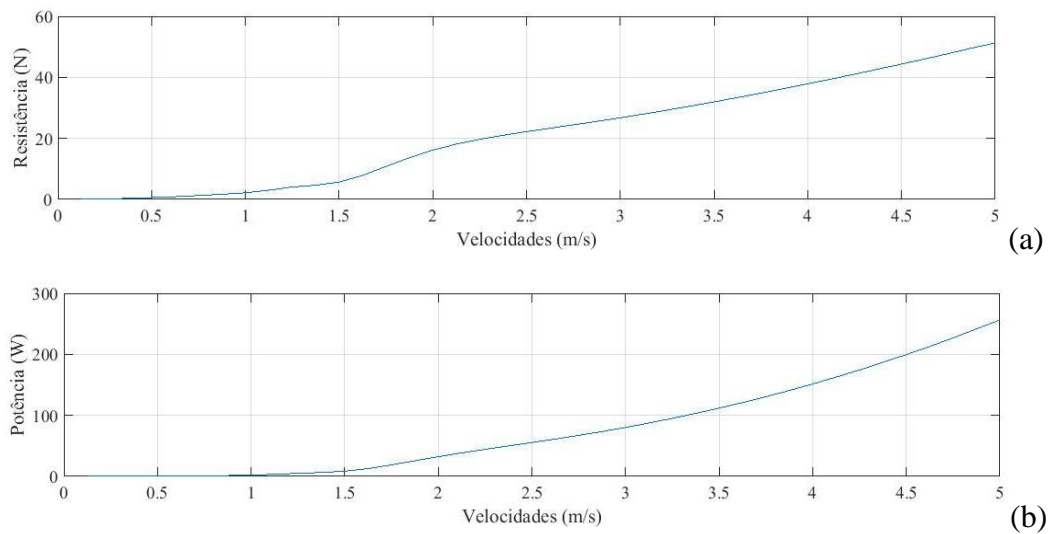
Figura 8: Método Slender Body para o casco trimarã.



Fonte: Autor.

As curvas obtidas para resistência ao avanço e potência requerida para propelir o casco trimarã selecionado, apresentam-se na Figura 9. Nas quais podem ser avaliados o comportamento ao longo do intervalo de velocidade de 0 m/s até 5 m/s.

Figura 9: Curva de (a) resistência ao avanço e (b) potência requerida para trimarã selecionado.



Fonte: Autor.

Na tabela 3 apresentam-se os dados obtidos para o casco selecionado para a faixa de velocidade até 5m/s como apresentados na Figura 9.

Tabela 3: Valores de resistência total e potência requerida (EHP) para o casco trimarã.

Velocidade	Nº de Froude Lwl	Nº de Froude L/V ^{1/3}	Resistência (N)	Potência (W)
0,1250	0,029	0,072	0,05	0,01
0,2500	0,058	0,145	0,17	0,04
0,3750	0,086	0,217	0,35	0,13
0,5000	0,115	0,289	0,59	0,30
0,6250	0,144	0,362	0,90	0,56
0,7500	0,173	0,434	1,29	0,96
0,8750	0,201	0,506	1,71	1,49
1,0000	0,230	0,579	2,18	2,18
1,1250	0,259	0,651	3,04	3,42
1,2500	0,288	0,723	4,11	5,13
1,3750	0,317	0,796	4,71	6,47
1,5000	0,345	0,868	5,72	8,57
1,6250	0,374	0,940	7,94	12,91
1,7500	0,403	1,013	10,91	19,09
1,8750	0,432	1,085	13,86	25,98
2,0000	0,461	1,157	16,38	32,75
2,1250	0,489	1,230	18,39	39,08
2,2500	0,518	1,302	20,00	45,00
2,3750	0,547	1,374	21,33	50,67
2,5000	0,576	1,447	22,53	56,31
2,6250	0,604	1,519	23,65	62,08
2,7500	0,633	1,591	24,77	68,13
2,8750	0,662	1,664	25,92	74,51
3,0000	0,691	1,736	27,10	81,29
3,1250	0,720	1,808	28,34	88,55
3,2500	0,748	1,881	29,63	96,29
3,3750	0,777	1,953	30,97	104,52
3,5000	0,806	2,025	32,34	113,19
3,6250	0,835	2,098	33,77	122,43
3,7500	0,863	2,170	35,23	132,13
3,8750	0,892	2,242	36,75	142,41
4,0000	0,921	2,315	38,31	153,25
4,1250	0,950	2,387	39,88	164,51
4,2500	0,979	2,459	41,49	176,31
4,3750	1,007	2,532	43,17	188,89
4,5000	1,036	2,604	44,83	201,72
4,6250	1,065	2,676	46,52	215,17
4,7500	1,094	2,749	48,29	229,37
4,8750	1,122	2,821	50,12	244,33
5,0000	1,151	2,893	51,80	259,02

A Tabela 3 auxilia na avaliação da variação do número de Froude, resistência ao avanço e potência requerida. A velocidade de projeto definida para velocidade de 2 m/s apresenta

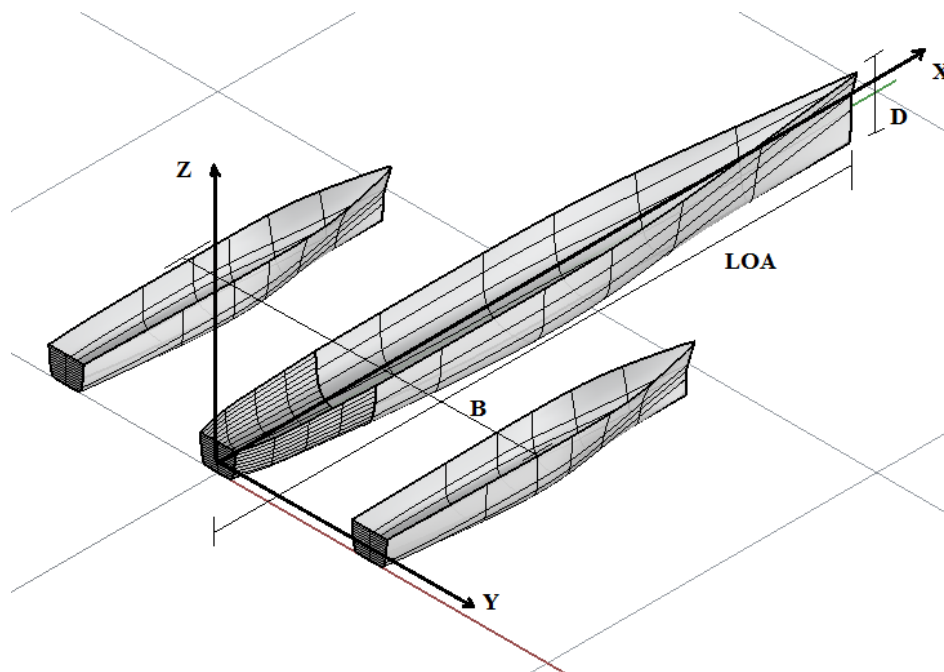
16,38 N de resistência ao avanço e 32,75 W de potência requerida. Diferentes condições de operação podem ser verificadas para diferentes velocidades.

3.2 LEVANTAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS DA FORMA

As dimensões principais do navio foram definidas de modo a atender a necessidade de arqueamento bruto com o menor peso leve e menor área de superfície molhada. Dessa forma, obtém-se menor resistência viscosa, mantendo estabilidade, deslocamento requerido e borda livre suficiente para que não ocorra alagamento.

As linhas de forma foram desenvolvidas com o intuito de se ter uma forma esbelta, note que a proa é bem fina e engrossa chegando à meia nau característica num trimarã, vide Figura 10. A popa promove maior arqueamento, sua curvatura discreta assemelha-se a uma parábola. Nessa região de popa, serão dispostos os componentes eletrônicos e de controle, de transmissão de energia e o sistema propulsivo. O software *Rhinoceros 5.0* foi utilizado para gerar a geometria e a vista de perspectiva. O eixo de referência é posicionado inicialmente na linha de popa da embarcação, na altura do calado de 0,115 m.

Figura 10: Vista isométrica perspectiva com ênfase na popa.



Fonte: Autor.

O trimarã desenvolvido conta com um casco principal central e dois cascos simétricos menores nas laterais, esses são idênticos de modo a manter a simetria total do navio de acordo

com a linha de meia nau. As dimensões principais definidas são apresentadas na Tabela 4 para a condição de carregamento máxima (28,4 kg).

A análise hidrostática é realizada para verificação da estabilidade intacta da embarcação, além de fornecer dados que permitam avaliar como essas formas se comportam em operações de carregamento ou descarregamento. Outras informações podem ser obtidas por meio da curva de áreas e das curvas hidrostáticas, como características da forma ou no auxílio da distribuição mais adequada de peso e volumes na embarcação.

As curvas de área e as curvas hidrostáticas foram obtidas utilizando o software *Maxsurf Modeler*, assim como os coeficientes hidrostáticos, áreas e volumes da forma, entre outros dados apresentados na Tabela 4. Foram avaliadas três formas para obtenção dos dados. A primeira foi o casco trimarã, a segunda foram os cascos laterais, sem a presença do casco central e a terceira foi utilizado apenas o casco central.

Tabela 4: Características principais para trimarã com 28,4 kg de deslocamento.

	Casco Central	Cascos Laterais (2 cascos)	Trimarã
Comprimento LOA	1,95 m	0,98 m	1,95 m
Boca B	0,187 m	0,125 m	1,045 m
Pontal D	0,173 m	0,127 m	0,173 m
Calado T	0,115 m	0,069 m	0,115 m
Deslocamento Δ	16,8 kg	11,6 kg	28,4 kg
Superfície Molhada S_w	0,525 m ²	0,346 m ²	0,871 m ²
L/B	10,43	7,84	1,87
B/D	1,08	0,98	6,04
$L/V^{1/3}$	7,61	5,52	6,42
C_B	0,477	0,520	0,298
C_P	0,574	0,609	0,539
C_{WP}	0,722	0,535	0,535
C_M	0,843	0,734	0,734

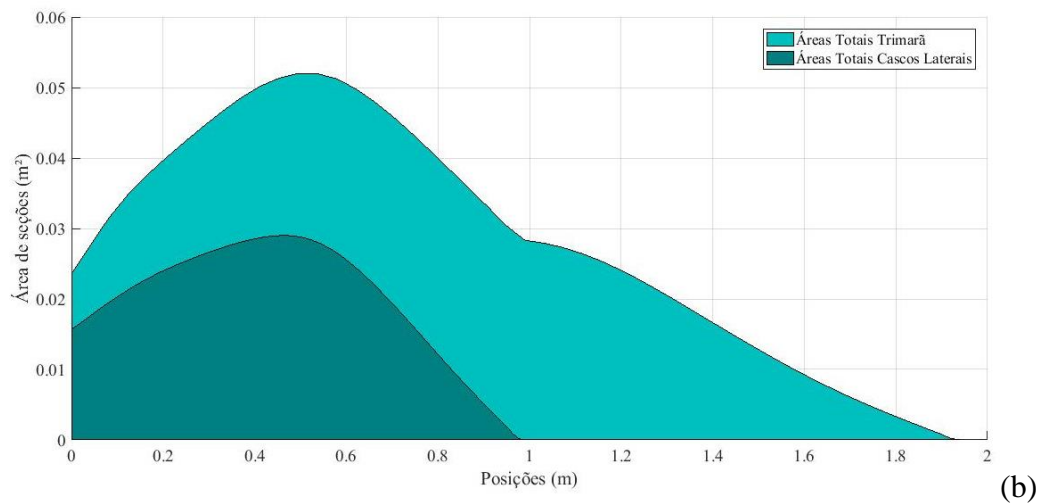
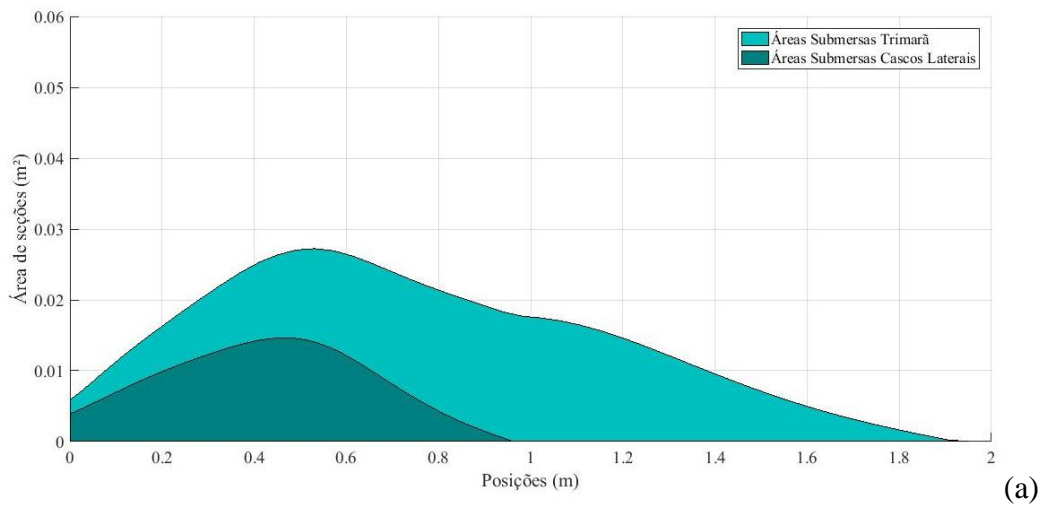
As dimensões principais apresentadas para as três configurações (central, lateral e trimarã) fornece dados importantes para melhor avaliação da forma e espaços vazios. Esses vazios são percebidos quando comparados o retângulo formado por B x LOA (1,045 x 1,95) m às dimensões isoladas do casco central (0,187 x 1,95) m e do casco lateral (0,125 x 0,98) m.

Essa diferença pode ser notada nos valores de C_B que é muito menor quando avaliado o trimarã. A relação L/B também apresenta grande diferença por relacionar as dimensões apresentadas anteriormente. Características como LOA, D e T apresentam medidas iguais para o trimarã e o casco central por esse casco definir as extremidades, sendo maior que os cascos laterais.

3.2.1 Curvas de áreas

A curva de áreas de seções apresenta uma indicação da forma do casco ao longo do comprimento, a partir da definição das áreas por seções, a ideia do volume e do tipo de embarcação é obtida. Essa representação é importante para auxiliar no posicionamento de equipamentos e na estimativa inicial de distribuição do peso da estrutura. As curvas de áreas do casco trimarã são apresentadas na Figura 11.

Figura 11: Curvas de áreas do casco trimarã, onde (a) são áreas submersas, e (b) são áreas totais.



Fonte: Autor.

Na figura 11, em (a) são destacadas as curvas de áreas submersas dos dois cascos laterais e do trimarã. A área máxima da seção é obtida na posição 0,532 m e tem valor igual a 0,027 m². Essa posição foi utilizada para estimar a localização longitudinal do centro de gravidade da carga distribuída na embarcação. Em (b) apresentam-se as curvas de seções de áreas totais para os cascos laterais e do trimarã. A área máxima da seção é obtida na posição 0,495 m e tem valor igual a 0,052 m². Essa posição fornece uma ideia da região que se localiza o centro volumétrico do trimarã.

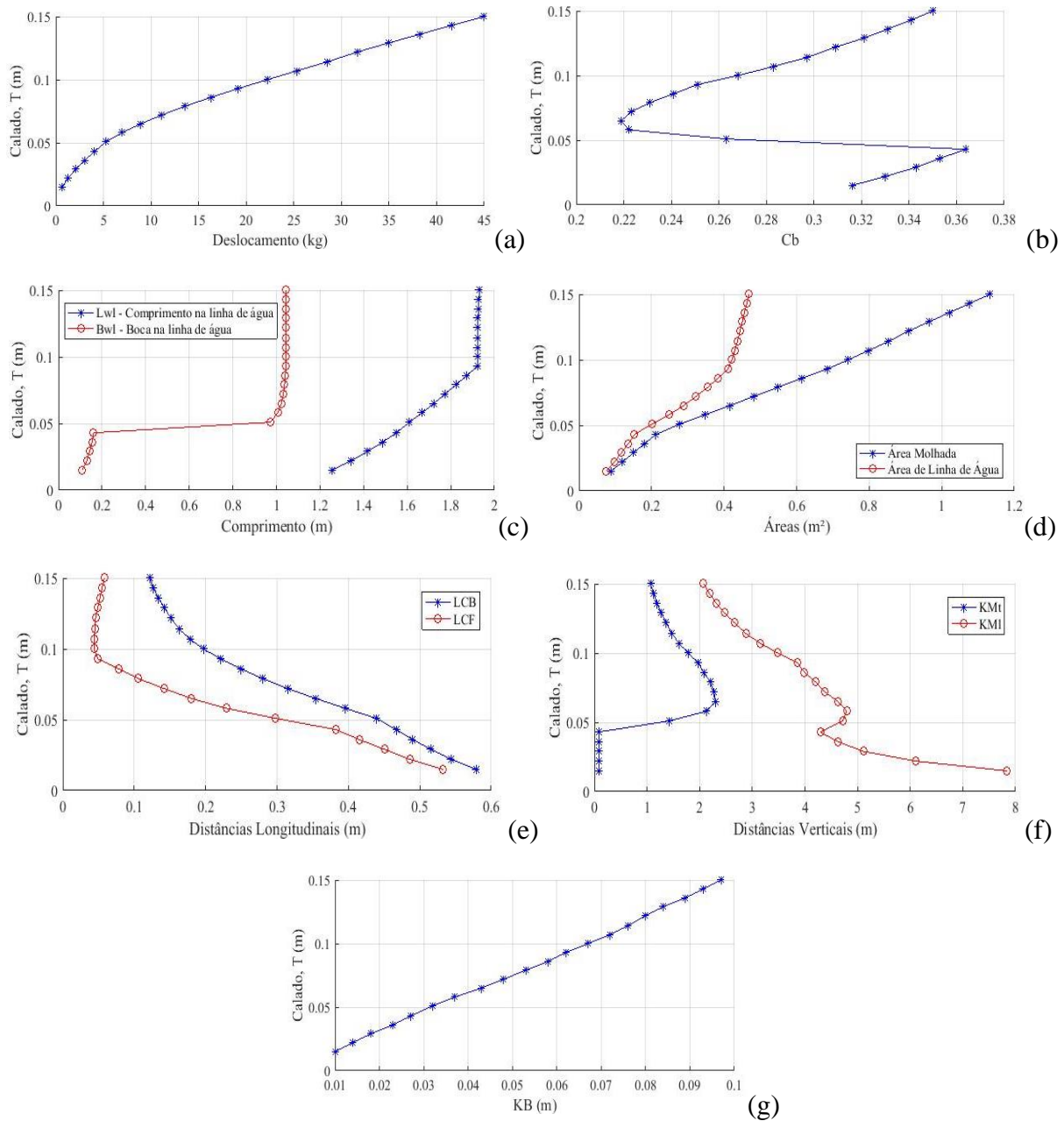
Os cascos laterais possuem 0,98 m de comprimento e estão posicionados na mesma linha de popa do casco central. Nesta região é possível observar um comportamento menos uniforme. Em (a) é possível avaliar que modo qualitativo a resistência ao avanço da embarcação. Em (b) é possível verificar quais as regiões mais indicadas para posicionamento de equipamentos e auxiliar na compartimentação.

3.2.2 Curvas hidrostáticas

As curvas hidrostáticas são importantes para avaliar condições de estabilidade e carregamento. O comportamento das propriedades hidrostáticas da embarcação é apresentado nessas curvas, em que a variação do calado não considera trimado na embarcação. A análise dessas curvas pode definir os limites de mínimo e máximo de operação.

As curvas hidrostáticas são apresentadas separadamente na Figura 12. Na análise de comportamento das propriedades hidrostáticas, a variação de calado ocorre para a faixa de 0,015 m até 0,15 m. O eixo de referência adotado localiza-se no plano de flutuação distante em x de 0,587 m da linha de popa.

Figura 12: Curvas hidrostáticas do trimarã. Com (a) deslocamento, (b) coeficiente C_b , (c) L_{wl} e B_{wl} , (d) área molhada e área de linha de água, (e) LCB e LCF , (f) KM_T e KM_L , e (g) KB apresentados variando o calado de 0,015 m até 0,15 m.



Fonte: Autor.

Na Figura 12, em (a), apresenta-se o deslocamento variando com o calado. Inicialmente essa curva possui uma inclinação maior (presença apenas do casco central) que modifica para uma inclinação menor (presença dos três cascos), aumentando rapidamente o deslocamento com o aumento do calado. Essa variação apresenta os calados obtidos para diferentes condições de carregamento.

A curva do coeficiente de bloco C_B é apresentada em (b). Inicialmente elevado e passa por uma redução brusca na presença dos cascos laterais. O valor de C_B é utilizado no cálculo do coeficiente de esteria que influencia diretamente na resistência ao avanço.

A curva de boca na linha da água apresenta grande variação em torno do calado 0,05m. Isso ocorre inicialmente devido apenas à presença do casco central, quando os cascos laterais entram em contato com a água, ocorre o aumento da boca que segue com pequena variação. E na curva de comprimento na linha d'água é possível verificar a contribuição do casco central, e o momento no qual a popa entra totalmente em contato com a água. Essas curvas apresentam-se em (c).

As curvas de área de superfície molhada e área de linha de água são apresentadas em (d). A curva de área de linha de água varia pouco entre os calados 0,1m e 0,15m mesmo com o aumento da área de superfície molhada. Isso ocorre devido à forma transom na popa e do costado reto para esses calados. A área molhada influencia diretamente na resistência por atrito.

Em (e), apresentam-se as curvas LCB e LCF, em que LCB é a distância referente à posição longitudinal do centro de carena. Essa distancia é medida tomando como referência o eixo adotado como centro geométrico do trimarã. Pode ser observado o comportamento de aproximação do valor ao zero, com o aumento de calado. O LCF é a distância longitudinal do centro de flutuação com o eixo adotado. Esses valores têm influencia sobre a estabilidade longitudinal da embarcação. Esse eixo localiza-se a 0,587 m da perpendicular de popa.

As variações das curvas KM_T e KM_L com o calado são apresentadas em (f). Inicialmente, devido à forma fina do casco na proa e essa corresponder a quase o total do volume deslocado, o KM_T , altura metacêntrica transversal, é aproximadamente zero. O comportamento do KM_L , altura metacêntrica longitudinal, diminui com o aumento do calado. A dedução do valor de KB sobre as curvas fornece os valores de BM_T e BM_L dos quais podem ser obtidas as inércias relacionando o deslocamento. Esses valores são importantes na avaliação da estabilidade transversal e longitudinal, respectivamente.

Em (g), apresenta-se a curva KB com o comportamento da distância vertical da quilha ao centro de empuxo. Essa curva aumenta com o aumento do calado. Seu valor compõe o centro de carena CB.

3.2.3 Estimativa de pesos e cálculo do CG

O deslocamento avaliado da embarcação de 28,4 Kg corresponde a uma massa de 27,7 Kg. Essa massa total é composta por peso do casco, dos componentes eletrônicos, do *Pod*, do painel fotovoltaico e carga.

O peso do casco é avaliado utilizando o valor obtido pela área total de superfície dos cascos e a densidade do material utilizado. Para modelos reduzidos, um material que pode ser bem empregado é o polímero expandido, como uma espuma de densidade elevada para permitir o processo de laminação.

Diversas opções da espuma estão disponíveis no mercado. A opção escolhida para a embarcação foi espuma de PVC. “A espuma de PVC é um material sandwich que possibilita a construção de estruturas altamente leves e resistentes que necessitam de uma perfeita combinação entre alta resistência mecânica, baixo peso, grande elasticidade, resistência à alta temperatura, assim como excelentes propriedades de isolamento térmico e boa resistência química. Fabricada em diversas densidades (45-60-80-100-130 kg/m³) a partir de PVC expandido, com estrutura de célula fechada, ela não absorve umidade e não degrada com o tempo. A Espuma de PVC é compatível com qualquer tipo de fibra estrutural e sistema de resina e pode ser processada em diversas faixas de temperaturas. Ela é o material perfeito para resistir a cargas dinâmicas e pode ser utilizada em laminação manual, laminação à vácuo, RTM, infusão ou com o uso de preregs.” (BARRACUDA, acesso em: 05 agosto de 2018).

O peso é avaliado para uma densidade intermediária de 80 Kg/m³ e uma espessura de 8 mm. Para a área total do casco igual a 1,185 m², o peso da estrutura sem laminação é estimada em 0,76 Kg. Com a aplicação de fibra mais resina (1,2 g/cm³) e espessura de 1 mm em toda a superfície externa, o peso total é estimado em 1,42 Kg. Fornecendo um peso total de 2,18 Kg.

Os pesos dos componentes eletrônicos devem corresponder a menor parcela na composição dos pesos. Os que apresentam maior contribuição são o MPPT e as baterias, destacados no capítulo 4. O peso do MPPT fornecido pelo catálogo é de 0,6 Kg. Adicionando os outros componentes de controle o peso total pode ser estimado em torno de 1,5 Kg.

O peso do *Pod* corresponde à estrutura da vagem apresentada utilizando um material que seja bom condutor térmico para tocar calor entre a camera que recebe o motor e o meio que é a água do mar. O alumínio pode ser empregado nesta estrutura. Com densidade de 2700 Kg/m³, a estimativa de peso para o volume da estrutura em alumínio da vagem é

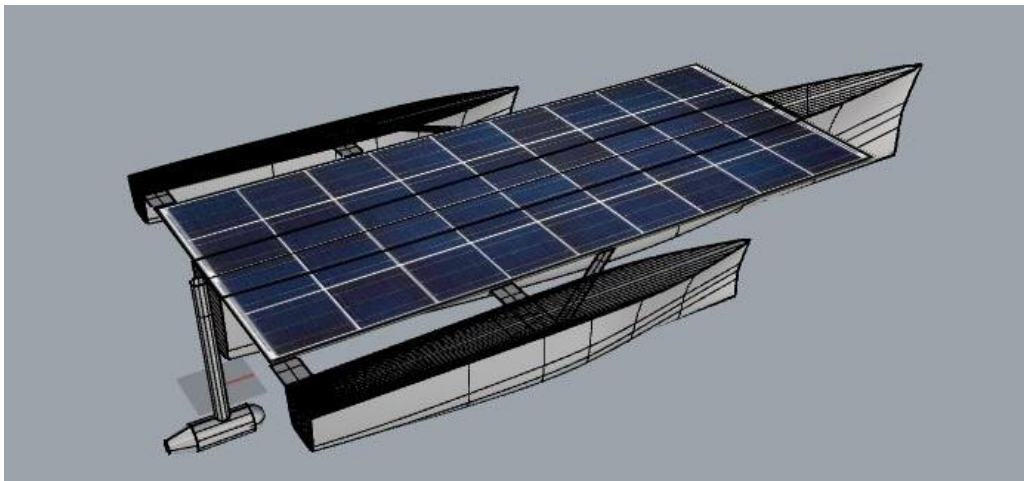
aproximadamente 200 cm³. O peso total é estimado em 0,54 Kg. Com adição de motor, eixo e hélice, o peso da estrutura é estimado em 0,8 Kg.

O peso do painel fotovoltaico é fornecido pelo fabricante. Corresponde à uma parcela elevada no cálculo de pesos totais, visto que a estrutura utilizada para sustentação desses painéis é robusta. O catálogo apresenta o peso do painel igual a 12,9 Kg.

A carga que pode ser transportada pelo projeto é dependente dos valores calculados anteriormente. Visto que não foi definida uma limitação ou aplicação para transporte de carga. Subtraindo os pesos obtidos do peso total disponível de 27,7 Kg, O peso de carga que pode ser transportada é de 10,32 Kg.

A Figura 13 apresenta a localização do painel e do sistema de propulsão *Pod* na embarcação. Para o eixo de referência adotado como apresentado na Figura 10, o zero está posicionado na perpendicular de popa e altura igual ao calado, 0,115 da linha de base. Os valores do centro de gravidade (CG) serão tomados adotando esse eixo.

Figura 13: Casco trimarã com painel e propulsor.



Fonte: Autor.

O cálculo do CG para cada componente têm suas posições estimadas com componentes x, y e z definidas no vetor (x y z) apresentado na Tabela 5. Para a estrutura do casco o CG é adotado no centro volumétrico (0,587 0,000 -0,062). O MPPT e os componentes eletrônicos podem ser posicionados ao longo de quase todo o comprimento da embarcação. Mas preferencialmente esses componentes devem estar próximos do painel solar e do sistema de propulsão. A posição do CG adotado foi para o MPPT (0,300 0,000 0,000) e para os componentes (0,200 0,000 0,000). Para a estrutura do *Pod*, o braço que sustenta a estrutura deve ser avaliado e a posição estimada é de (-0,050 0,000 -0,230). O painel fotovoltaico possui CG estimado em (0,750 0,000 0,081), considerando o pontal e a espessura do painel. A

carga é avaliada utilizando a medida obtida na curva de áreas para a região de maior área transversal disponível. Estimada em (0,532 0,000 -0,050).

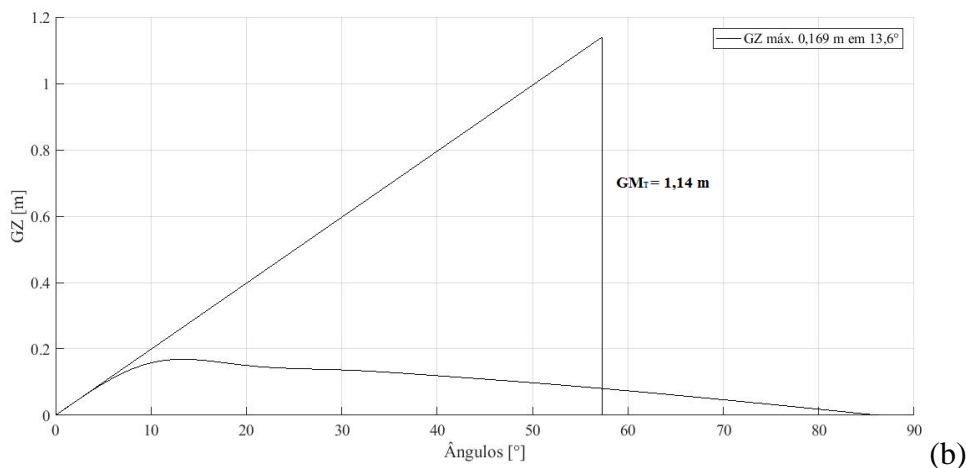
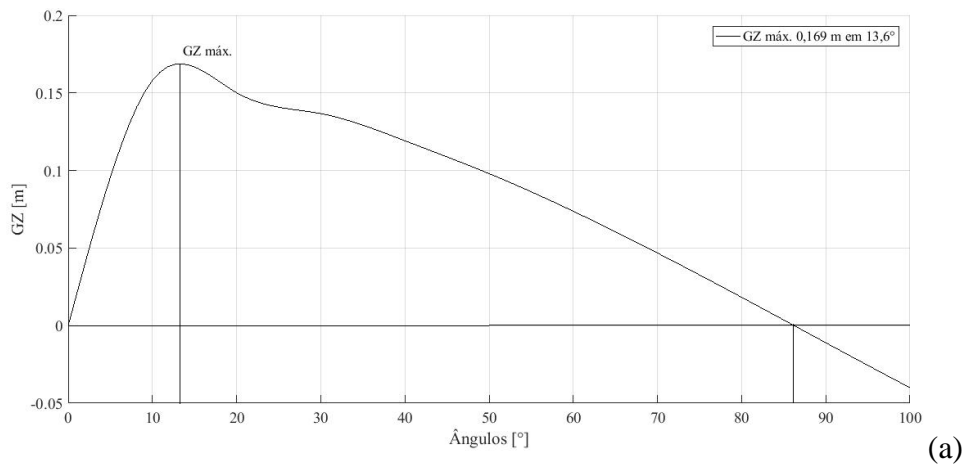
A Tabela 5 apresenta os pesos avaliados e o centro de gravidade correspondente a cada componente.

Tabela 5: Componentes do peso da embarcação com seus respectivos centros de gravidade.

Componentes	Peso [Kg]	Centro de Gravidade, CG [m]
Estrutura dos cascos	2,18	(0,587 0,000 -0,062)
MPPT	0,6	(0,300 0,000 0,000)
Bateria e outros eletrônicos	0,9	(0,200 0,000 0,000)
Estrutura do <i>Pod</i>	0,8	(-0,050 0,000 -0,230)
Painel Fotovoltaico	12,9	(0,750 0,000 0,081)
Carga	10,32	(0,532 0,000 -0,050)
Total e médias	27,7	(0,605 0,000 0,008)

Utilizando esses dados de entrada no software *Maxsurf* é possível obter a estabilidade para grandes ângulos avaliada pela curva do braço GZ apresentada na Figura 14.

Figura 14: Curva GZ do casco trimarã.



Fonte: Autor.

O braço GZ apresentado na Figura 14 tem inclinação elevada para pequenos ângulos, de forma que o valor do $GM_T = 1,14$ m avaliado pela altura em que a reta com mesma inclinação interseca a reta vertical no ângulo de $57,3^\circ$. O valor máximo do GZ em $13,6^\circ$ representa o ponto de maior braço de restauração que a embarcação pode ter igual a $0,169$ m. O limite de estabilidade ocorre para o ângulo de 86° . A partir desses dados é possível inferir que a embarcação apresenta boa estabilidade transversal.

3.3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO EM ONDAS REGULARES UTILIZANDO WAMIT

Uma forma de avaliar a estabilidade dinâmica do navio é através das respostas do mesmo quando é excitado em ondas, motivo pelo qual são apresentadas nesta seção as características hidrodinâmicas para depois concluir em relação ao comportamento do navio.

Os coeficientes hidrodinâmicos principais que são avaliados comumente são a massa adicional, que caracteriza a influência das camadas de água ao redor do casco, dependendo, assim, da forma do casco e aceleração do corpo. Outro coeficiente é o amortecimento, que, no presente projeto, somente será avaliada a forma potencial do mesmo. Esse coeficiente está associado à energia que pode ser extraída do movimento do corpo e que é transformada em ondas de radiação. Por último, temos a restauração do navio intrinsecamente ligada à hidrostática linear e não linear do navio.

Para a análise no WAMIT foi necessário obter as inércias de massa para compor a matriz de massa do trimarã. O eixo adotado como referência localiza-se no centro volumétrico com distância longitudinal $X = 0,587$ m da popa. As inércias foram obtidas utilizando o software SSTAB a partir da definição dos volumes. Os dados obtidos são apresentados na Tabela 6 a seguir.

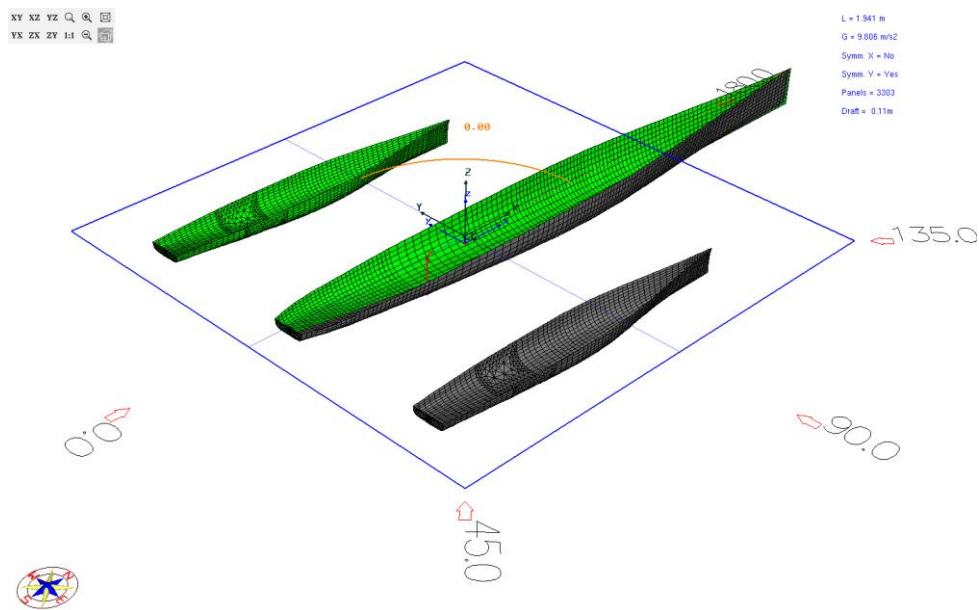
Os valores apresentados na Tabela 6 são necessários para compor a matriz de massas utilizada como entrada no programa. Para análise são definidos ainda a faixa de período ou frequência e o aproamento das ondas regulares.

Tabela 6: Dados de entrada do WAMIT. Valores de massa, Inércia e raio de giro.

Medida	Valor	Unidade
M	0,028400	T
Ixx	0,000001	t.m ²
Iyy	0,000459	t.m ²
Izz	0,000459	t.m ²
Ixy	0,000000	t.m ²
Ixz	0,000018	t.m ²
Iyz	0,000000	t.m ²
Mxg	0,003584	t.m ²
Myg	0,000000	t.m ²
Mzg	0,000140	t.m ²

A Figura 15 apresenta a malha utilizada para análise do comportamento do trimarã submetido a ondas regulares no WAMIT.

Figura 15: Malha desenvolvida para análise WAMIT.

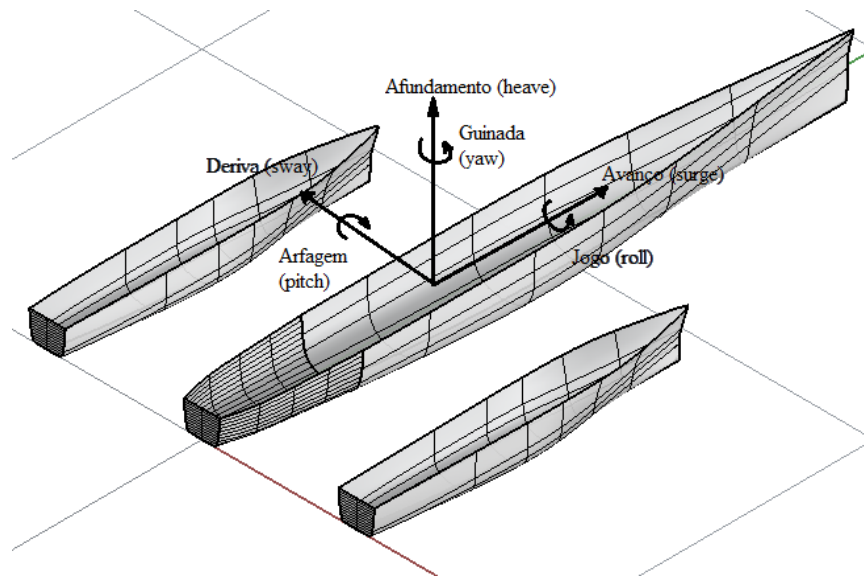


Fonte: Autor.

Como apresentado na Figura 15, foram avaliados 5 aproamentos (0° , 45° , 90° , 135° e 180°), são apresentadas apenas as condições críticas para os seis graus de liberdade da embarcação. O número total de painéis na malha desenvolvida foi igual a 6606.

A Figura 16 apresenta a nomenclatura dos movimentos nos graus de liberdade correspondentes.

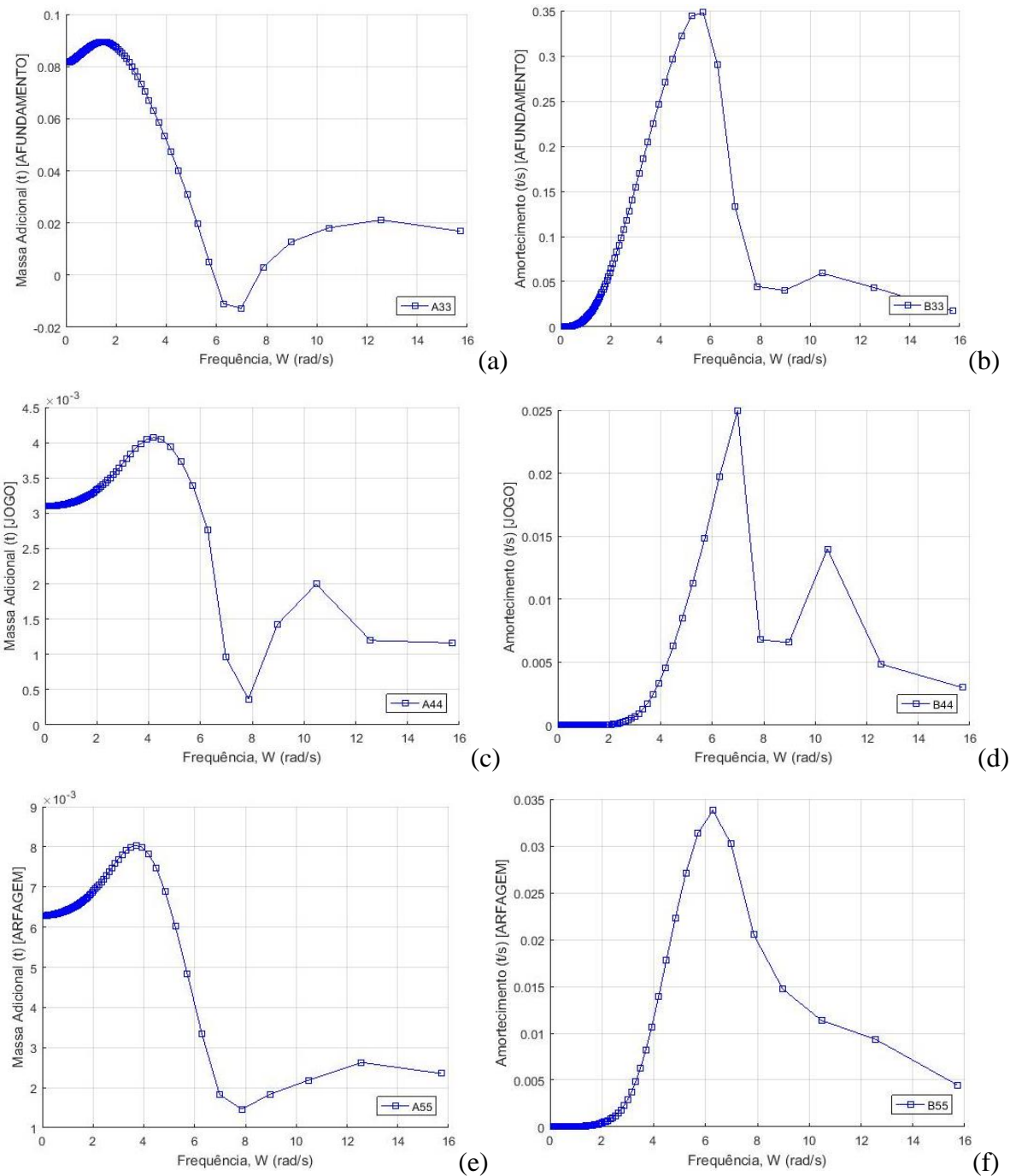
Figura 16: Movimentos do navio nos seis graus de liberdade.



Fonte: Autor.

A seguir, apresentam-se os dados gerados com o software WAMIT. A faixa de período adotada foi de 0,4 s até 50,3 s, avaliando-se 500 pontos no intervalo. Para facilitar a apresentação dos coeficientes hidrodinâmicos, força, momentos excitantes e RAO, foi gerado um código computacional em MATLAB, vide APÊNDICE I. A Figura 17 apresenta a massa adicional e o amortecimento para os movimentos que possuem restauração, afundamento, jogo e arfagem.

Figura 17: Massa adicional na primeira coluna e amortecimento na segunda coluna para os movimentos de afundamento (a, b), jogo (c, d) e arfagem (e, f).



Fonte: Autor.

Na figura 17, em (a) e (b), apresentam-se como muda a massa adicional e amortecimento, respectivamente, para diferentes ondas incidentes sobre a embarcação. A massa adicional em afundamento (*heave*) tem o pico em torno da frequência 1,75 rad/s de 0,09 t. Para a região entre as frequências 6 - 7 rad/s são apresentadas massas adicionais negativas possivelmente devido a interferência entre os cascos. O amortecimento no mesmo

movimento cai para frequências mais altas, o que indica que o navio não está irradiando ondas.

Em (c) e (d), apresentam-se como muda a massa adicional e amortecimento em jogo. A massa adicional tem pico em torno de 4 rad/s, região da frequência natural. O amortecimento apresenta dois picos para o movimento de jogo. Isto deve ocorrer pela irradiação de ondas devido ao casco central no primeiro pico e dos cascos laterais no segundo pico.

Em (e) e (f), apresentam-se como mudam a massa adicional e o amortecimento com o aumento da frequência. A massa adicional em arfagem (*pitch*) tem pico em torno de 3,75 rad/s, sua região de frequência natural. O amortecimento para o mesmo movimento tende para zero com o aumento da frequência, o que indica que o navio não está irradiando ondas.

Na Tabela 7, apresentam-se os valores obtidos para massa adicional, amortecimento e restauração para os movimentos avaliados.

Tabela 7: Coeficientes hidrodinâmicos de massa adicional, amortecimento e restauração.

A33(máx.)	A44(máx.)	A55(máx.)
0,09 t	0,004 t	0,008 t
B33 (máximo)	B44 (máximo)	B55(máximo)
0,35 t/s	0,025 t/s	0,034 t/s
C33(adimensional)	C44(adimensional)	C55(adimensional)
0,116048	0,002704	0,005572

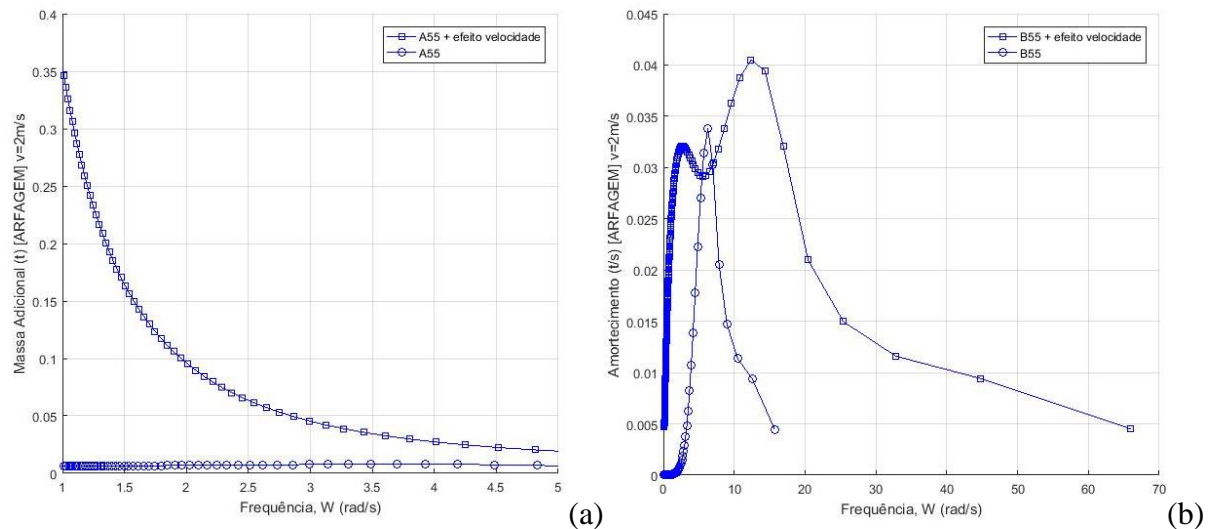
A partir desses dados, obtêm-se os valores da frequência natural não amortecida do movimento de afundamento W_{n3} igual a 1,725 rad/s, a frequência natural não amortecida do movimento de jogo é W_{n4} igual a 4,958 rad/s e a frequência natural não amortecida do movimento em arfagem é W_{n5} igual a 3,183 rad/s. Esses dados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Valores obtidos para frequência e período naturais correspondentes.

W_{n3}	W_{n4}	W_{n5}
1,725 rad/s	4,958 rad/s	3,183 rad/s
T_{n3}	T_{n4}	T_{n5}
3,642 s	1,267 s	1,974 s

A velocidade de avanço adotada no projeto de 2m/s tem influência sobre o movimento de arfagem. Modificando os valores de A_{55} e B_{55} . Esses são obtidos adicionando-se a componente da velocidade que relaciona a frequência de encontro, w_e , e os coeficientes, adotando a direção de incidência de onda de 180° . A Figura 18 apresenta a massa adicional e amortecimento para o movimento de arfagem com ação da velocidade.

Figura 18: Massa adicional e amortecimento (A_{55} , B_{55}) com efeito da velocidade.



Fonte: Autor.

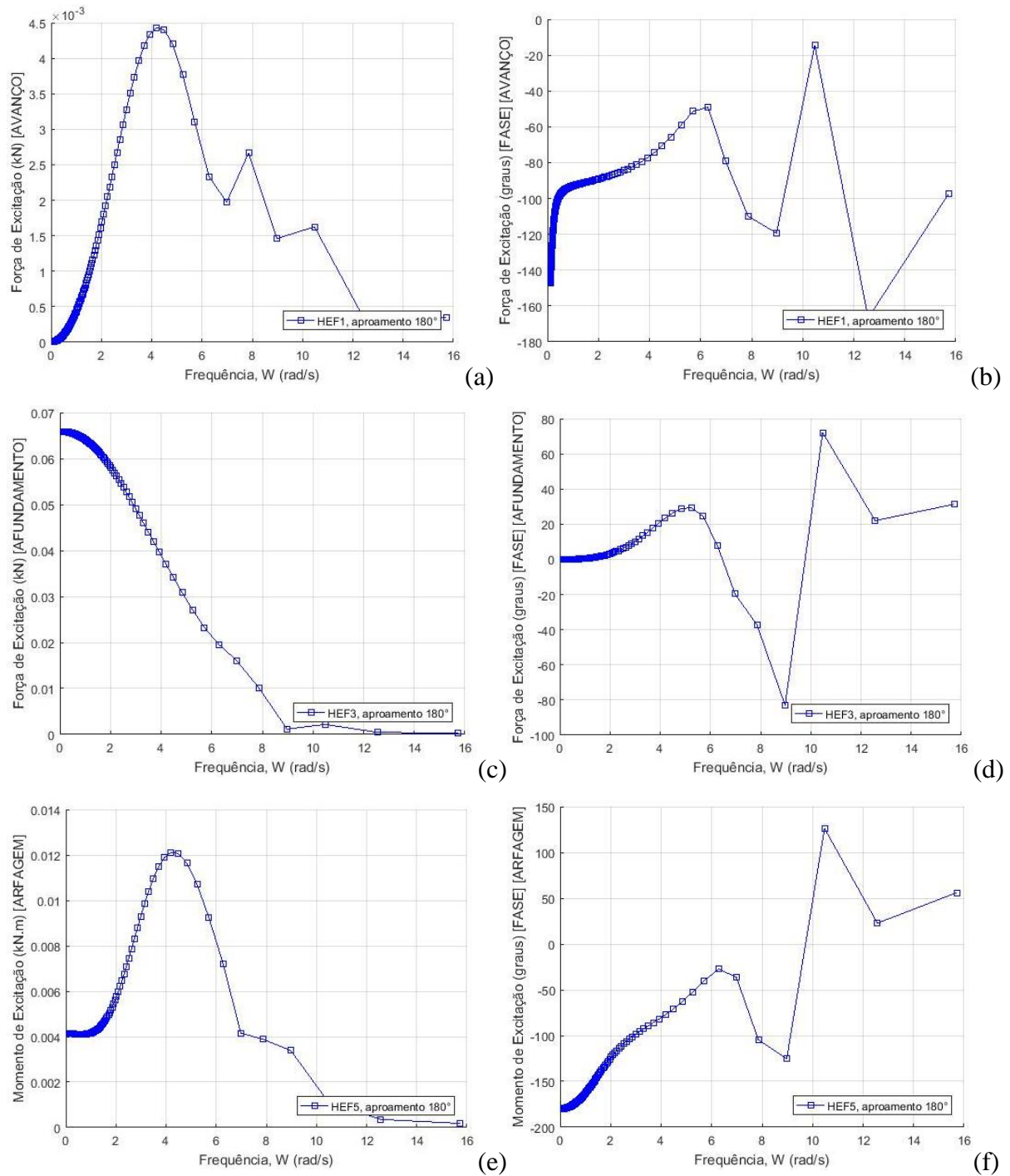
Na Figura 18, apresentam-se (a) massa adicional e (b) amortecimento em arfagem com a contribuição da velocidade, sobreposto aos coeficientes sem contribuição da velocidade. Em (a), a massa adicional inicia com valor alto para frequência baixa, efeito que pode ser percebido pela parcela da contribuição da velocidade, razão ao quadrado da velocidade(constante) por frequência multiplicado pelo amortecimento. O amortecimento possui valor inicial diferente de zero elevando o valor da massa adicional com contribuição da velocidade. Com o aumento da frequência ocorre a diminuição dessa relação, ficando com valores próximos ao da condição sem velocidade. Em (b), nota-se o mesmo efeito, diferindo os valores de baixa frequência para o amortecimento sem velocidade que são próximos a zero. Isso ocasiona o primeiro pico, posteriormente ocorre o segundo pico devido ao aumento da parcela de amortecimento.

3.3.1 Forças e Momentos de Excitação

As forças e momentos de excitação aplicada à embarcação provocam a reação dessa embarcação em resposta à presença das ondas. São avaliados os aproamentos de 90° e 180° para os graus de liberdade que apresentam maior intensidade de respostas apresentadas no

RAO avaliados na seção seguinte. A seguir, na Figura 19, apresentam-se os dados gerados pelo WAMIT.

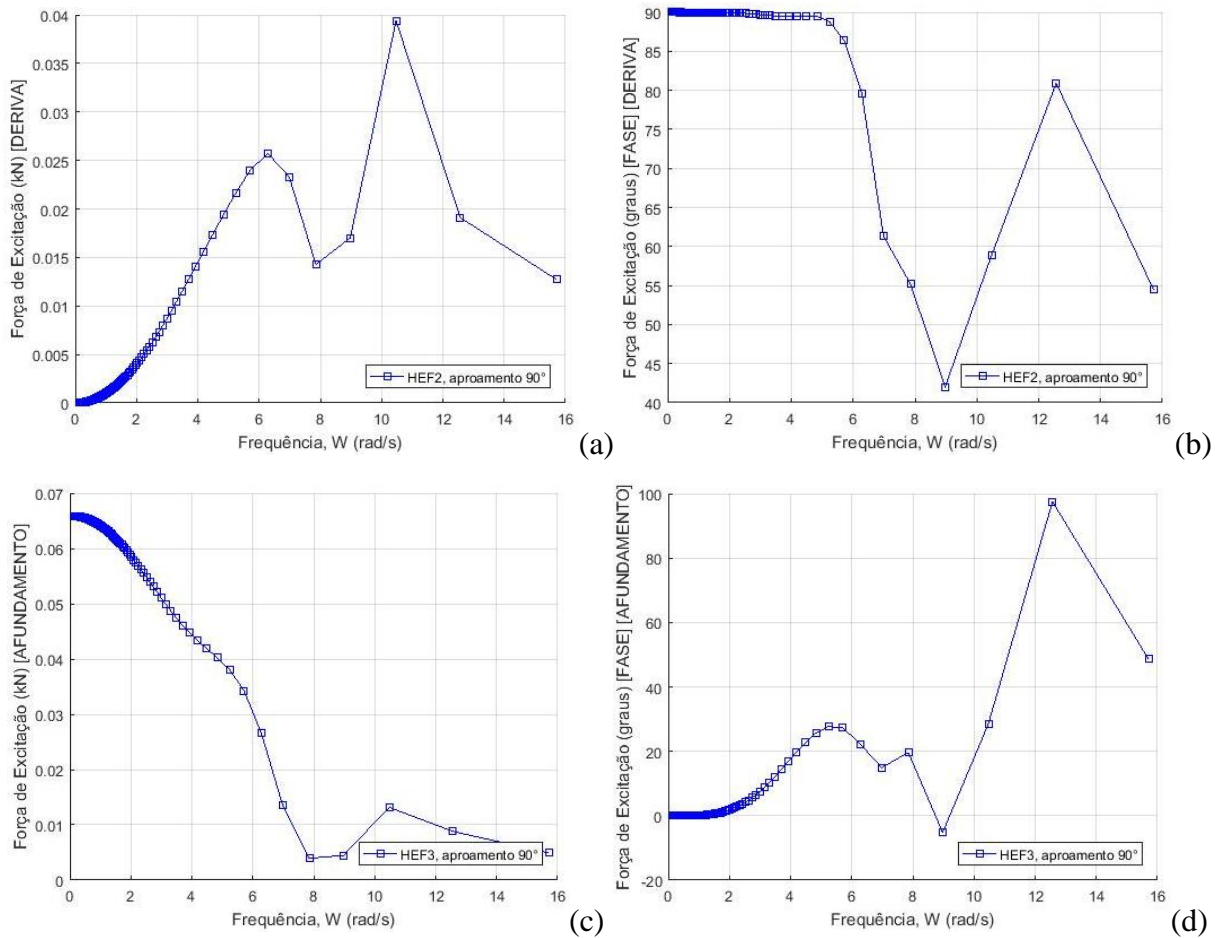
Figura 19: Forças e momento excitante para aproamento de 180° avaliados para o movimento de avanço (a, b), afundamento (c, d), arfagem (e, f). Onde a primeira coluna é o módulo e a segunda é a fase.

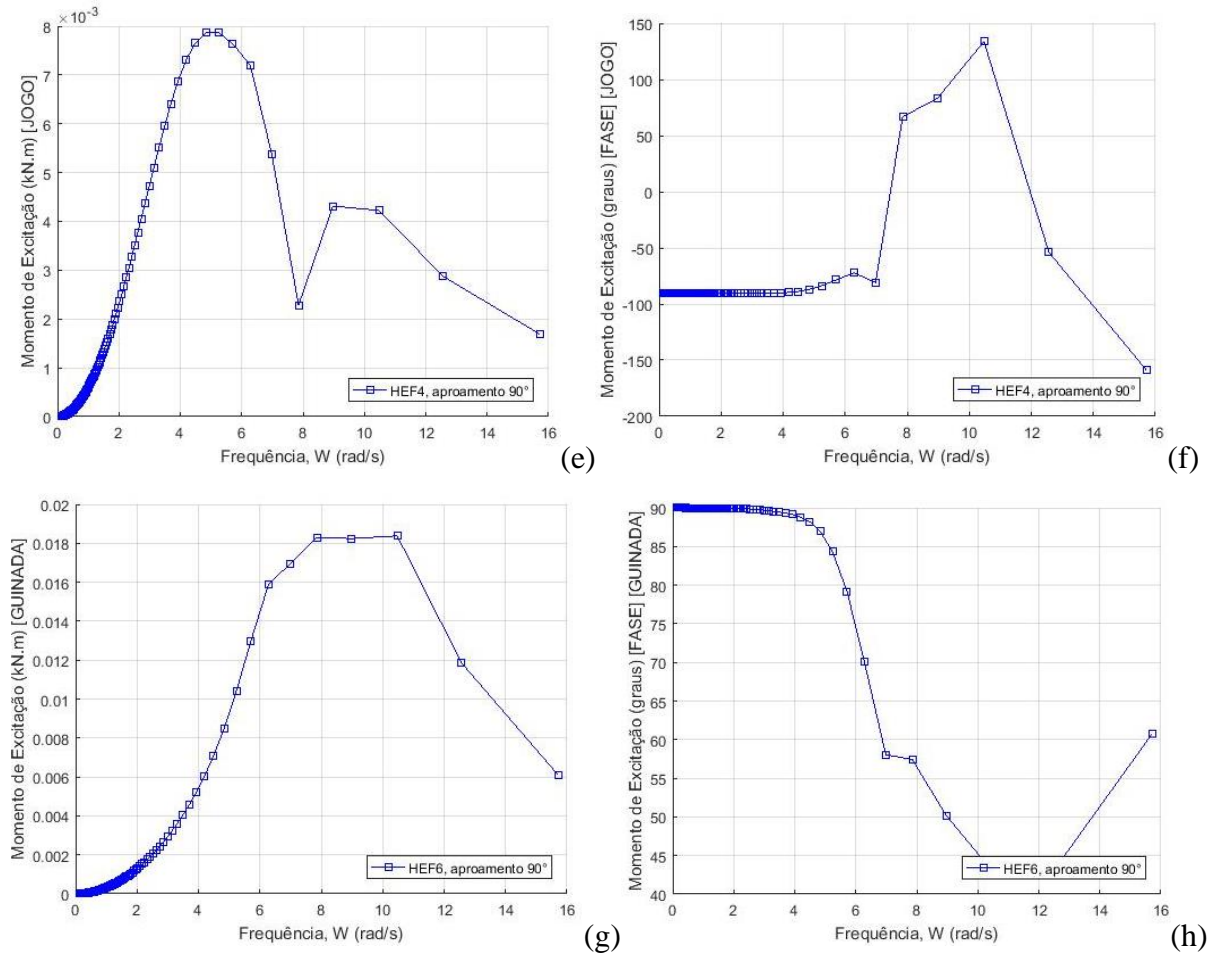


Fonte: Autor.

Na Figura 19, tem-se o módulo e fase dos movimentos com onda incidindo pela proa (aproamento 180 graus). Em que (a), (c) e (e) são os módulos avaliados para os movimentos de avanço, afundamento e arfagem, respectivamente. Em (b), (d) e (f) são as fases para os movimentos correspondentes.

Figura 20: Forças e momentos excitantes para aproamento de 90° avaliados para o movimento de deriva (a, b), afundamento (c, d), jogo (e, f) e guinada (g, h). Onde a primeira coluna é o módulo e a segunda é a fase.





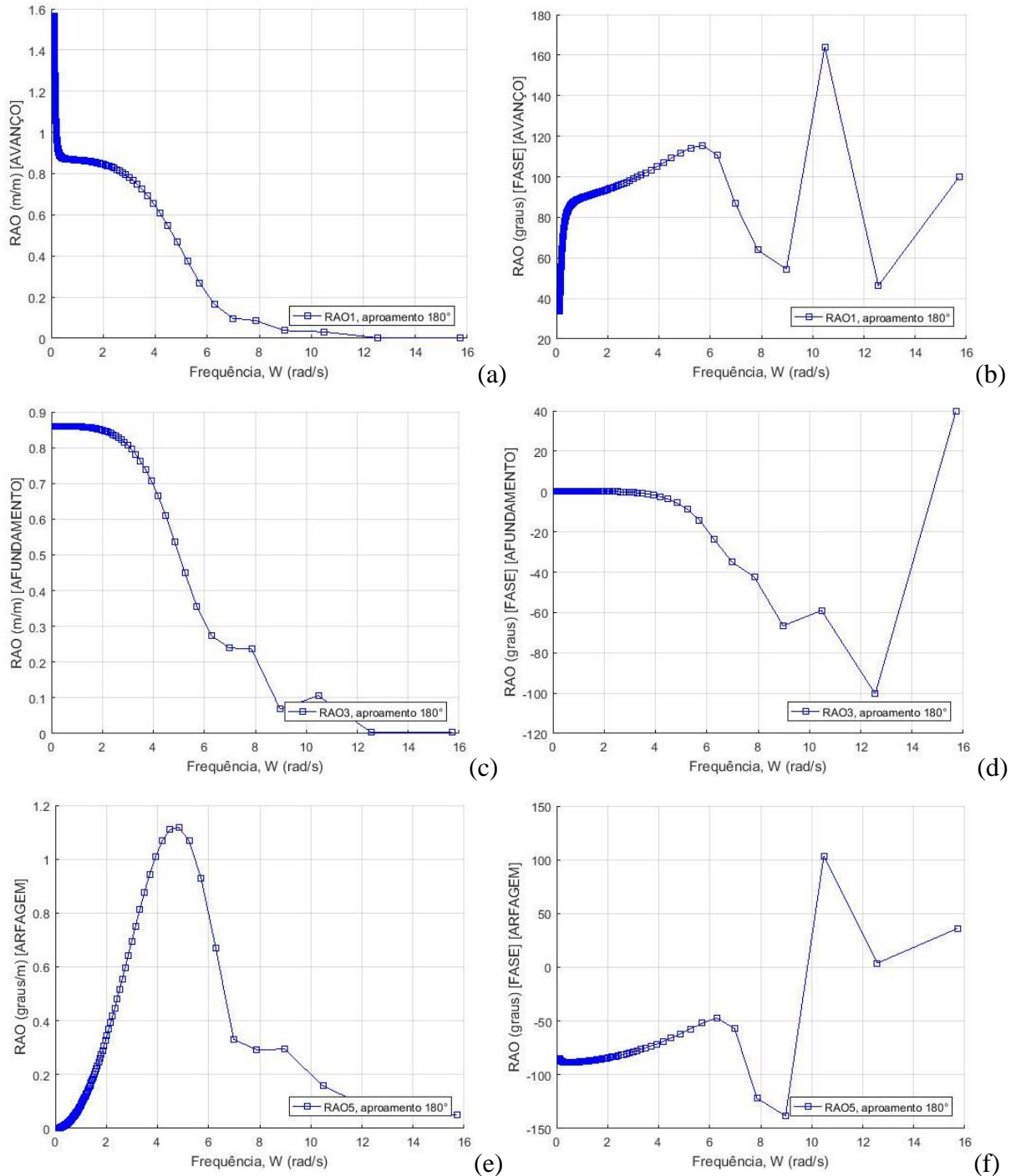
Fonte: Autor.

Na Figura 20, tem-se o módulo e fase dos movimentos com onda incidente em estibordo ou boreste (aproamento 90 graus). Em (a), (c), (e) e (g) são apresentados os módulos da força em deriva, em afundamento, o momento em jogo e em guinada. Em (b), (d), (f) e (h) apresentam as fases para os movimentos correspondentes.

3.3.2 Operador de Amplitude de Resposta (RAO)

Esta seção apresenta como o trimarã responde quando é excitado com ondas regulares de diferentes tamanhos com aproamentos de 180° e 90°. Nas Figuras 21 e 22 são avaliadas as respostas do trimarã sem ação da velocidade.

Figura 21: RAO dos movimentos, onde a primeira coluna apresenta o módulo, e a segunda a fase. Avaliados com aproamento de 180° para os movimentos de avanço (a, b), afundamento (c, d) e arfagem (e, f).

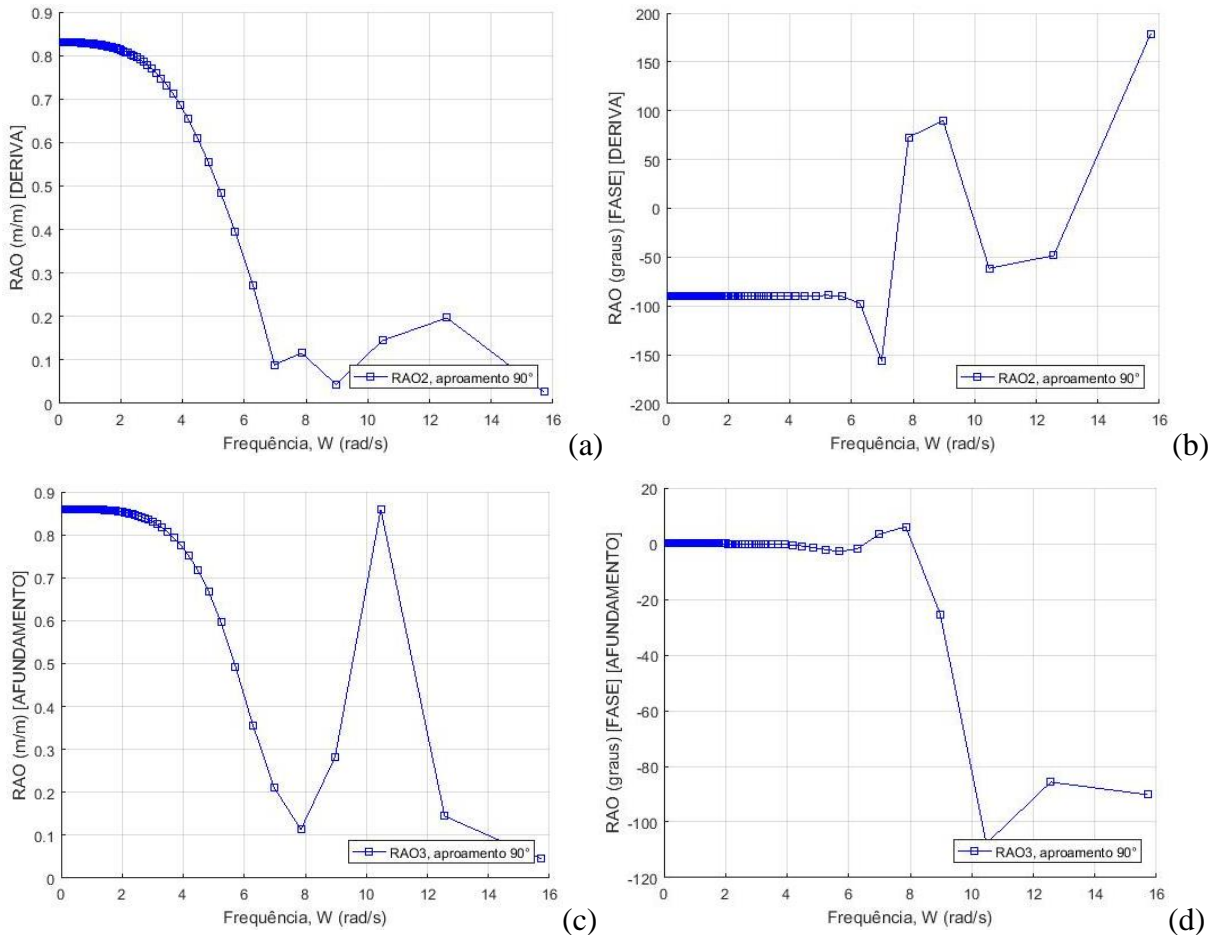


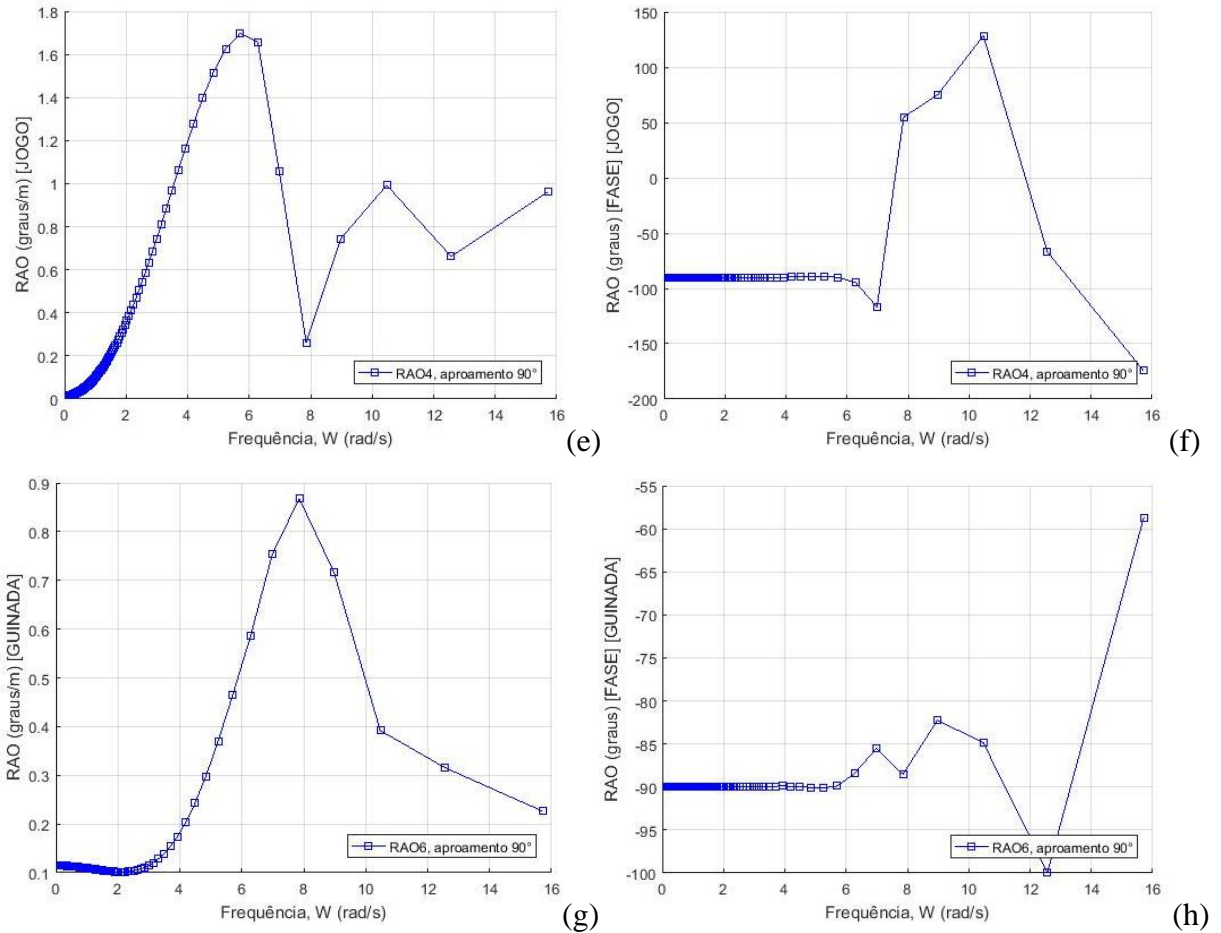
Fonte: Autor.

Na Figura 21, apresentam-se os RAOs para os movimentos com aproamento de 180° . Em (a), apresenta-se o módulo do RAO para o movimento de avanço, o trimarã comporta-se bem estável, para frequências maiores que 1 rad/s o movimento não acompanha a onda,

diminui com o aumento da frequência. Em (c), apresenta-se o módulo do RAO para o movimento de afundamento. O trimarã comporta-se bem estável, ou seja, quando excitado com ondas longas as amplitudes de resposta sempre se aproxima à amplitude da onda. As amplitudes caem em relação à amplitude da onda, sempre se mantêm menores. Em (d), a defasagem para baixas frequências ficam em 0° , o que indica que o trimarã entra em fase com a onda. Em (e), apresenta-se a resposta do trimarã em arfagem, que mostra o valor máximo de $1,1^\circ/\text{m}$, valor baixo quando avaliado a amplitude da onda ao qual o trimarã estará submetido e a borda livre da embarcação de $0,058 \text{ m}$.

Figura 22: RAO dos movimentos, onde a primeira coluna apresenta o módulo, e a segunda a fase. Avaliados com aproamento de 90° para os movimentos de deriva (a, b), afundamento (c, d), jogo (e, f) e guinada (g, h).





Fonte: Autor.

Na Figura 22, apresentam-se os RAOs para os movimentos com aproamento de 90° . Em (a), o módulo do RAO em deriva apresenta movimento abaixo do da onda, caindo com o aumento da frequência. Em (b), observa-se a defasagem do movimento relativo entre o trimarã e a onda de -90° . Em (c), o módulo do RAO em afundamento é amplificado em torno de 10 rad/s, ficando sempre abaixo de 1 m/m. Em (d), a fase de 0° apresenta que o movimento não está defasado em relação a onda. Em (e), a resposta em jogo apresenta um primeiro pico em torno de 6 rad/s com valor de $1,7^\circ/\text{m}$. Avaliando com relação à borda livre, a água não deve atingir o convés frente amplitude de ondas. Em (g), a resposta do trimarã em guinada, mostra que tem pico em torno de 8 rad/s com valor de $0,87^\circ/\text{m}$. Em (h), observa-se a defasagem de -90° .

3.3.3 Probabilidade de água no convés

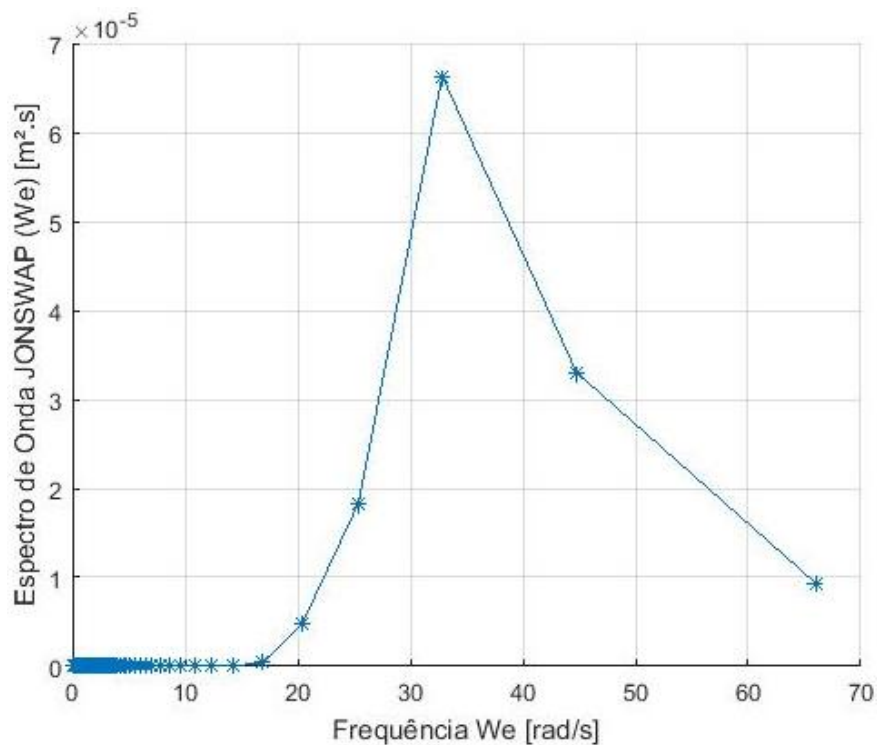
Na avaliação da probabilidade de água no convés da embarcação sem velocidade são fornecidos como dados de entrada o período de picos, T_P , altura significativa de ondas, H_S , e a

posição do ponto avaliado com referência ao eixo adotado na análise realizada pelo WAMIT, no calado e distância da perpendicular de popa de 0,587 m, são dados de entrada no código desenvolvido no MATLAB apresentado no Apêndice III.

A altura significativa (H_S) de onda adotada foi de 0,029 m, igual à metade da borda livre da embarcação. O período de picos (T_P) adotado para o protótipo foi de 4 s. Transformando para o modelo, dividindo pela raiz da escala, o período de picos obtido foi de 0,566 s.

A Figura 23 apresenta o espectro de onda de JONSWAP para $H_S = 0,029$ m e $T_P = 0,566$ s. Sendo avaliado para a frequência de encontro (w_e) com aproamento de 180° .

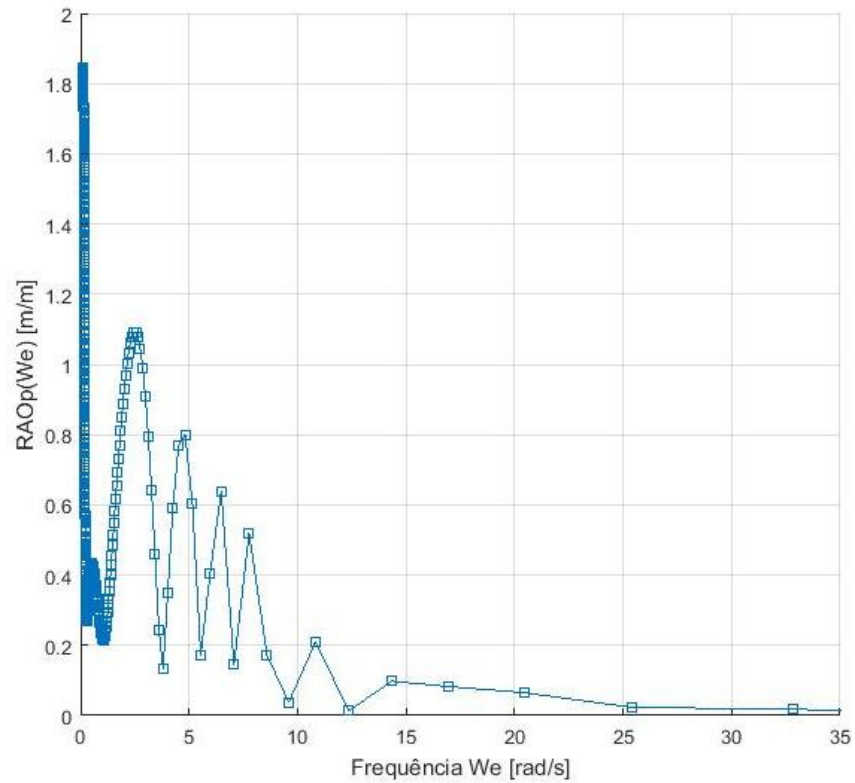
Figura 23: Espectro de onda de JONSWAP.



Fonte: Autor.

O RAO do ponto avaliado com coordenadas em metros (1,363 0,000 0,058). São considerados os movimentos de afundamento e arfagem para definição do movimento do ponto, apresentado na Figura 24.

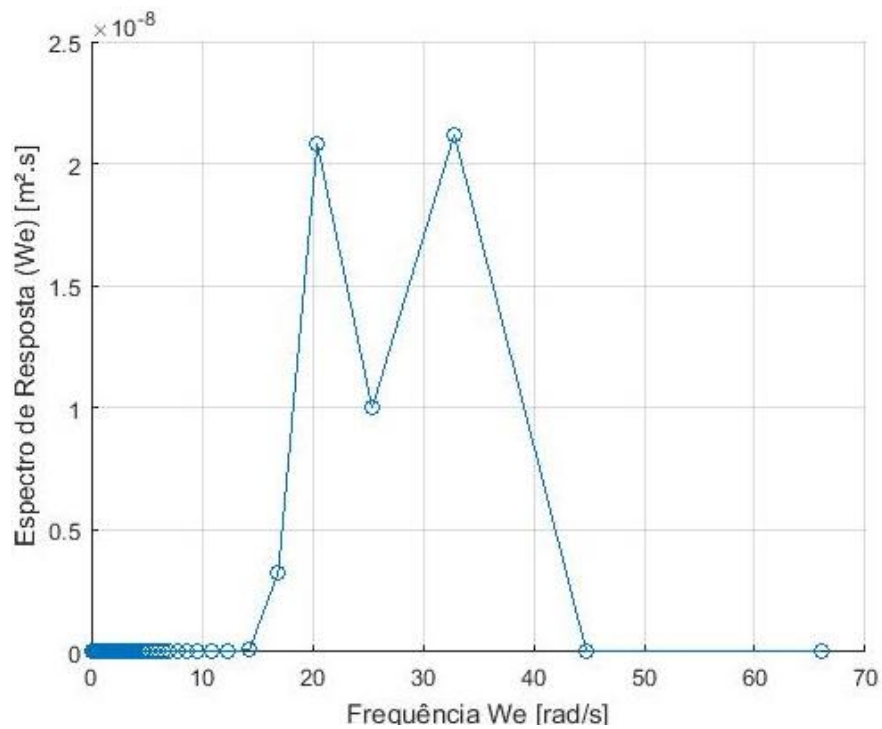
Figura 24: RAO do ponto avaliado no convés.



Fonte: Autor.

O espectro de resposta foi obtido relacionando o RAO do ponto com o espectro de onda, apresentado na Figura 25.

Figura 25: Espectro de resposta $S_r(we)$.



Fonte: Autor.

A probabilidade é obtida relacionando a resposta do ponto avaliado com a área sob a curva do espectro de resposta, m_0 . A regra dos trapézios foi utilizada para realizar a integral dos dados do espectro. A probabilidade obtida foi zero, significa que não ocorre água no convés. Esse fenômeno poderia trazer prejuízo quanto à eficiência de conversão de energia pelo painel fotovoltaico, difratando a luz incidente no painel. O efeito da velocidade não foi avaliado sobre o RAO do movimento em arfagem devido à dificuldade para quantificar essa contribuição. Não é possível inferir sobre o resultado da probabilidade de água no convés com o efeito da velocidade.

4 ENERGIA COM PAINEL FOTOVOLTAICO

Os painéis solares podem ser montados em diferentes configurações. Devem ser avaliadas a espessura do material e a resistência da estrutura que suporta as células. Esses painéis, no Brasil, são montados em estruturas rígidas, que possuem vida útil de 10 a 20 anos. Esses projetos são amplamente aplicados à geração de energia em terra. São sistemas posicionados em telhados e integram o sistema de rede elétrica para suprir a necessidade de residências e indústrias.

As principais aplicações da energia solar para geração de eletricidade ocorrem em situações em que as fontes principais não estão disponíveis ou apresentam maior dificuldade de aplicação. Esse tipo de instalação é conhecido por “Fonte de Alimentação Remota” (RAPS). A aplicação na área naval ocorre em: fornecimento de energia para navegação de boias, plataformas de perfuração, proteção catódica de estruturas e fornecimento de eletricidade independente para pequenas embarcações. (DELL & RAND, 2001).

O projeto desenvolvido pela equipe da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em 2016 para a competição *SolarBoat*, que é realizada anualmente no Lago *Biwa*, Japão, utiliza painéis solares como fonte principal de energia. Esse serviu de inspiração para o desenvolvimento do atual projeto. A competição tem por objetivo o desenvolvimento de uma embarcação que utiliza essa fonte de energia e que seja energeticamente eficiente. Para isso, a redução de peso leve da embarcação é fundamental, pois os painéis solares montados atualmente no Brasil são superdimensionados para o projeto, visto que a sua aplicação é direcionada para residências e indústrias, nas quais o peso não é um parâmetro a ser reduzido de modo ótimo.

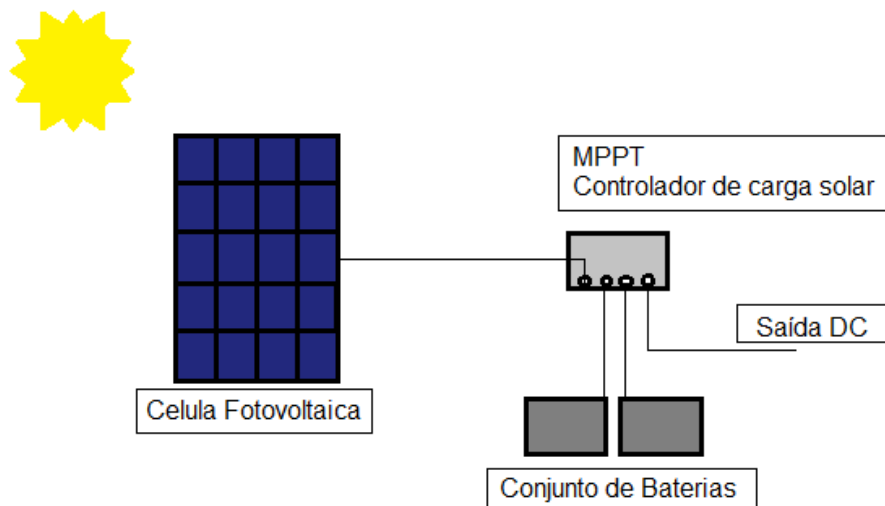
Com excessão da biomassa e da hidroelétrica, as energias renováveis não podem ser armazenadas na sua forma básica. Para o armazenamento é necessário converter essa energia em energia elétrica. Nessa situação, onde a conversão de energia é necessária, o sistema de armazenamento por baterias torna-se importante para uma gestão eficiente dos recursos.

4.1 CIRCUITO DE ABSORÇÃO DE ENERGIA

Para o perfeito funcionamento da embarcação, o sistema de alimentação deve ser dimensionado com o propósito de atender às funções de controle e propulsão. Para a função de propulsão, o sistema elétrico-mecânico engloba a fonte solar por meio dos painéis fotovoltaicos, o MPPT, que recebe a energia elétrica e distribui para o sistema (motor elétrico,

hélice e sistema de controle) e para o armazenamento (conjunto de baterias). Na Figura 26, apresenta-se o esquema da configuração adotada no projeto com os devidos componentes de geração, transmissão, armazenamento e saída de corrente DC.

Figura 26: Esquema da configuração adotada no projeto.



Fonte: Autor.

4.1.1 O painel solar

O painel solar tem aplicação térmica e fotovoltaica. A aplicação neste projeto é de painéis fotovoltaicos para geração de energia elétrica. O módulo fotovoltaico é um conjunto de células conectadas em série que formam uma unidade com suficiente tensão para poder carregar, por exemplo, uma bateria de 12 volts de tensão. Conectando-se os módulos fotovoltaicos em ligações série e paralelo, obtém-se um painel fotovoltaico.

A indicação para este projeto é a utilização de painéis flexíveis. Apesar da redução na eficiência na ordem de 5%, o ganho com a redução do peso dos painéis viabiliza essa redução. Esses painéis devem ser montados em uma estrutura rígida e leve, como painéis de *honeycomb*. Mas como a disponibilidade de painéis rígidos no mercado de energia solar no Brasil é maior, foi selecionado um modelo de painel rígido que atende a necessidade de propulsão da embarcação.

O modelo de painel fotovoltaico da fabricante Kyocera (KD140SX-UFBS) apresenta-se na Figura 27. Possui potência nominal de 140 W, peso de 12,9 kg e dimensões de 1,5 x 0,668 x 0,046 m.

Figura 27: Pannel fotovoltaico com dimensões 1,5x0,668x0,046 m (140W e 12,9 kg).



Fonte: Catálogo KD 135 F, SX Series.

Na Tabela 9, apresentam-se dados obtidos em duas condições de ensaio, definidas como padrão e nominal.

Tabela 9: Dados de ensaio do pannel fotovoltaico realizado pela Kyocera.

Padrão (1000W/m², Temp. Módulo 25°)		Nominal (800W/m², Temp.Amb. 20°)	
Potência	140 W	Potência	101 W
Voltagem	17,7 V	Voltagem	16,0 V
Corrente	8,68 A	Corrente	6,33 A
		Temp. Módulo	45°

Fonte: Modificado de Catálogo KD 135 F, SX Series.

4.1.2 Rastreamento do ponto máximo de potência (MPPT)

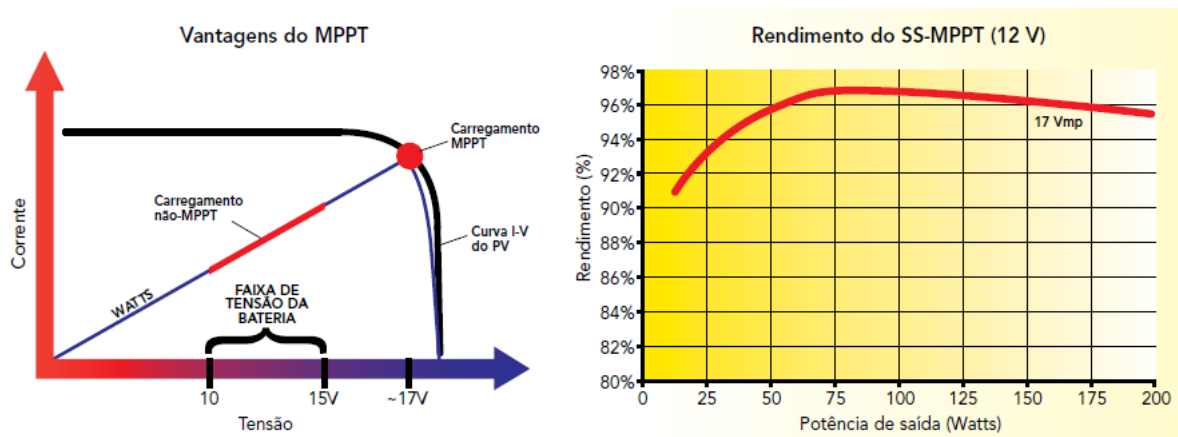
A potência de um pannel solar depende das condições externas, temperatura e iluminação local (W/m²). Para uma dada condição num dado instante de tempo, pode-se traçar uma curva característica de tensão V x corrente I.

Visto que a potência elétrica entregue ao circuito pelo pannel pode ser calculada como na equação 39, é possível calcular a potência para vários valores de tensão.

$$P = V.I \quad (39)$$

Na Figura 28 apresentam-se a curva de corrente versus tensão obtida do pannel solar e a curva de rendimento obtida utilizando o controlador de carga solar, MPPT.

Figura 28: Curvas Corrente x Tensão e rendimento.



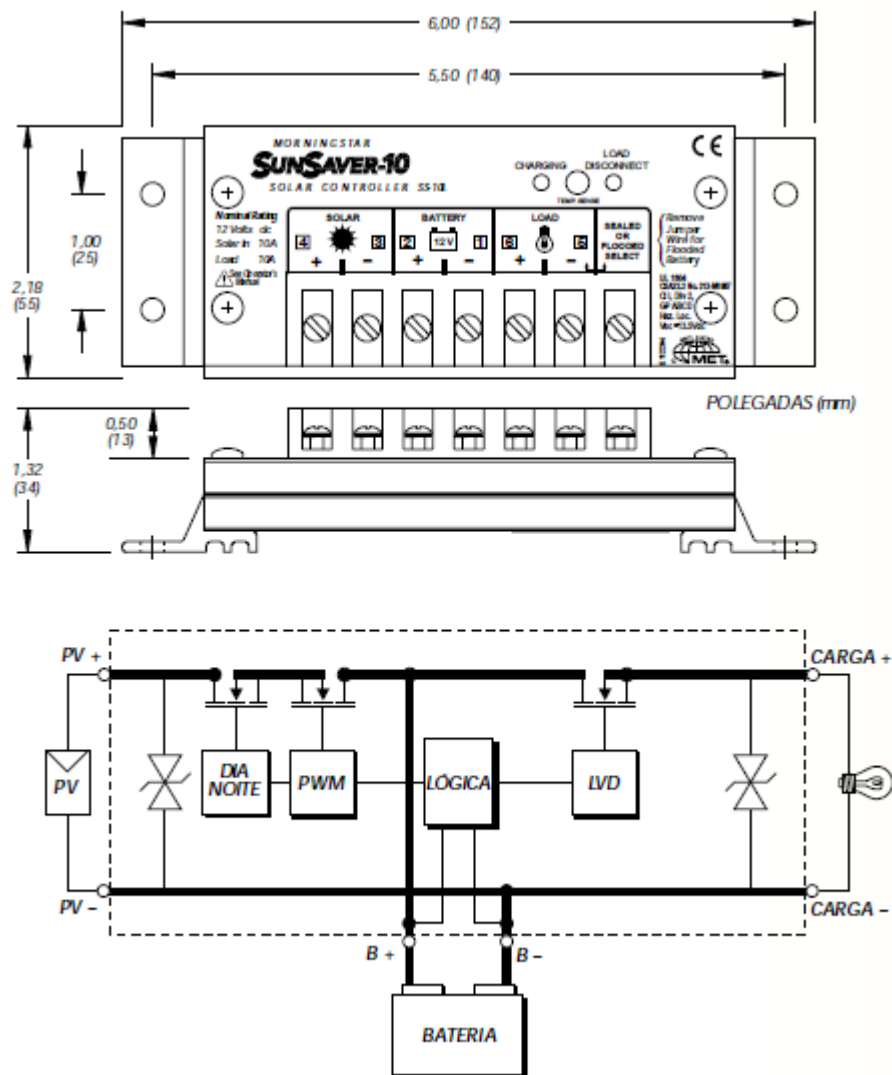
Fonte: Catálogo *Morningstar Corporation, SunSaver MPPT*.

Partindo de uma tensão zero (corrente de curto-circuito), a corrente permanece praticamente constante para uma faixa grande de tensões, caindo bruscamente a partir de 17V até atingir zero, para a tensão de circuito aberto. Nota-se que ao longo da reta inclinada, que apresenta o ponto de operação definido pelo MPPT, corresponde à potência obtida pela relação corrente – tensão.

O MPPT realiza a função de rastreamento do ponto de maior potência para operação a partir da relação Corrente versus Tensão, modificando, assim, as condições de saída do painel fotovoltaico. O carregamento da bateria é dada por PWM com ciclo de atividade de 0 a 100%.

Para a seleção do MPPT deve ser avaliada a potência máxima suportada pelo aparelho. Essa deve ser superior à potência máxima fornecida pelo painel fotovoltaico. Sendo a potência fornecida pelo painel fotovoltaico igual a 140 W, o modelo selecionado foi o SunSaver MPPT, 15A, 12 volt. Possui rendimento máximo de 97% e a entrada nominal máxima do painel fotovoltaico é de 200 W para tensão nominal da bateria de 12 volts. Na Figura 29, apresenta-se o modelo e atuação do MPPT.

Figura 29: Modelo do MPPT e funcionamento.



Fonte: Dados Morningstar Corporation, SunSaver MPPT.

4.1.3 Conjunto de armazenamento de energia elétrica (baterias)

O conjunto bateria será responsável pela alimentação de componentes como ESC, motor e receptor do servo. Esse é responsável pela autonomia da embarcação, definir uma capacidade razoável é fundamental para manter o tempo de operação. A alimentação da bateria é realizada através de uma conexão com a placa solar por intermédio do MPPT, que é responsável pela conversão de tensão gerada pela célula solar para a tensão de recarga da bateria.

Os tipos de bateria aplicáveis ao MPPT selecionado são do tipo gel, selada, AGM e não selada. A bateria mais utilizada é a bateria selada (chumbo-ácida) regulada por válvula (VRLA), devido a sua segurança. Essa possui tensão nominal de 12V.

Um modelo avaliado para aplicação no presente projeto apresenta-se na Figura 30. A bateria chumbo-acido selada de 12V e 5Ah foi selecionada.

Figura 30: Taxa de descarga da bateria chumbo-acido selada 12V - 5Ah.

Tabela de Descarga para Corrente Constante (A) à 25°C													
Constant Current (A) Discharge Table at 25°C													
Tempo		5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	8 h	10 h	20 h
9,6 V	A	18,0	11,8	8,75	5,75	3,00	1,75	1,29	1,03	0,88	0,58	0,48	0,28
10,2 V	A	16,5	11,6	8,04	5,46	2,82	1,68	1,25	1,00	0,86	0,57	0,47	0,27
10,5 V	A	15,0	11,3	7,50	5,29	2,73	1,65	1,22	0,95	0,85	0,55	0,46	0,25
10,8 V	A	14,4	10,1	7,00	5,15	2,63	1,60	1,21	0,93	0,81	0,52	0,45	0,22
11,1 V	A	13,4	9,50	6,50	5,00	2,54	1,56	1,15	0,92	0,78	0,49	0,44	0,21

Fonte: KMA Brasil.

A Figura 30 apresenta a taxa de descarga da bateria para voltagens que variam de 9,6 V até 11,1 V para diferentes amperagens.

4.2 CONFIGURAÇÕES DE OPERAÇÃO

Diferentes configurações podem ser adotadas trabalhando com o conjunto painel fotovoltaico + bateria. São adotadas as seguintes configurações para o sistema de propulsão utilizando o conjunto. Na Tabela 10 são apresentadas três condições de operação.

Tabela 10: Condições de operação para diferentes configurações disponíveis.

Condições	Potência Painel (η 97%)	Potência Bateria	Potência Total
Cond. 100%	135,8 W (100%)	0 W	135,8 W
Cond. 50%	67,9 W (50%)	17,32 W (2 h)	85,22 W
Cond. 20%	27,16 W (20%)	28,19 W (1 h)	55,35 W

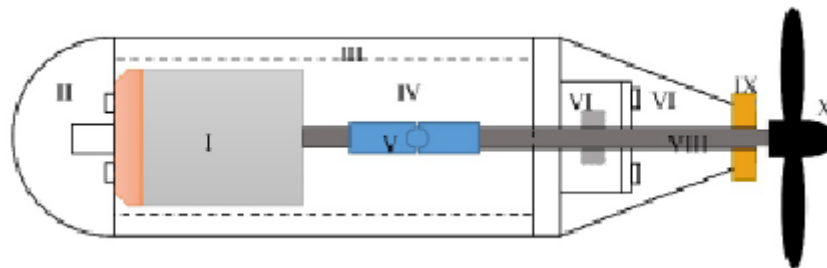
As condições avaliadas e definidas como 100%, 50% e 20% buscam definir condições de operações combinando as duas fontes de energia elétrica, painel e bateria. As potências obtidas das baterias apresentam-se com o tempo aproximado que leva para descarregar, avaliados utilizando a Figura 30. Para uma condição média de operação (50%), a autonomia da embarcação deve ser de 2h. Enquanto para uma condição de tempo nublado, com cerca de 20% da potência total do painel, a autonomia da embarcação deve ser de 1 h.

5 SISTEMA PROPULSIVO

5.1 COMPONENTES DO SISTEMA *POD*

As simplificações aplicadas ao sistema *Pod* correspondem ao formato, cilíndrico com a frente semi-esférica, sem sistema de refrigeração de ar, mas no modelo usa-se um pulverizador refrigerante antes de sua operação e o sistema de giro atua com 15 graus sexagesimais aproximadamente. Um esquema da disposição dos componentes no sistema propulsivo tipo *Pod* é apresentado na Figura 31. O motor é diretamente acoplado ao hélice. A legenda do que corresponde cada parte é apresentada para melhor entendimento.

Figura 31: Representação *Pod* e componentes. I – Motor; II – Capa frontal; III – Corpo; IV – Célula do Motor; V – Conexão; VI – Mancal; VII – Capa traseira; VIII – Eixo; IX – Vedação; X – Hélice.



Fonte: Autor.

O esquema apresenta de modo simplificado a montagem do *Pod*. O motor (I) precisa ser fixado na estrutura por questões vibracionais e, por isso, é necessário ter acesso a uma parede que possa segurar parafusos. A resistência do material é fundamental, visto que os furos são concentradores de tensão. O acesso a essa estrutura interna ocorre através da capa frontal (II) que pode ser removida. Essa capa tem uma forma semi-esférica para que sua superfície diminua a resistência, melhorando o escoamento do fluido em torno do *Pod*. O corpo (III) precisa ter um volume interno (IV) que permita um sistema de refrigeração capaz de refrigerar o motor e eixo de modo a garantir o perfeito funcionamento. Esse volume foi definido em cerca de duas vezes o volume do motor. A conexão (V) depende do diâmetro do eixo e a definição do modelo depende também da rotação do eixo. A redução da seção do corpo começa na capa traseira (VII), que é definida pensando no comportamento do escoamento ao longo do corpo. O mancal (VI) é utilizado para apoiar o eixo. O eixo (VIII) é definido de modo a resistir à torção e outras forças devido ao movimento de rotação e à

vibração do sistema. A vedação (IX) é necessária para que não ocorra o trânsito de fluidos entre o meio interno e o externo ao *Pod*. O hélice (X) acoplado ao eixo não possui restrições de diâmetro devido às barreiras, mas o ideal é não ter um diâmetro muito maior que o diâmetro do corpo do *Pod* para não receber o fluxo distante do corpo e sofrer com momento elevado na pá. Esse hélice foi projetado e o desenvolvimento do processo foi apresentado no subcapítulo 5.2.

5.2 PROCEDIMENTO DE ELEIÇÃO DO HÉLICE

O projeto do hélice foi desenvolvido buscando uma eficiência ótima para as condições de operação definidas. Apesar de não possuir caixa de redução, o controle das rotações é realizado através de um sensor, ESC, fornecendo ampla margem de rotações.

Foram desenvolvidos dois projetos, utilizando metodologias diferentes para comparação dessas e dos resultados acerca do desempenho obtido por cada projeto. A primeira metodologia utiliza a Série B de Propulsores de Wageningen. A segunda metodologia utiliza o elemento de Pá e tem sua forma gerada utilizando o software *Rhinoceros 5.0*.

A faixa de diâmetros estimada inicialmente devido ao porte da vagem foi de 0,11 m até 0,22 m. O diâmetro do hélice, D_H , não pode ser muito maior que o diâmetro da vagem, devido ao aumento do barço da força de resistência que atua sobre a pá. Essa pá poderia não ter resistência mecânica suficiente e ocorreria fratura.

A faixa de rotação avaliada inicialmente foi de 650 rotações por minuto até 950 rotações por minuto, considerando as rotações dos motores elétricos indicados para esta operação. Os pré-requisitos do hélice são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Pré-requisitos definidos para projeto do hélice.

Diâmetro do Hélice	Rotações
0,11 – 0,22 m	650 – 950 rpm (10,83 – 15,83 Hz)

Para o projeto desenvolvido foi escolhido o propulsor de 4 pás para obter maior área e empuxo. Optando por um diâmetro intermediário da faixa definida na Tabela 11. Desta forma, buscou-se atender o empuxo requerido e reduzir o esforço na pá adotando 4 pás e 0,16 m de diâmetro. A preocupação com a resistência mecânica esta presente no projeto do hélice devido ao método de fabricação utilizando impressora 3D.

A Tabela 12 apresenta os valores requeridos de velocidade de projeto, resistência ao avanço e empuxo requerido. As características principais e coeficientes do propulsor são apresentados para definição das características comuns as duas metodologias empregadas.

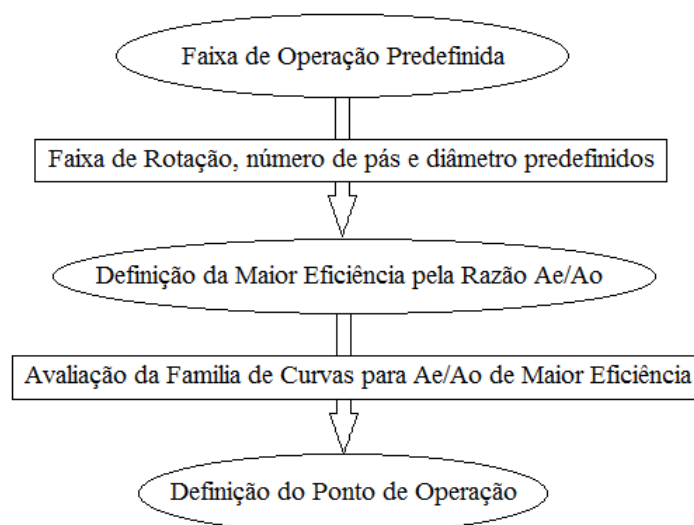
Tabela 12: Dados avaliados para projeto do hélice.

Medidas	Valores	Unidades
Velocidade, V	2,00	m/s
Resistência total, R_T	16,38	N
Empuxo requerido, T	18,83	N
Velocidade de avanço, V_a	1,802	m/s
Diâmetro, D_H	0,16	M
Coefficiente de avanço, J	0,71 – 1,04	-
Coefficiente de dedução de empuxo, t	0,13	-
Coefficiente de esteira, w	0,099	-
Coefficiente de empuxo, K_T	0,12 – 0,26	-

5.2.1 Metodologia de projeto do hélice por Séries Sistemáticas

Utilizando os gráficos da Série B para 4 pás e relação área expandida sobre área do disco, A_e/A_o , variando de 0,7 a 1,0 são obtidas as eficiências para a faixa de coeficiente de avanço J que fornece o empuxo requerido avaliado pelo K_T . Na Figura 32, apresenta-se o fluxograma utilizado para definição do propulsor.

Figura 32: Fluxograma de definição do propulsor utilizando Séries Sistemáticas.



Fonte: Autor.

O procedimento adotado foi verificar, para o coeficiente de avanço mínimo da faixa de operação definida, quais relações passo-diâmetro atendem o empuxo requerido. O valor

minimo foi utilizado para obter maior número de curvas P/D. Definidas as entradas, os valores que atendem o empuxo requerido são as curvas a partir de P/D = 1,0 até 1,4. Devido à queda de eficiência com o aumento de P/D, os valores apresentados foram até 1,2.

A área expandida por área do disco foi avaliada a partir de $A_E/A_O = 0,7$ para obter empuxos elevados com o aumento da área de pá disponível. O limite superior foi definido quando os valores de eficiências obtidas diminuem, com $A_E/A_O = 1,0$.

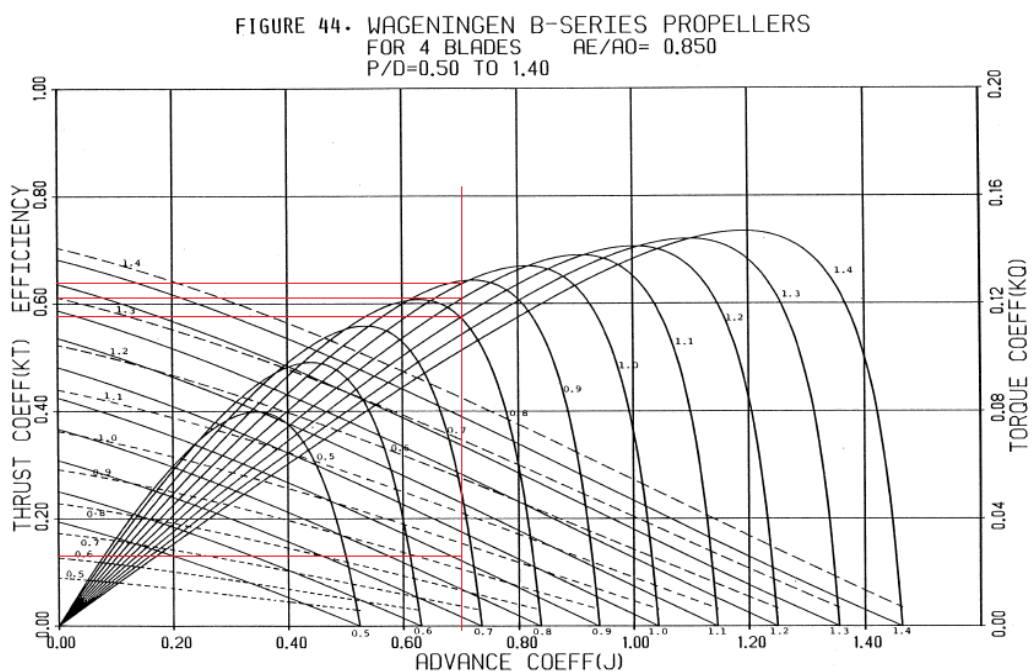
As condições avaliadas e os valores obtidos para as eficiências são apresentadas na Tabela 13. Através da matriz de eficiências obtidas para o coeficiente de avanço mínimo, $J = 0,71$ e rotação de 15,83 Hz, que atendem ao empuxo requerido.

Tabela 13: Matriz de eficiências relacionando P/D e A_e/A_o .

Eficiência	P/D = 1,0	P/D = 1,1	P/D = 1,2
$A_e/A_o = 0,70$	0,630	0,600	0,575
$A_e/A_o = 0,80$	0,628	0,605	0,580
$A_e/A_o = 0,85$	0,640	0,614	0,584
$A_e/A_o = 0,90$	0,636	0,612	0,582
$A_e/A_o = 1,00$	0,612	0,600	0,580

O valor de eficiência máxima foi obtido para a relação passo-diâmetro igual a 1,0 e A_e/A_o igual a 0,85. Essas curvas são apresentadas na Figura 33 para o propulsor B4.85.

Figura 33: Curvas de K_T , K_Q e eficiências para o propulsor B4.85.



Fonte: Modificado de Serie B de Wageningen.

O coeficiente de empuxo obtido para essa condição foi K_T igual a 0,15. O coeficiente de torque obtido foi K_Q igual a 0,034. Fornecendo o empuxo de 25,25 N e o torque de 0,916 N.m. Essa condição fornece um empuxo maior que o requerido.

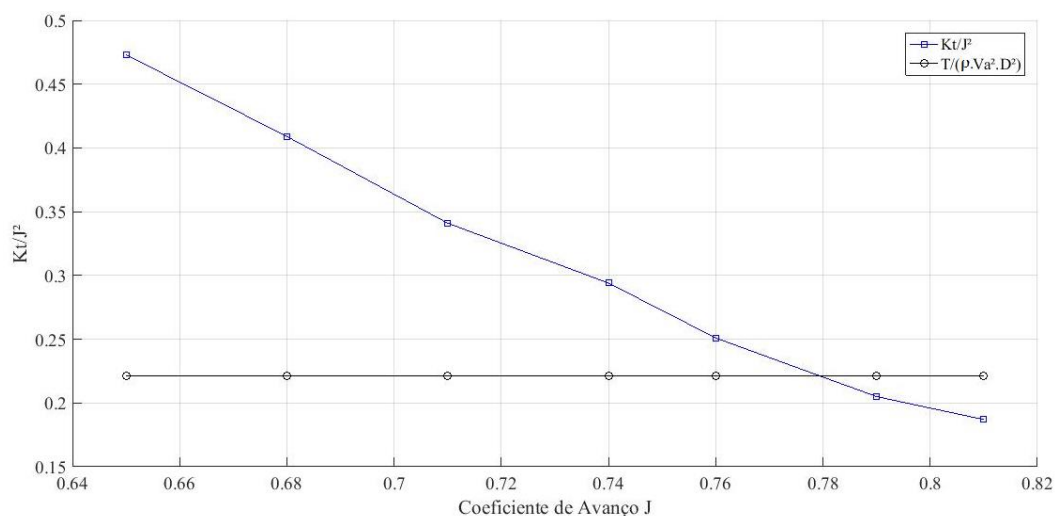
Para obter o ponto de operação ideal, empuxo fornecido igual ao empuxo requerido, foi realizada análise variando o coeficiente de avanço para o propulsor resultante da avaliação anterior com $P/D = 1,0$ e $A_e/A_o = 0,85$, apresentada na Tabela 14. Isolando as rotações das equações do coeficiente de avanço e do coeficiente de empuxo é possível igualar os valores e obter a relação $K_T/J^2 = T/(\rho \cdot V_A^2 \cdot D^2)$. São tomados diferentes pontos na curva variando J para obter os valores de K_Q e K_T . O ponto de operação é obtido quando a igualdade apresentada é atingida.

Tabela 14: Análise do ponto de operação do hélice para séries sistemáticas.

J	K_T	K_Q	K_T/J^2	R_T	T	V_A	$T/(\rho \cdot V_A^2 \cdot D^2)$
0,65	0,200	0,035	0,473	16,38	18,83	1,802	0,221
0,68	0,189	0,032	0,409	16,38	18,83	1,802	0,221
0,71	0,172	0,031	0,341	16,38	18,83	1,802	0,221
0,74	0,161	0,029	0,294	16,38	18,83	1,802	0,221
0,76	0,145	0,027	0,251	16,38	18,83	1,802	0,221
0,79	0,128	0,026	0,205	16,38	18,83	1,802	0,221
0,81	0,123	0,025	0,187	16,38	18,83	1,802	0,221

O ponto de interseção entre as curvas define esse ponto de operação, apresentado na Figura 34.

Figura 34: Curvas para definição do ponto de operação do hélice para séries sistemáticas.



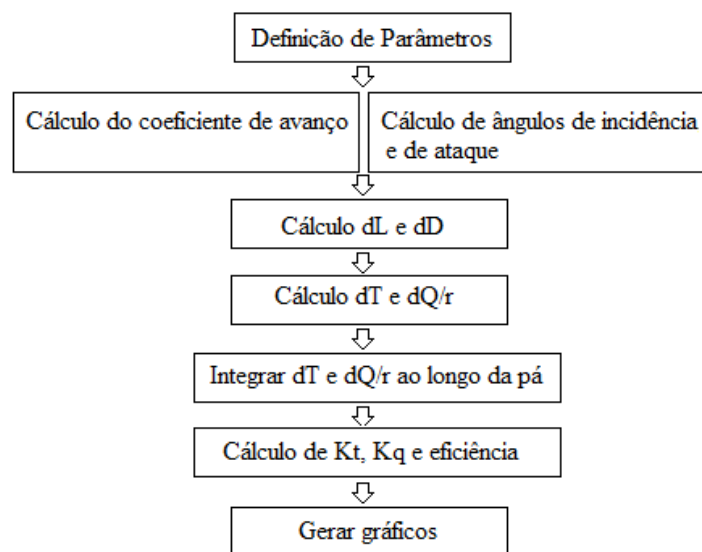
Fonte: Autor.

O ponto de operação é obtido para $J = 0,779$ com $K_T = 0,134$. Para atender o empuxo requerido de 18,83 N, a rotação deve ser igual a 14,46 Hz. A eficiência neste ponto de operação é de 0,670. O $K_Q = 0,0265$ e $Q = 0,584$ N.m.

5.2.2 Metodologia de projeto do hélice por Elemento de Pá

O procedimento utilizado para análise do hélice por teoria do Elemento de Pá contou com o desenvolvimento de um código utilizando MATLAB. O fluxograma desse programa apresenta-se na Figura 35 a seguir.

Figura 35: Fluxograma do código MATLAB para projeto do hélice.



Fonte: Autor.

O código gerado utilizando MATLAB é apresentado no APÊNDICE II para obter a força de empuxo e o torque para o hélice construído no subcapítulo 5.2.3.

Os dados de entrada no código foram Z_H (número de pás), c (vetor de cordas ao longo da pá), D_b (diâmetro do bosso), D_p (diâmetro do propulsor), V_a (velocidade de avanço), n (rotações do propulsor), r (vetor de raios ao longo da pá), An_{Passo} (ângulo de passo), C_l (coeficiente de sustentação), C_d (coeficiente de arrasto).

Foram definidas 6 rotações da faixa de rotação apresentada na Tabela 10, são essas, 10,83 Hz, 11,83 Hz, 12,83 Hz, 13,83 Hz, 14,83 Hz e 15,83 Hz. O mesmo processo foi realizado em cada rotação para definição da força de empuxo (T) e momento de torque (Q), coeficientes de empuxo (K_T) e de torque (K_Q) e eficiência (η_0). Sendo possível obter as curvas K_T , K_Q e η_0 em termo dos coeficientes de avanço (J) obtidos das rotações avaliadas.

Os parâmetros calculados no código foram An_{Atq} (ângulo de ataque), An_{Inc} (ângulo de incidência), J (coeficiente de avanço), valores de dL (diferencial de sustentação), dD

(diferencial de arrasto), dT (diferencial de empuxo), dQ/r (diferencial de torque em razão do raio). Os diferenciais dT e dQ/r foram integrados utilizando o método numérico de Simpson ao longo da pá, obtêm-se os valores de T (força para empuxo) e Q (momento).

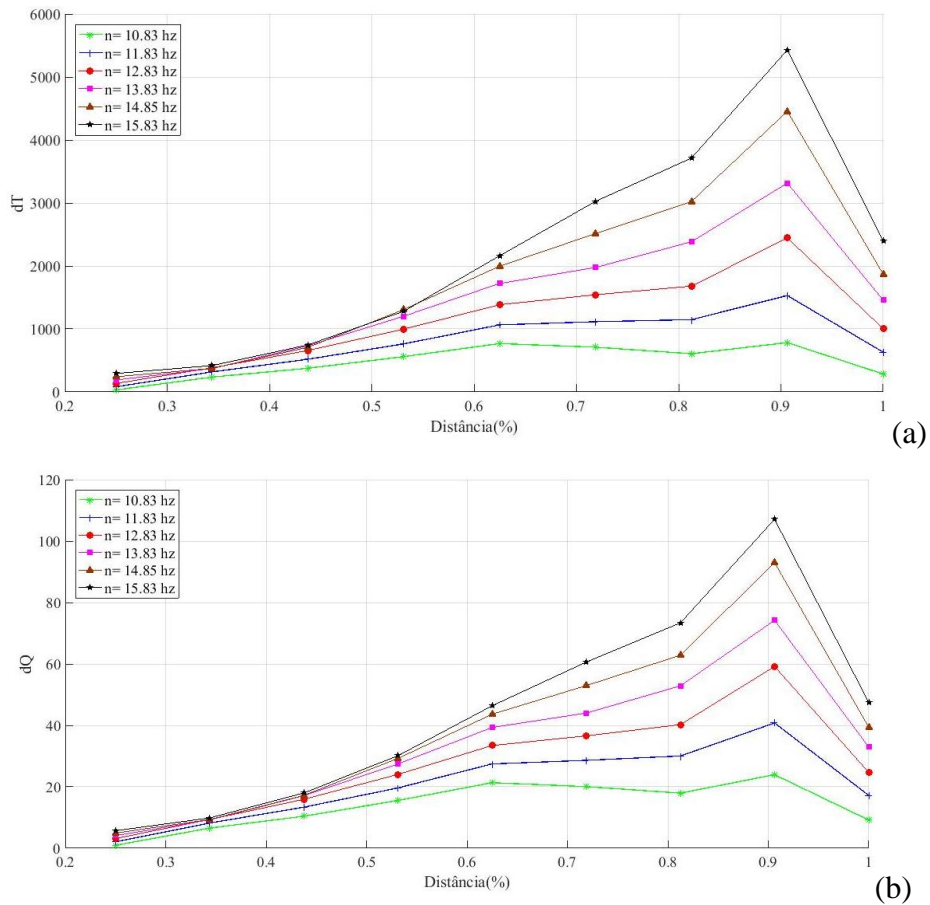
O ângulo de passo ou ângulo geométrico foi obtido da forma desenvolvida no *Rhinoceros* e o ângulo de incidência foi calculado por formulação. A diferença entre o ângulo de passo e o ângulo de incidência fornece o ângulo de ataque. Avaliando nas diferentes rotações, obteve-se a matriz com valores do ângulo de incidência e ângulo de ataque. Os ângulos de ataque são apresentados na Tabela 15 para verificação da possível ocorrência de estolagem, ângulo de ataque maior que o máximo permitido para o perfil utilizado (NACA 2410).

Tabela 15: Ângulos de ataque do perfil NACA 2410.

ângulo (°)	n = 10,83Hz	n = 11,83Hz	n = 12,83Hz	n = 13,83Hz	n = 14,83Hz	n = 15,83Hz
1	-0,21	2,25	4,55	6,70	8,73	10,56
2	1,87	4,40	6,69	8,77	10,71	12,42
3	3,07	5,47	7,61	9,53	11,29	12,81
4	3,69	5,91	7,87	9,60	11,18	12,53
5	4,02	6,06	7,84	9,40	10,81	12,01
6	1,49	3,35	4,97	6,38	7,65	8,73
7	0,00	1,71	3,19	4,47	5,62	6,59
8	-0,11	1,46	2,82	3,99	5,04	5,92
9	-0,39	1,07	2,31	3,39	4,35	5,16

Na Figura 36, apresentam-se as curvas dT e dQ para diferentes rotações avaliadas. Os valores são calculados considerando-se no número total de pás igual a 4, e a posição longitudinal de cada um dos 9 elementos avaliados. As posições adimensionais são apresentadas.

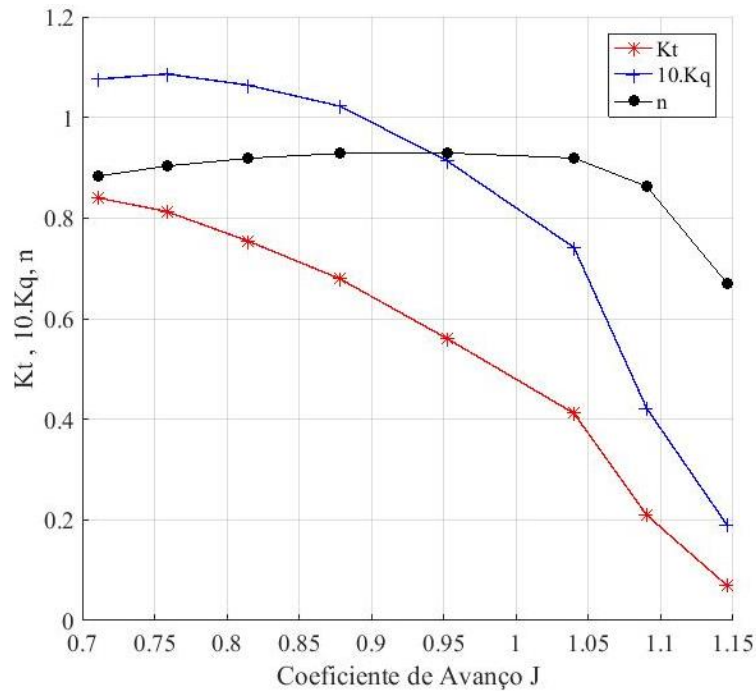
Figura 36: Curvas dT e dQ para diferentes rotações.



Fonte: Autor.

As curvas dT(a) e as curvas dQ(b) apresentam picos próximos a 0,9 (90%) do comprimento da pá. O torque elevado próximo à extremidade da pá implica que a estrutura está submetida a um torque que traz maior risco de fratura devido ao braço. A resistência estrutural deve ser suficiente para garantir a integridade do hélice.

As curvas dos coeficientes de empuxo, K_T , de torque, K_Q e eficiência, η_0 são apresentadas na Figura 37. Os valores de K_Q são apresentados multiplicados por 10 para melhor visualização.

Figura 37: Curvas K_t , K_q e η do hélice projetado e construído.

Fonte: Autor.

A curva de eficiência para as rotações avaliadas que possui valores próximos a 0,9 (90%), com valor máximo de 0,9293 (92,93%) para o coeficiente de avanço igual a 0,952. Para este ponto de eficiência máxima, as curvas K_t e K_q apresentam valores de 0,5607 e 0,09142, respectivamente.

Dos momentos Q obtidos é possível calcular a potência ao torque multiplicando esses valores pelas rotações correspondentes. A potência para acionar o hélice é apresentada na Tabela 16. Os valores obtidos de empuxo, momento para as diferentes rotações são avaliados.

Tabela 16: Valores de empuxo T , momento Q e potência Q_p para as rotações definidas.

Empuxo, T [N]	Vel. Avanço, V_a [m/s]	Momento, Q [N.m]	Rotações [Hz]	Potência, P [W]
32,45	1,802	0,935	10,83	59,34
52,71	1,802	1,375	11,83	96,37
75,15	1,802	1,809	12,83	137,39
96,95	1,802	2,188	13,83	177,31
120,42	1,802	2,575	14,83	220,33
141,35	1,802	2,899	15,83	258,81

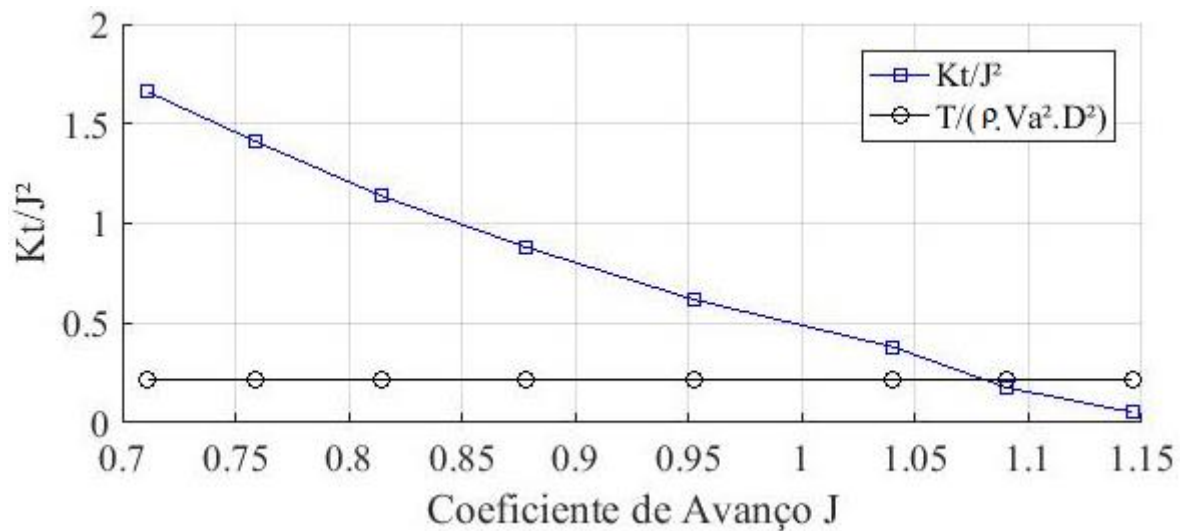
O ponto de operação é avaliado a seguir de forma que atenda o empuxo requerido de 18,83 N. Similarmente ao procedimento realizado para séries sistemáticas. A Tabela 17

apresenta a faixa avaliada. O ponto de operação é obtido da interseção das duas curvas apresentadas na Figura 38.

Tabela 17: Análise do ponto de operação do hélice para elemento de pá.

J	K_T	K_Q	K_T/J^2	R_T	T	V_A	$T/(\rho \cdot V_A^2 \cdot D^2)$
0,71	0,840	0,1076	1,666	16,38	18,83	1,802	0,221
0,76	0,815	0,1086	1,411	16,38	18,83	1,802	0,221
0,81	0,755	0,1064	1,151	16,38	18,83	1,802	0,221
0,88	0,680	0,1023	0,878	16,38	18,83	1,802	0,221
0,95	0,561	0,0914	0,622	16,38	18,83	1,802	0,221
1,04	0,412	0,0742	0,381	16,38	18,83	1,802	0,221
1,09	0,210	0,0421	0,177	16,38	18,83	1,802	0,221
1,15	0,070	0,0190	0,053	16,38	18,83	1,802	0,221

Figura 38: Curvas para definição do ponto de operação do hélice para elemento de pá.



Fonte: Autor.

O ponto de encontro entre as curvas fornece o coeficiente de avanço $J = 1,08$, para este valor o K_T obtido foi de 0,258. Para atender o empuxo requerido de 18,83 N, a rotação deve ser igual a 10,42 Hz. A eficiência neste ponto de operação é de 0,863. O $K_Q = 0,0485$ e $Q = 0,566$ N.m.

5.2.3 Método de Fabricação

A fabricação do hélice foi realizada para o modelo projetado utilizando a metodologia elemento de pá. O método de fabricação utilizado foi desenvolvido considerando os recursos disponíveis e aplicação de novas tecnologias. Para fabricar a forma desenvolvida utilizando o

software *Rhinoceros 5.0*, foi utilizada a máquina de impressora 3D, que utiliza material polímero ABS. Devido à baixa resistência mecânica desse material, o hélice foi laminado utilizando fibra de carbono, que confere maior resistência sem incremento elevado de peso.

Esse método apresenta restrições quanto à aplicação em formas complexas do hélice que pode ser avaliada durante o processo de impressão. Visto que esse não é amplamente aplicado na indústria, uma base de dados com restrições de aplicação não foi encontrada.

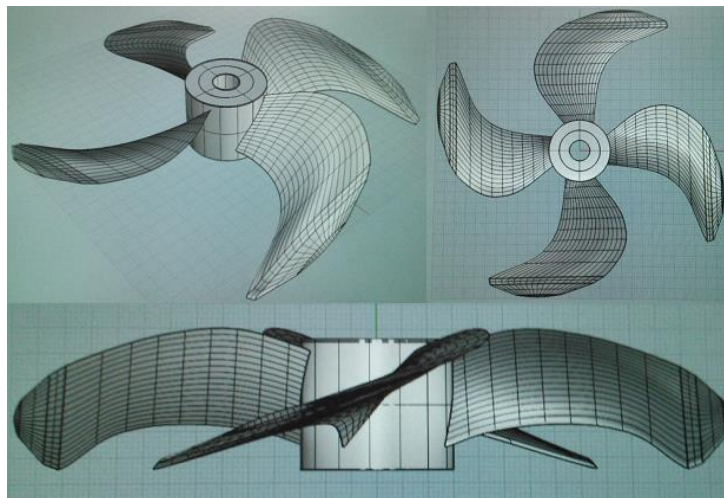
Durante o processo foram encontradas dificuldades, quanto à curvatura, que podem inviabilizar o processo de impressão e laminação com fibra de carbono. Algumas restrições podem ser adotadas para número de pás, razão P/D e área expandida, facilitando o processo de impressão.

Para o hélice de quatro pás definido no projeto, foi possível realizar a impressão, respeitando as limitações do processo de fabricação (tempo estimado de impressão, material polímero ABS). A fabricação do hélice foi dividida em três passos apresentados nos subcapítulos a seguir.

5.2.3.1 Passo Um: Desenho do Hélice

O desenho do hélice realizado na segunda metodologia é gerado utilizando o software *Rhinoceros 5.0* do princípio, sem utilização de uma forma prévia. Na Figura 39, apresentam-se as vistas do hélice no software. Para a forma das pás, foi selecionado um perfil NACA2410, que seguiu o decaimento de espessura proporcional ao afastamento do centro. Esse é apresentado no Anexo II.

Figura 39: Representação do hélice de 4 pás desenvolvido.



Fonte: Autor.

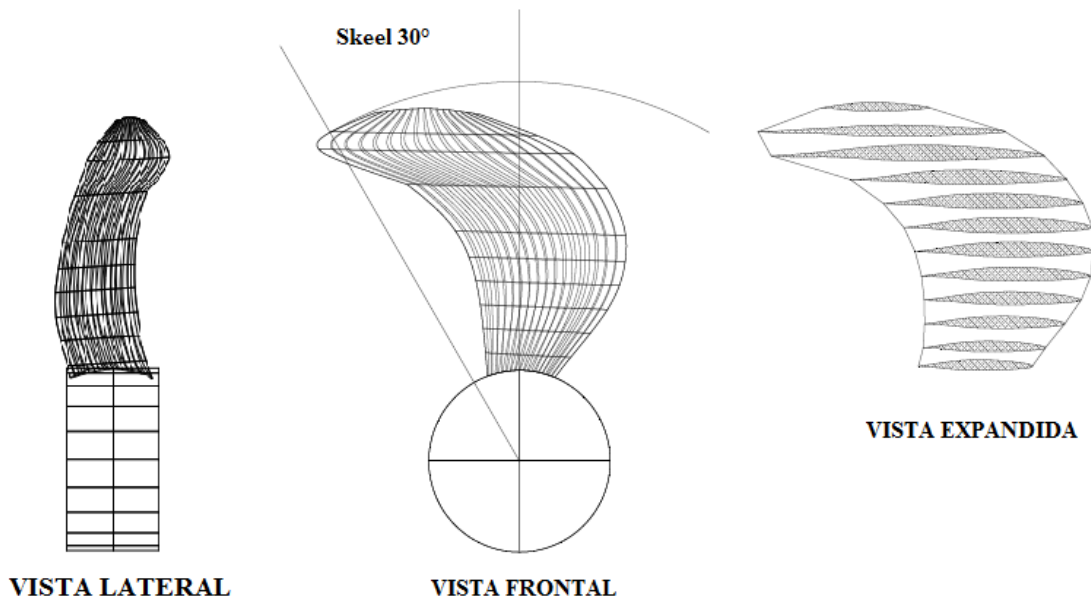
Os dados do hélice construído são apresentados na Tabela 18 a seguir.

Tabela 18: Dados do hélice desenhado e fabricado.

Dados do Hélice	
Número de pás, Z	4
Diametro do Hélice, D_P	0,160 m
Diametro do Bosso, D_B	0,040 m
Esconso (<i>Skew</i>)	30°
Decaimento (<i>Rake</i>)	3°
A_e/A_o	0,85

Na Figura 40, apresenta-se a vista frontal e a expandida da pá do hélice. Essas apresentam o ângulo de esconso (*skew*) de 30° e a variação da seção ao longo da pá. Observa-se que a corda da seção é maior em torno de 0,9 do raio total, como apresentadas nas curvas avaliadas utilizando o elemento de pá.

Figura 40: Vista frontal e vista expandida da pá do hélice.



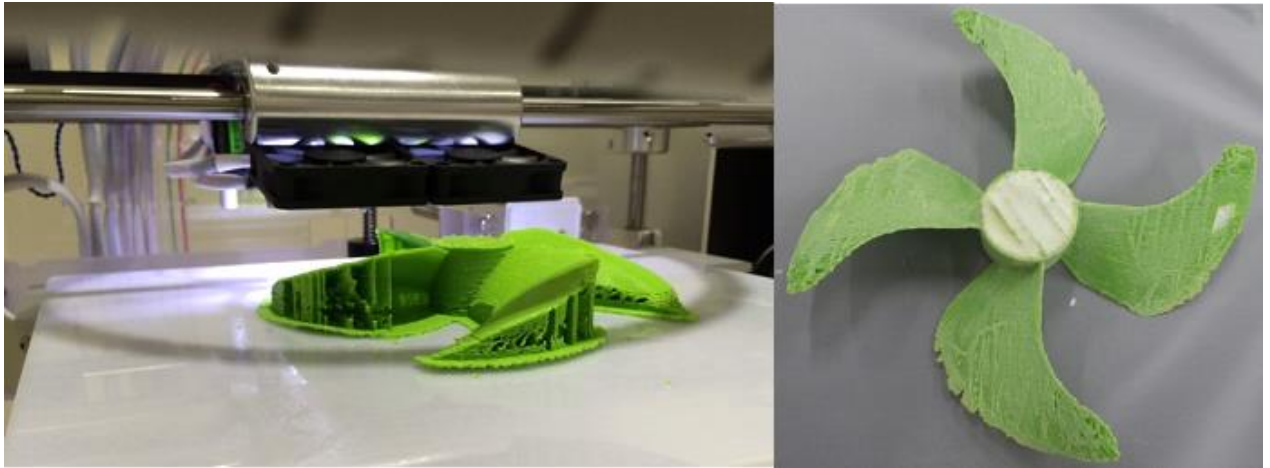
Fonte: Autor.

5.2.3.2 Passo Dois: Impressão 3D

Durante a fabricação do propulsor, alguns problemas foram identificados. Foram esses problemas de distribuição de massa devido a falhas durante a impressão que poderiam ocasionar problemas de balanceamento. As extremidades se tornaram frágeis, devido à espessura das pás, modificando o diâmetro projetado de 0,160 m para 0,155 m. Na Figura 41,

apresentam-se a impressão nos instantes finais e o hélice após lixamento para remover excesso de resina e conferir um acabamento mais liso. Para prevenir problemas com a falta de resistência mecânica, foi aplicada resina para preencher o centro.

Figura 41: Apresentação do hélice durante e após impressão.



Fonte: Autor.

5.2.3.3 Passo Três: Laminação fibra de carbono

Todo o hélice foi reforçado com duas camadas de fibra de carbono como apresentado na Figura 42, a seguir. Para posicionar essas camadas de fibra de carbono foi necessário aplicar cola para em seguida iniciar o processo de laminação devido à complexidade da forma.

Figura 42: Hélice após laminação com fibra de carbono.



Fonte: Autor.

5.3 SELEÇÃO DO MOTOR

A avaliação do motor principal mais adequado ao projeto deve ser realizada considerando as eficiências e potências obtidas ao longo do projeto. Os valores obtidos para os dois projetos de hélice são apresentados na Tabela 19. A influência da eficiência do hélice (η_O) é refletida na eficiência relativa rotativa (η_{RR}) e, conseqüentemente, na eficiência total (η_T). Assim como as diferenças obtidas para as potências DHP, SHP e BHP. Na Tabela 19, SS representa os valores obtidos para o sistema que utiliza o hélice projetado por série sistemática e EP representa os valores obtidos quando é utilizado o hélice projetado por elemento de pá.

Tabela 19: Eficiências e Potências envolvidas nos sistemas.

Efiências	Valores SS	Valores EP	Potências	Valores SS [W]	Valores EP [W]
η_H	0,966	0,966	EHP	32,75	32,75
η_O	0,670	0,863	THP	33,93	33,93
η_{RR}	1,448	1,146	DHP	34,97	34,44
η_S	0,955	0,955	SHP	34,95	34,28
η_T	0,895	0,912	BHP	36,59	35,91

Foram avaliados três motores para definição do mais adequado para aplicação no sistema. Dentre as opções, deve ser feita a definição entre os modelos *inrunner* ou *outrunner*. O motor *inrunner* possui altas rotações e baixo torque, e a necessidade de caixa de redução é maior para esse tipo de motor. O motor *outrunner* possui baixas rotações e alto torque, mas ainda precisa da redução para operação do hélice. A Tabela 20 apresenta os modelos *outrunners* selecionados, potência máxima fornecida e faixa de rotações de operação.

Tabela 20: Dados dos motores avaliados.

Modelo	Potência (MCR)	Kv (rpm/V)	Rotações [Hz]
Turnigy L2205-1350	100 W	1350	162 – 249,75
Turnigy L2210C-1200	150 W	1200	144 – 222
Turnigy L2210A-1650	180 W	1650	198 – 305,25

Os valores das rotações são obtidas das especificações de rotações por voltagem, geralmente rpm/V, e a faixa de voltagem que o motor trabalha (7,2V – 11,1V). Sendo a voltagem máxima correspondente à potência máxima, é possível determinar a faixa de rotações e de potência que varia linearmente. Não foram fornecidos em catálogo os valores de eficiência do motor elétrico. Não foi avaliada possíveis perdas devido à estas eficiências.

As rotações apresentadas na Tabela 20 devem ser reduzidas para atender a faixa de operação do hélice. Essa redução pode ser realizada de duas formas: por caixa de redução; e por controle da frequência para acionamento do motor.

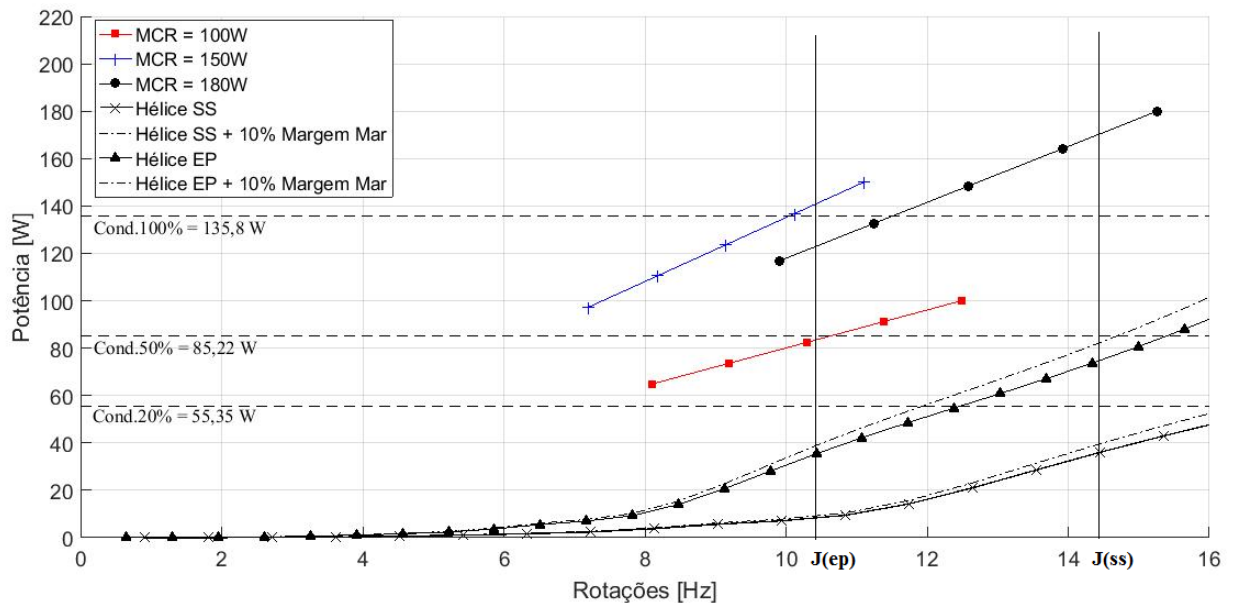
Para este projeto as rotações devem ser reduzidas de forma eletrônica, por controle da frequência para acionamento do motor. Esse controle é realizado utilizando o componente eletrônico ESC. Para isso, o conjunto motor + ESC deve ser compatível nos seguintes parâmetros:

- Corrente alternada ou contínua;
- Com escovas (*Brushed*) ou sem escovas (*Brushless*);
- Mesma amperagem.

Após seleção, a configuração do ESC determinado deve ser realizada por programação. O programa de controle de rotações realiza a definição de variáveis, leitura da fonte, definição da rotação e envio do sinal que corresponde à rotação selecionada.

Para definir o motor que melhor se ajusta foi adotada uma redução de 1:20 nas rotações, compatível com os valores de operação obtidos para os hélices. A Figura 43 apresenta as curvas dos motores avaliadas para as condições energéticas de 100%, 50% e 20%. São sobrepostas também as curvas do BHP requerido pelos hélices avaliados utilizando série B e elemento de pá.

Figura 43: Curvas dos motores avaliadas para as condições energéticas e do hélice por série B e por elemento de pá.



Fonte: Autor.

As curvas do BHP requerido são obtidas a partir dos dados do EHP apresentado na Tabela 3 e das eficiências. Os dados do EHP estão em função das velocidades. Para apresentar em função das rotações foi mantido constante o valor do coeficiente de avanço J definido no projeto do hélice para os dois métodos. O hélice projetado por séries sistemáticas (SS) apresenta J de operação igual a 0,779 e rotação igual a 14,46 Hz. O hélice projetado por elemento de pá (EP) apresenta J igual a 1,08 e rotação igual a 10,42 Hz.

Na Figura 43, definem-se duas retas de pontos de operação $J(ep)$ e $J(ss)$. Para o projeto do hélice por série sistemática, a redução de rotações do motor de 1:20 não é bem adequada. Apenas o motor de potência 180W atende o projeto. A potência fornecida por este é muito elevada quando comparada a curva de BHP requerido, mesmo adotando a margem de mar de 10%. Para a operação utilizando o hélice projetado por elemento de pá, a redução adotada apresenta os três motores avaliados como possíveis candidatos. Como o caso anterior, foi adotada a margem de mar de 10%. Os motores com potência de 100W e 150W apresentam melhor região de operação, mais próximos do MRC do motor.

Avaliando-se as três condições de fonte energética definidas com 20%, 50% e 100%, o motor de 100W consegue atuar com as duas margens menores que representam o maior tempo de condição de operação. Enquanto, para uma condição ótima de 100%, o motor não consegue trabalhar com toda a fonte disponível. Diferente do motor de 150W, esse é o mais indicado para operar na condição ótima. Considerações com respeito à operação devem ser

feitas para avaliar a potência requerida e a potência fornecida por maior tempo. Seria possível direcionar o excedente obtido do painel fotovoltaico (na condição 100%) para carregar a bateria e fornecer ao motor a condição 50% que atende o requerido de operação. Sendo o motor de 100W mais adequado para este projeto.

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

O trabalho apresenta um resumo bibliográfico que permite entender melhor um âmbito de aplicação dos painéis solares e das aplicações dos navios do tipo multi casco como é o caso do trimarã. Abordado no capítulo 2, esse resumo foi realizado nas áreas de projeto de embarcações, energia solar e sistema propulsivo. A ocorrência de interferência entre ondas geradas pelos cascos por causa de suas posições foi observada como importante no estudo da forma da embarcação. Sendo avaliada no capítulo 3.

O casco trimarã desenvolvido, após ser submetido a uma análise de coeficientes hidrostáticos e comportamento no mar regular, apresenta em linhas gerais bom comportamento, o que fornece uma confiabilidade na estabilidade dinâmica do trimarã mesmo em ondas regulares. Possibilitou a análise de probabilidade de água no convés que causa prejuízo na eficiência de conversão da energia solar em energia elétrica durante operação. Verificou-se que esse fenômeno não ocorre para as condições avaliadas.

Conforme apresentado no capítulo 4, a fonte de alimentação de energia proveniente de painéis fotovoltaicos, ainda pouco aplicados à embarcação, depende do investimento e desenvolvimento da tecnologia dos painéis. A autonomia desse modelo de embarcação é consequência do porte, e principalmente do serviço ao qual é submetido. A incidência solar que define condições de operações são fatores determinantes no sistema. Essas condições foram avaliadas para verificar a atuação do projeto.

Um conjunto de equipamentos para montar este sistema de energia limpa com painéis solares em modelos reduzidos é apresentado. Isto permite que novos modelos nos grupos de extensão universitária DUNA e Hydrocontest possam aplicá-los melhorando sua autonomia em relação aos outros competidores. Uma extrapolação desta metodologia para modelos reais pode ser feita.

O sistema propulsivo, desenvolvido no capítulo 5, tem por objetivo aplicar as metodologias, de série sistemática e de elemento de pá, para projetar hélices que possam ser fabricados por equipes que participam de competições, como aquelas em que participam as equipes da Universidade Federal de Pernambuco. Foi apresentado o método de fabricação do hélice, o qual pode ser utilizado para melhorar a resistência estrutural das pás com o uso de fibras de carbono. A integração desses sistemas foi realizada para definição do motor mais adequado para compor o conjunto casco-hélice-motor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKERS, B.B. “An Investigation of the Resistance Characteristics of Powered Trimaran Side-hull Configurations”, *Trans. of Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Vol. 105, 1997, pp 349-373
- BARRACUDA - Disponível em: <[//www.barracudacomposites.com.br/site/produtos/#](http://www.barracudacomposites.com.br/site/produtos/#)> - Acesso em: 05 agosto 2018.
- BENTLEY SYSTEMS. “Maxsurf Resistance: User Manual”, 2012, pp. 35, 59 e 61.
- COPPOLA, T. MANDARINO, M. “The Design of Trimaran Ships: General Review and Practical Structural Analysis”. *Practical Design of Ships and Other Floating Structures*. You-Sheng Wu, Wei-Cheng Cui and Guo-Jun Zhou. 2001 Elsevier Science Ltd. p. 127.
- CUNHA, F. S. - Teoria de elementos de pá - Disponível em: <[//fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/845043405440106/Capitulo%204%20Teoria%20de%20Elementos%20de%20Pa.pdf](http://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/845043405440106/Capitulo%204%20Teoria%20de%20Elementos%20de%20Pa.pdf)> - Acesso em: 04 agosto 2018.
- DELL, R. M. RAND, D. A. J. “Energy Storage: A Key For Global Energy Sustainability”. *Journal of Power Sources* 100 (2001) pp 2 – 17.
- FALTINSEN, O. M. “Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles”. Cambridge University Press, 2005, pp. 120 – 123.
- GROUMPOS, P.P. PAPAGEORGIOU G. “An Optimal Sizing Method For Stand-Along Photovoltaic Power Systems”. Pergamon Journals Ltd. 1987. *Solar Energy* Vol. 38, No. 5, pp 341-351.
- JAIN, P.C. “Estimation of Monthly Average Hourly Global And Diffuse Irradiation”. Pergamon Journals Ltd. 1988. *Solar & Wind Technology* Vol. 5, No. I, pp 7-14.
- KMA Brasil - Disponível em: <[//www.kmabrasil.com.br/produto/baterias-seladas/baterias-12v-agm/341-bateria-selada-12v-5ah-unipower-up1250](http://www.kmabrasil.com.br/produto/baterias-seladas/baterias-12v-agm/341-bateria-selada-12v-5ah-unipower-up1250)> - Acesso em: 03 agosto 2018.
- LETCHER, J.S. Jr. MARSHALL, J.K. OLIVER, J.C. III. SALVESEN, N. “Stars & Stripes”. *Scientific American*, 1987, pp. 34-40.
- LEWIS, E. V. “Principles of Naval Architecture: Volume II – Resistance, Propulsion and Vibration”. The Society of Naval Architects and Marine Engineers (1988). pp 55-57.
- MARÍTIMO – 2018 - Disponível em: <[//revistacargo.pt/imo-metade-emissoes-co2/](http://revistacargo.pt/imo-metade-emissoes-co2/)> - Acesso em: 08 jun. 2018.
- NASIRUDIM, A. CHAO, R.-M. UTAMA, I.K.A.P. “Solar Powered Boat Design Optimization”. 10th International Conference on Marine Technology, MARTEC 2016. pp 260 – 267.

- NEWMAN, J. N. “Applications of Slender-Body Theory in Ship Hydrodynamics”. Annual Review of Fluid Mechanics. Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1970, p. 10.
- NOBLESSE, F. “A Slender-Ship Theory of Wave Resistance”. Journal of Ship Research, 1983, pp. 13-33.
- OKULOV, V. L. KUIK, G. SORENSEN, J. N. “Development of the Optimum Rotor Theories”. R&C Dyn, 2013.
- RANDY, T. “Multihulls Discovered. Part I: Their origins, myths, magic, mana... and caveats that go along with these craft that have evolved from an ancient heritage.” Yachting, junho 1985. P. 86.
- SUZUKI, K., NAKATA, Y., IKEHATA, M. KAI, H. “Numerical Predictions on Wave Making Resistance of High-Speed Trimaran”, Proc. of Fourth International Conference on Fast Sea Transportation, (FAST’97), 1997, pp 611-617
- TOLMASQUIM, M. T. “Fontes Renováveis de Energia no Brasil”. Cenergia, COPPE, UFRJ. Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2003.
- UCL - Trimaran: A novel ship design - Disponível em: <<http://www.ucl.ac.uk/impact/case-study-repository/trimaran-novel-ship-design>> - Acesso em: 06 jun. 2018.
- UTAMA, I.K.A.P. SANTOSA, P.I., CHAO R.-M., NASIRUDDIN A.. “New Concept of Solar- Powered Catamaran Fishing Vessel”. 7th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC 2013) Bali, Indonésia, Setembro 24-26, 2013. pp 903 – 909.
- VENTURA, M. “Métodos de Estimativa no Projecto de Navios”, Instituto Superior Técnico. pp 27 e 28.
- WÄRTSILÄ – Disponível em: <[http://www.wartsila.com/encyclopedia/term/integrated-full-electric-propulsion-\(ifep\)](http://www.wartsila.com/encyclopedia/term/integrated-full-electric-propulsion-(ifep))> - Acesso em: 04 maio 2018.
- WYATT, D.C. CHANG, P.A. “Development and Assessment of a Total Resistance Optimized Bow for the AE 36”. Marine Technology, 1994, pp. 149-160.
- YANG, C. LOHNER, R. SOTO, O. “Optimization Of A Wave Cancellation Multihull Ship Using CFD Tools”. Practical Design of Ships and Other Floating Structures, 2001. Elsevier Science Ltd. pp 43 – 50.

APÊNDICE I – CÓDIGO MATLAB, TRATAMENTO DE DADOS DE SAÍDA

WAMIT

```

close all;

ro=1.025;
L=1.94091;
g=9.806;
Ca33=0.116048;
Ca44=0.00270400;
Ca55=0.00557190;
AmpOnda=0.0145;
C33=Ca33*ro*g*L^2;
C44=Ca44*ro*g*L^4;
C55=Ca55*ro*g*L^4;
Massa=0.0284;
Ixx=0.000001;
Iyy=0.000459;

% Vetor Período, Massa Add, Amortecimento,
RAO, HFE(Haskind Exciting Force).
PeriodoT= zeros(500,1);
FrequenciaW= zeros(500,1);
numK= zeros(500,1);
MassaA33= zeros(500,1);
MassaA44= zeros(500,1);
MassaA55= zeros(500,1);
AmortB33= zeros(500,1);
AmortB44= zeros(500,1);
AmortB55= zeros(500,1);
RAO180M1= zeros(500,1);
RAO180F1= zeros(500,1);
RAO180M3= zeros(500,1);
RAO180F3= zeros(500,1);
RAO180M5= zeros(500,1);
RAO180F5= zeros(500,1);
RAO90M2= zeros(500,1);
RAO90F2= zeros(500,1);
RAO90M3= zeros(500,1);
RAO90F3= zeros(500,1);
RAO90M4= zeros(500,1);
RAO90F4= zeros(500,1);
RAO90M6= zeros(500,1);
RAO90F6= zeros(500,1);
HEF180M1= zeros(500,1);
HEF180F1= zeros(500,1);
HEF180M3= zeros(500,1);
HEF180F3= zeros(500,1);
HEF180M5= zeros(500,1);
HEF180F5= zeros(500,1);
HEF90M2= zeros(500,1);
HEF90F2= zeros(500,1);
HEF90M3= zeros(500,1);
HEF90F3= zeros(500,1);
HEF90M4= zeros(500,1);

HEF90F4= zeros(500,1);
HEF90M6= zeros(500,1);
HEF90F6= zeros(500,1);

% Coleta de dados Massa adicional e
Amortecimento
MassaAddAmort= fopen('t1_1.txt', 'r');
DadosMassaAddAmort=
fscanf(MassaAddAmort,'%f', [5 inf]);
fclose(MassaAddAmort);
DadosMassaAddAmort=
DadosMassaAddAmort';
j=0;
for i=1:9000
    if DadosMassaAddAmort(i,2) ==
DadosMassaAddAmort(i,3)
        if DadosMassaAddAmort(i,2) == 3
            j= 1+(i-8)/18;
            % Preencher vetor Período e
Frequencia
                PeriodoT(j,1)=
DadosMassaAddAmort(i,1);
                FrequenciaW(j,1)=
2*pi/PeriodoT(j,1);

                MassaA33(j,1)=
ro*L^3*DadosMassaAddAmort(i,4);
                AmortB33(j,1)=
ro*L^3*FrequenciaW(j,1)*DadosMassaAddA
mort(i,5);
            end
            if DadosMassaAddAmort(i,2) == 4
                j= 1+(i-11)/18;
                MassaA44(j,1)=
ro*L^5*DadosMassaAddAmort(i,4);
                AmortB44(j,1)=
ro*L^5*FrequenciaW(j,1)*DadosMassaAddA
mort(i,5);
            end
            if DadosMassaAddAmort(i,2) == 5
                j= 1+(i-15)/18;
                MassaA55(j,1)=
ro*L^5*DadosMassaAddAmort(i,4);
                AmortB55(j,1)=
ro*L^5*FrequenciaW(j,1)*DadosMassaAddA
mort(i,5);
            end
        end
    end

FreqN33=sqrt(C33/(Massa+MassaA33(500,1)
);

```

```

FreqN44=sqrt(C44/(Ixx+MassaA44(500,1)));
FreqN55=sqrt(C55/(Iyy+MassaA55(500,1)));
for i=1:500
    numK(i,1)=FrequenciaW(i,1)^2/g;
end

%Coleta de dados HEF
ForcaHEF= fopen('t1_2.txt', 'r');
DadosForcaHEF= fscanf(ForcaHEF,'%f', [7
inf]);
fclose(ForcaHEF);
DadosForcaHEF= DadosForcaHEF';
for i=1:15000
    if DadosForcaHEF(i,2) == 90
        if DadosForcaHEF(i,3) == 2
            j= 1+(i-14)/30;
            HEF90M2(j,1)=
ro*g*AmpOnda*L^2*DadosForcaHEF(i,4);
            HEF90F2(j,1)= DadosForcaHEF(i,5);
        end
        if DadosForcaHEF(i,3) == 3
            j= 1+(i-15)/30;
            HEF90M3(j,1)=
ro*g*AmpOnda*L^2*DadosForcaHEF(i,4);
            HEF90F3(j,1)= DadosForcaHEF(i,5);
        end
        if DadosForcaHEF(i,3) == 4
            j= 1+(i-16)/30;
            HEF90M4(j,1)=
ro*g*AmpOnda*L^3*DadosForcaHEF(i,4);
            HEF90F4(j,1)= DadosForcaHEF(i,5);
        end
        if DadosForcaHEF(i,3) == 6
            j= 1+(i-18)/30;
            HEF90M6(j,1)=
ro*g*AmpOnda*L^3*DadosForcaHEF(i,4);
            HEF90F6(j,1)= DadosForcaHEF(i,5);
        end
    end
    if DadosForcaHEF(i,2) == 180
        if DadosForcaHEF(i,3) == 1
            j= 1+(i-25)/30;
            HEF180M1(j,1)=
ro*g*AmpOnda*L^2*DadosForcaHEF(i,4);
            HEF180F1(j,1)= DadosForcaHEF(i,5);
        end
        if DadosForcaHEF(i,3) == 3
            j= 1+(i-27)/30;
            HEF180M3(j,1)=
ro*g*AmpOnda*L^2*DadosForcaHEF(i,4);
            HEF180F3(j,1)= DadosForcaHEF(i,5);
        end
        if DadosForcaHEF(i,3) == 5
            j= 1+(i-29)/30;

```

```

            HEF180M5(j,1)=
ro*g*AmpOnda*L^3*DadosForcaHEF(i,4);
            HEF180F5(j,1)= DadosForcaHEF(i,5);
        end
    end
end

%Coleta de dados RAO
RespostaRAO= fopen('t1_4.txt', 'r');
DadosRespostaRAO=
fscanf(RespostaRAO,'%f', [7 inf]);
fclose(RespostaRAO);
DadosRespostaRAO= DadosRespostaRAO';
for i=1:15000
    if DadosRespostaRAO(i,2) == 90
        if DadosRespostaRAO(i,3) == 2
            j= 1+(i-14)/30;
            RAO90M2(j,1)=
180/pi*AmpOnda*DadosRespostaRAO(i,4);
            RAO90F2(j,1)=
DadosRespostaRAO(i,5);
        end
        if DadosRespostaRAO(i,3) == 3
            j= 1+(i-15)/30;
            RAO90M3(j,1)=
180/pi*AmpOnda*DadosRespostaRAO(i,4);
            RAO90F3(j,1)=
DadosRespostaRAO(i,5);
        end
        if DadosRespostaRAO(i,3) == 4
            j= 1+(i-16)/30;
            RAO90M4(j,1)=
180/pi*AmpOnda/L*DadosRespostaRAO(i,4);
            RAO90F4(j,1)=
DadosRespostaRAO(i,5);
        end
        if DadosRespostaRAO(i,3) == 6
            j= 1+(i-18)/30;
            RAO90M6(j,1)=
180/pi*AmpOnda/L*DadosRespostaRAO(i,4);
            RAO90F6(j,1)=
DadosRespostaRAO(i,5);
        end
    end
    if DadosRespostaRAO(i,2) == 180
        if DadosRespostaRAO(i,3) == 1
            j= 1+(i-25)/30;
            RAO180M1(j,1)=
180/pi*AmpOnda*DadosRespostaRAO(i,4);
            RAO180F1(j,1)=
DadosRespostaRAO(i,5);
        end
        if DadosRespostaRAO(i,3) == 3
            j= 1+(i-27)/30;

```

```

        RAO180M3(j,1)=
180/pi*AmpOnda*DadosRespostaRAO(i,4);
        RAO180F3(j,1)=
DadosRespostaRAO(i,5);
    end
    if DadosRespostaRAO(i,3) == 5
        j= 1+(i-29)/30;
        RAO180M5(j,1)=
180/pi*AmpOnda/L*DadosRespostaRAO(i,4);
        RAO180F5(j,1)=
DadosRespostaRAO(i,5);
    end
end
end

```

```

%Efeito da velocidade
FreqEnc= zeros(500,1);
MassaA55v= zeros(500,1);
AmortB55v= zeros(500,1);

```

```

for i=1:500
    FreqEnc(i,1)= FrequnciaW(i,1)+
FrequnciaW(i,1)^2*2/9.81;
    MassaA55v(i,1)= MassaA55(i,1)+
4*MassaA33(i,1)/FreqEnc(i,1)^2;
    AmortB55v(i,1)= AmortB55(i,1)+
4*AmortB33(i,1)/FreqEnc(i,1)^2;
end

```

```

%Plotar gráficos Massa Add e Amortecimento

```

```

figure(1);
hold on;
plot(FrequnciaW,MassaA33,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('Massa Adicional (t)
[AFUNDAMENTO]')
grid
legend('A33','Location','Southeast')

```

```

figure(2);
hold on;
plot(FrequnciaW,MassaA44,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('Massa Adicional (t) [JOGO]')
grid
legend('A44','Location','Southeast')

```

```

figure(3);
hold on;
plot(FrequnciaW,MassaA55,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('Massa Adicional (t) [ARFAGEM]')
grid
legend('A55','Location','Southeast')

```

```

figure(4);
hold on;
plot(FrequnciaW,AmortB33,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('Amortecimento (t/s)
[AFUNDAMENTO]')
grid
legend('B33','Location','Southeast')

```

```

figure(5);
hold on;
plot(FrequnciaW,AmortB44,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('Amortecimento (t/s) [JOGO]')
grid
legend('B44','Location','Southeast')

```

```

figure(6);
hold on;
plot(FrequnciaW,AmortB55,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('Amortecimento (t/s) [ARFAGEM]')
grid
legend('B55','Location','Southeast')

```

```

%Plotar graficos Forças e Momentos + FASE

```

```

figure(7);
hold on;
plot(FrequnciaW,HEF180M1,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('Força de Excitação (kN) [AVANÇO]')
grid
legend('HEF1, aproamento
180°','Location','Southeast')

```

```

figure(8);
hold on;
plot(FrequnciaW,HEF180M3,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('Força de Excitação (kN)
[AFUNDAMENTO]')
grid
legend('HEF3, aproamento
180°','Location','Southeast')

```

```

figure(9);
hold on;
plot(FrequnciaW,HEF180M5,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('Momento de Excitação (kN.m)
[ARFAGEM]')
grid
legend('HEF5, aproamento
180°','Location','Southeast')

```

```

figure(10);
hold on;
plot(FrequenciaW,HEF90M2,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('Força de Excitação (kN) [DERIVA]')
grid
legend('HEF2, aproamento
90°','Location','Southeast')

```

```

figure(11);
hold on;
plot(FrequenciaW,HEF90M3,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('Força de Excitação (kN)
[AFUNDAMENTO]')
grid
legend('HEF3, aproamento
90°','Location','Southeast')

```

```

figure(12);
hold on;
plot(FrequenciaW,HEF90M4,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('Momento de Excitação (kN.m)
[JOGO]')
grid
legend('HEF4, aproamento
90°','Location','Southeast')

```

```

figure(13);
hold on;
plot(FrequenciaW,HEF90M6,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('Momento de Excitação (kN.m)
[GUINADA]')
grid
legend('HEF6, aproamento
90°','Location','Southeast')

```

```

figure(14);
hold on;
plot(FrequenciaW,HEF180F1,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('Força de Excitação (graus) [FASE]
[AVANÇO]')
grid
legend('HEF1, aproamento
180°','Location','Southeast')

```

```

figure(15);
hold on;
plot(FrequenciaW,HEF180F3,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('Força de Excitação (graus) [FASE]
[AFUNDAMENTO]')

```

```

grid
legend('HEF3, aproamento
180°','Location','Southeast')

```

```

figure(16);
hold on;
plot(FrequenciaW,HEF180F5,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('Momento de Excitação (graus) [FASE]
[ARFAGEM]')
grid
legend('HEF5, aproamento
180°','Location','Southeast')

```

```

figure(17);
hold on;
plot(FrequenciaW,HEF90F2,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('Força de Excitação (graus) [FASE]
[DERIVA]')
grid
legend('HEF2, aproamento
90°','Location','Southeast')

```

```

figure(18);
hold on;
plot(FrequenciaW,HEF90F3,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('Força de Excitação (graus) [FASE]
[AFUNDAMENTO]')
grid
legend('HEF3, aproamento
90°','Location','Southeast')

```

```

figure(19);
hold on;
plot(FrequenciaW,HEF90F4,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('Momento de Excitação (graus) [FASE]
[JOGO]')
grid
legend('HEF4, aproamento
90°','Location','Southeast')

```

```

figure(20);
hold on;
plot(FrequenciaW,HEF90F6,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('Momento de Excitação (graus) [FASE]
[GUINADA]')
grid
legend('HEF6, aproamento
90°','Location','Southeast')

```

```

%Plotar graficos RAO + FASE

```

```
figure(21);
hold on;
plot(FrequenciaW,RAO180M1,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('RAO (m/m) [AVANÇO]')
grid
legend('RAO1, aproamento
180°, Location', 'Southeast')
```

```
figure(22);
hold on;
plot(FrequenciaW,RAO180M3,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('RAO (m/m) [AFUNDAMENTO]')
grid
legend('RAO3, aproamento
180°, Location', 'Southeast')
```

```
figure(23);
hold on;
plot(FrequenciaW,RAO180M5,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('RAO (graus/m) [ARFAGEM]')
grid
legend('RAO5, aproamento
180°, Location', 'Southeast')
```

```
figure(24);
hold on;
plot(FrequenciaW,RAO90M2,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('RAO (m/m) [DERIVA]')
grid
legend('RAO2, aproamento
90°, Location', 'Southeast')
```

```
figure(25);
hold on;
plot(FrequenciaW,RAO90M3,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('RAO (m/m) [AFUNDAMENTO]')
grid
legend('RAO3, aproamento
90°, Location', 'Southeast')
```

```
figure(26);
hold on;
plot(FrequenciaW,RAO90M4,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('RAO (graus/m) [JOGO]')
grid
legend('RAO4, aproamento
90°, Location', 'Southeast')
```

```
figure(27);
```

```
hold on;
plot(FrequenciaW,RAO90M6,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('RAO (graus/m) [GUINADA]')
grid
legend('RAO6, aproamento
90°, Location', 'Southeast')
```

```
figure(28);
hold on;
plot(FrequenciaW,RAO180F1,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('RAO (graus) [FASE] [AVANÇO]')
grid
legend('RAO1, aproamento
180°, Location', 'Southeast')
```

```
figure(29);
hold on;
plot(FrequenciaW,RAO180F3,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('RAO (graus) [FASE]
[AFUNDAMENTO]')
grid
legend('RAO3, aproamento
180°, Location', 'Southeast')
```

```
figure(30);
hold on;
plot(FrequenciaW,RAO180F5,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('RAO (graus) [FASE] [ARFAGEM]')
grid
legend('RAO5, aproamento
180°, Location', 'Southeast')
```

```
figure(31);
hold on;
plot(FrequenciaW,RAO90F2,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('RAO (graus) [FASE] [DERIVA]')
grid
legend('RAO2, aproamento
90°, Location', 'Southeast')
```

```
figure(32);
hold on;
plot(FrequenciaW,RAO90F3,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('RAO (graus) [FASE]
[AFUNDAMENTO]')
grid
legend('RAO3, aproamento
90°, Location', 'Southeast')
```



```

figure(33);
hold on;
plot(FrequenciaW,RAO90F4,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('RAO (graus) [FASE] [JOGO]')
grid
legend('RAO4, aproamento
90°','Location','Southeast')

```

```

figure(34);
hold on;
plot(FrequenciaW,RAO90F6,'bs-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('RAO (graus) [FASE] [GUINADA]')
grid
legend('RAO6, aproamento
90°','Location','Southeast')

```

```

figure(35);
hold on;

```

```

plot(FreqEnc,MassaA55v,'bs-')
',FrequenciaW,MassaA55,'bo-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('Massa Adicional (t) [ARFAGEM]
v=2m/s')
grid
legend('A55 + efeito
velocidade','A55','Location','Southeast')

```

```

figure(36);
hold on;
plot(FreqEnc,AmortB55v,'bs-')
',FrequenciaW,AmortB55,'bo-')
xlabel('Frequência, W (rad/s)')
ylabel('Amortecimento (t/s) [ARFAGEM]
v=2m/s')
grid
legend('B55 + efeito
velocidade','B55','Location','Southeast')

```

APÊNDICE II – CÓDIGO MATLAB PARA CALCULO DA PROBABILIDADE DE ÁGUA NO CONVÉS

```

close all;
DadosWAMIT;
%Probabilidade de água no convés
Tpico=0.566;
Wpico=2*pi/Tpico;
Hs=2*AmpOnda;
A=zeros(500,1);
SwW=zeros(500,1);
FreqWe=zeros(500,1);
FreqW=zeros(500,1);
%espectro de onda
for i=1:500
    FreqWe(i,1)=FreqEnc(i,1);
    FreqW(i,1)=FrequenciaW(i,1);
    if FreqW(i,1) <= Wpico
        A(i,1)=exp(-(((FreqW(i,1)/Wpico)-
1)/(0.07*sqrt(2)))^2);

SwW(i,1)=320*Hs/(Tpico^4*FreqW(i,1)^5)*e
xp((-
1950/(Tpico^4*FreqW(i,1)^4))) * 3.3^A(i,1);
        else
            A(i,1)=exp(-(((FreqW(i,1)/Wpico)-
1)/(0.09*sqrt(2)))^2);

SwW(i,1)=320*Hs/(Tpico^4*FreqW(i,1)^5)*e
xp((-
1950/(Tpico^4*FreqW(i,1)^4))) * 3.3^A(i,1);
        end
    end
    SwWe=zeros(500,1);
    for i=1:500
        SwWe(i,1)=SwW(i,1)/(1+4*FreqW(i,1)/g);
    end

    %Movimento absoluto
    P1=zeros(500,1);
    P2=zeros(500,1);
    Sz0=zeros(500,1);
    Sfz0=zeros(500,1);
    for i=1:500
        P1(i,1)=
        RAO180M3(i,1)*cos(RAO180F3(i,1))-
        1.363*RAO180M5(i,1)*cos(RAO180F5(i,1))/
        numK(i,1);
        P2(i,1)=
        RAO180M3(i,1)*sin(RAO180F3(i,1))-
        1.363*RAO180M5(i,1)*sin(RAO180F5(i,1))/n
        umK(i,1);
        Sz0(i,1)= sqrt(P1(i,1)^2+P2(i,1)^2);
        Sfz0(i,1)= atan(P2(i,1)/P1(i,1));
    end
    Sz0We=zeros(500,1);
    for i=1:500
        Sz0We(i,1)=Sz0(i,1)/(1+4*FreqW(i,1)/g);
    end
    SrWe=zeros(500,1);
    for i=1:500
        SrWe(i,1)=Sz0We(i,1)^2*SwWe(i,1);
    end

    m0z=-trapz(FreqWe,SrWe);
    ProbZ=exp(-0.058^2/(2*m0z));

    figure(37);
    hold on;
    plot(FreqWe,Sz0We,'s-')
    xlabel('Frequência We')
    ylabel('RAOp(We)')
    grid
    figure(38);
    hold on;
    plot(FreqWe,SwWe,'*-')
    xlabel('Frequência We')
    ylabel('Espectro de Onda JONSWAP (We)')
    grid
    figure(39);
    hold on;
    plot(FreqWe,SrWe,'o-')
    xlabel('Frequência We')
    ylabel('Espectro de Resposta (We)')
    grid

```

APÊNDICE III – CÓDIGO MATLAB PARA PROJETO DO HÉLICE APLICANDO A METODOLOGIA ELEMENTO DE PÁ

```

% Projeto do Propulsor 4 pás
close all;
clear all;
Z=4;
ro=1025;
Db=0.04;
Dp=0.16;
Rp=0.08;
Va=1.802;
n=[10.83 11.83 12.83 13.83 14.85 15.83];
n=n';
r=[0.02 0.0275 0.035 0.0425 0.05 0.0575 0.065
0.0725 0.08];
r=r';
c=[0.0238452 0.0256206 0.0294234
0.0329223 0.0355246 0.0394588 0.0452615
0.0581487 0.0227744];
c=c';
AnPasso=[52.732 45.794 40.180 35.614
31.931 26.214 22.164 19.954 17.924];
AnPasso=AnPasso';
AnInc= zeros(9,6);
AnAtq= zeros(9,6);
rpe=zeros(9,1);
J=zeros(6,1);
for i=1:9
    rpe(i,1)=r(i,1)/Rp;
end
for j=1:6
    J(j,1)=Va/(n(j,1)*Dp);
end
for i=1:9
    for j=1:6
        AnInc(i,j)= atan(Va/(2*pi*r(i,1)*n(j,1)));
        AnAtq(i,j)= AnPasso(i,1)-
180/pi*AnInc(i,j);
    end
end

DadosCl= fopen('Cl.txt', 'r');
Cl= fscanf(DadosCl,'%f', [6 inf]);
fclose(DadosCl);
Cl= Cl';

DadosCd= fopen('Cd.txt', 'r');
Cd= fscanf(DadosCd,'%f', [6 inf]);
fclose(DadosCd);
Cd= Cd';

dL= zeros(9,6);
dD= zeros(9,6);
dT= zeros(9,6);
dQr= zeros(9,6);
for i=1:9
    for j=1:6
        dL(i,j)=Cl(i,j)*(ro/2)*Z*c(i,1)*(Va^2/(sin(AnInc(i,j))*sin(AnInc(i,j))));
        dD(i,j)=Cd(i,j)*(ro/2)*Z*c(i,1)*(Va^2/(sin(AnInc(i,j))*sin(AnInc(i,j))));
        dT(i,j)=dL(i,j)*cos(AnInc(i,j))-
dD(i,j)*sin(AnInc(i,j));
        dQr(i,j)=r(i,1)*(dL(i,j)*sin(AnInc(i,j))+dD(i,j)
*cos(AnInc(i,j)));
    end
end

dT1=zeros(9,1);
dT2=zeros(9,1);
dT3=zeros(9,1);
dT4=zeros(9,1);
dT5=zeros(9,1);
dT6=zeros(9,1);
dQ1=zeros(9,1);
dQ2=zeros(9,1);
dQ3=zeros(9,1);
dQ4=zeros(9,1);
dQ5=zeros(9,1);
dQ6=zeros(9,1);
for i=1:9
    dT1(i,1)=dT(i,1);
    dT2(i,1)=dT(i,2);
    dT3(i,1)=dT(i,3);
    dT4(i,1)=dT(i,4);
    dT5(i,1)=dT(i,5);
    dT6(i,1)=dT(i,6);
    dQ1(i,1)=dQr(i,1);
    dQ2(i,1)=dQr(i,2);
    dQ3(i,1)=dQr(i,3);
    dQ4(i,1)=dQr(i,4);
    dQ5(i,1)=dQr(i,5);
    dQ6(i,1)=dQr(i,6);
end

% Curvas dT, dQ/r
figure(1);
hold on;

```

```

plot(rpe,dT1,'-g',rpe,dT2,'-+b',rpe,dT3,'-
oc',rpe,dT4,'-sm',rpe,dT5,'-^y',rpe,dT6,'-pk')
xlabel('Distância(%)')
ylabel('dT')
grid
legend('n= 10.83 hz','n= 11.83 hz','n= 12.83
hz','n= 13.83 hz','n= 14.85 hz','n= 15.83
hz','Location','Southeast')

figure(2);
hold on;
plot(rpe,dQ1,'-g',rpe,dQ2,'-+b',rpe,dQ3,'-
oc',rpe,dQ4,'-sm',rpe,dQ5,'-^y',rpe,dQ6,'-pk')
xlabel('Distância(%)')
ylabel('dQ')
grid
legend('n= 10.83 hz','n= 11.83 hz','n= 12.83
hz','n= 13.83 hz','n= 14.85 hz','n= 15.83
hz','Location','Southeast')

%Calculo T e Q, considerando o propulsor,
aplicando a Regra de Simpson 1/3
h=(Rp-Rp/4)/8;
T= zeros(6,1);
Q= zeros(6,1);
for j=1:6

```

```

T(j,1)=
h/3*(dT(1,j)+dT(9,j)+2*dT(3,j)+2*dT(5,j)+2*
dT(7,j)+4*dT(2,j)+4*dT(4,j)+4*dT(6,j)+4*dT(
8,j));
Q(j,1)=
h/3*(dQr(1,j)+dQr(9,j)+2*dQr(3,j)+2*dQr(5,j)
+2*dQr(7,j)+4*dQr(2,j)+4*dQr(4,j)+4*dQr(6,j)
)+4*dQr(8,j));
end
Kt=zeros(6,1);
Kq=zeros(6,1);
Efic=zeros(6,1);
for i=1:6
Kt(i,1)= T(i,1)/(ro*n(i,1)^2*Dp^4);
Kq(i,1)= 10*Q(i,1)/(ro*n(i,1)^2*Dp^5);
Efic(i,1)=10*J(i,1)*Kt(i,1)/(Kq(i,1)*2*pi);
end

figure(3)
hold on;
plot(J,Kt,'-g',J,Kq,'-+b',J,Efic,'-oc')
xlabel('Coeficiente de Avanço J')
ylabel('Kt , 10.Kq, n')
grid
legend('Kt','10.Kq','n','Location','Southeast')

```

ANEXO I – VALIDAÇÃO DO MÉTODO *SLENDER SHIP* REALIZADO PELO *MAXSURF*

Os resultados obtidos utilizando o método *Slender Body* (navio esbelto) para a resistência são comparados com dados do modelo testado. São aplicados para os cascos tipo monocasco, catamarã e trimarã.

A forma possui os seguintes parâmetros:

L/B 10,0

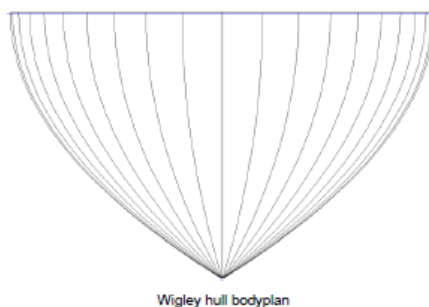
B/T 1,6

C_B 0,44

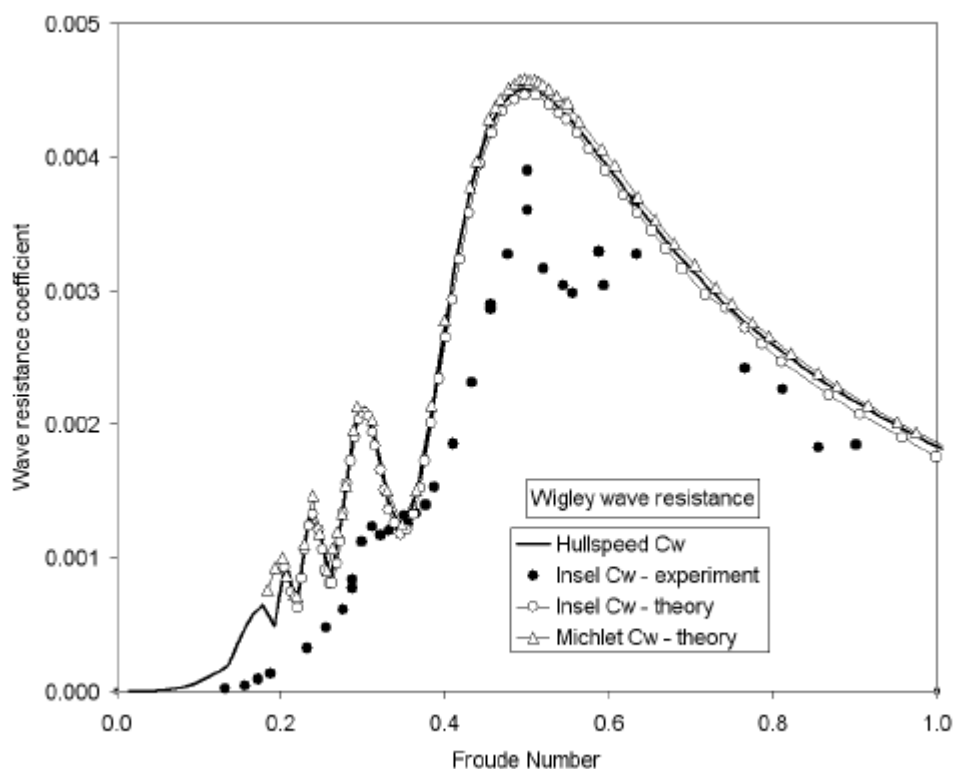
C_P 0,44

C_M 0,44

Para o monocasco:

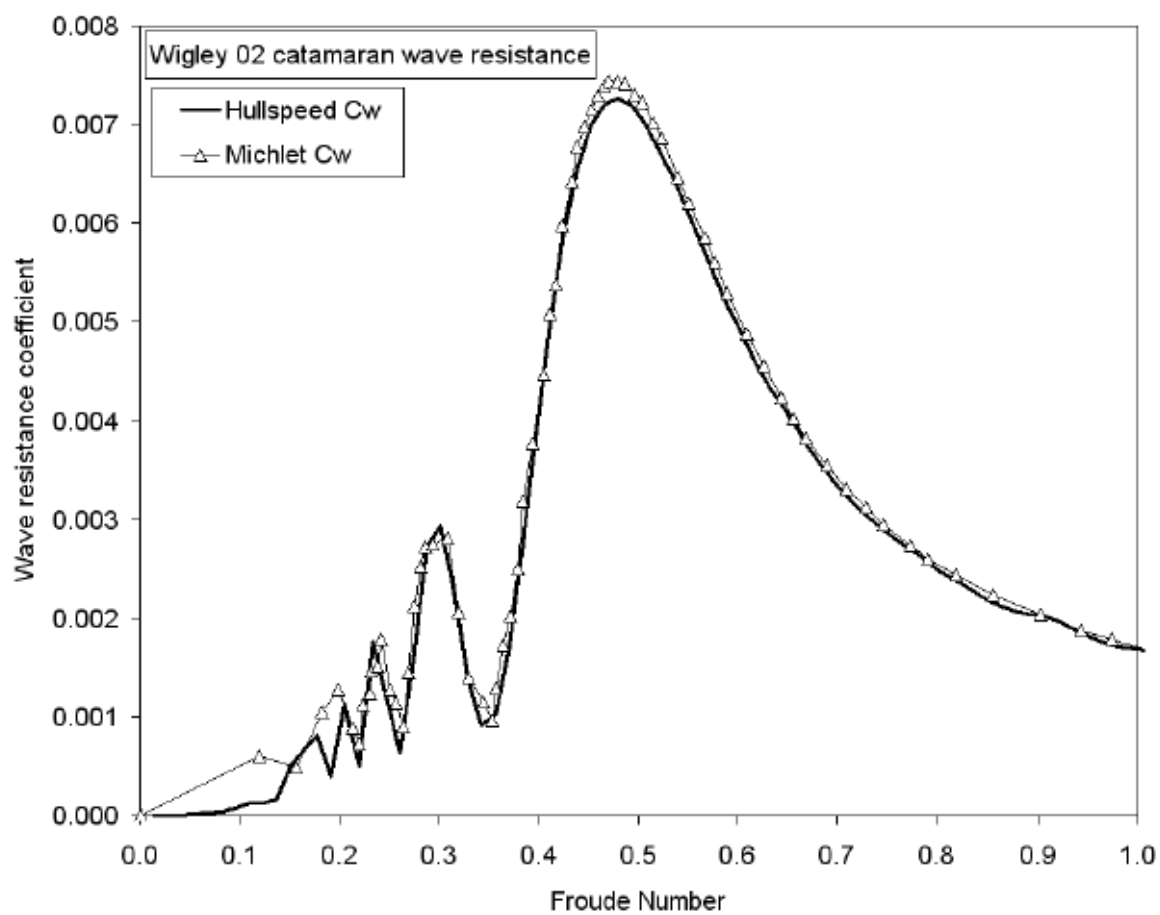
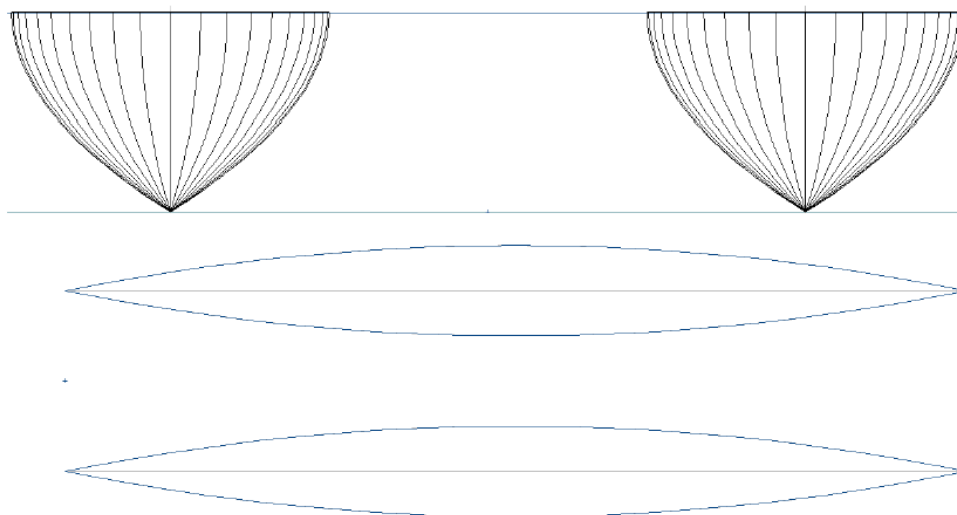


Wigley hull bodyplan



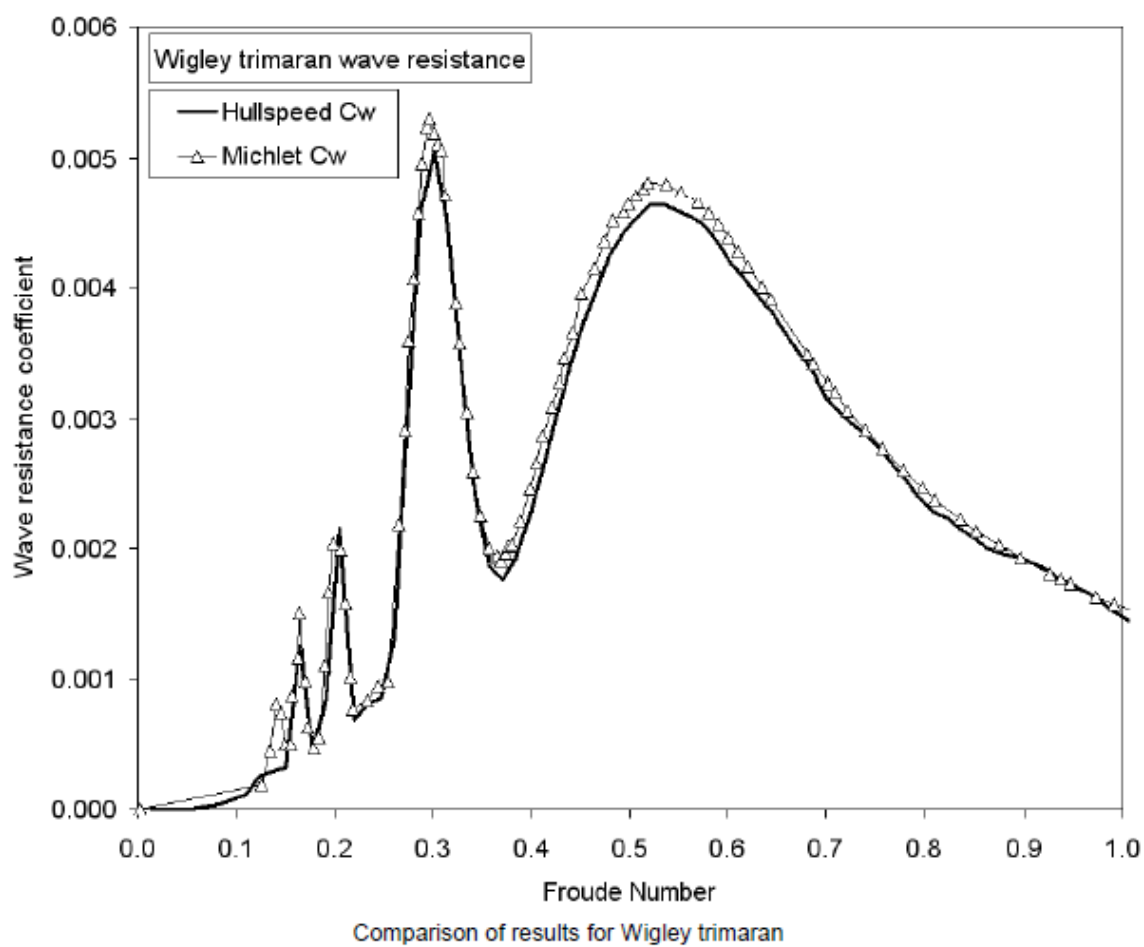
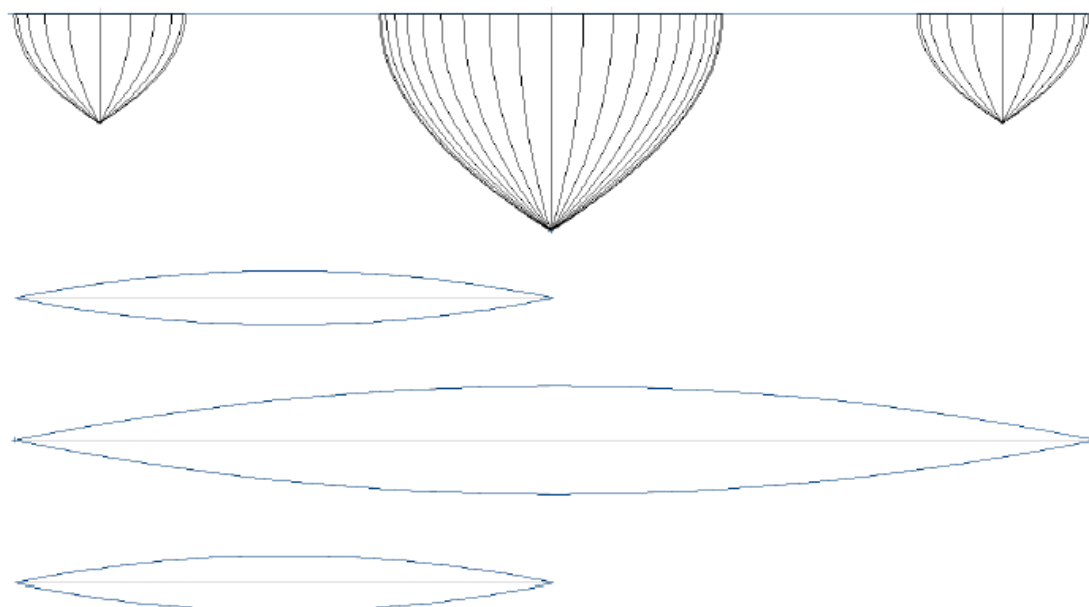
Comparison of results for Wigley hull

Para o catamarã: Distancia do centro ao casco / Comprimento = 0,2.



Comparison of results for Wigley catamaran

Para o trimarã:



ANEXO II – PERFIL NACA2410

O perfil NACA2410 utilizado no processo de projeto do hélice é apresentado na Figura 27 e curvas características são apresentadas na Figura 28 com ângulo de ataque de 3° .

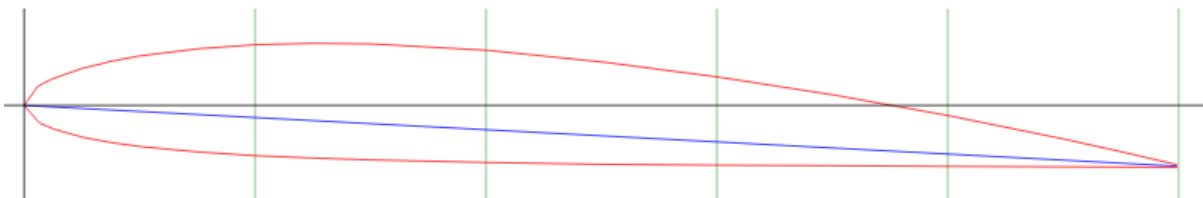


Figura 44: Perfil NACA2410, 3° ângulo de ataque.

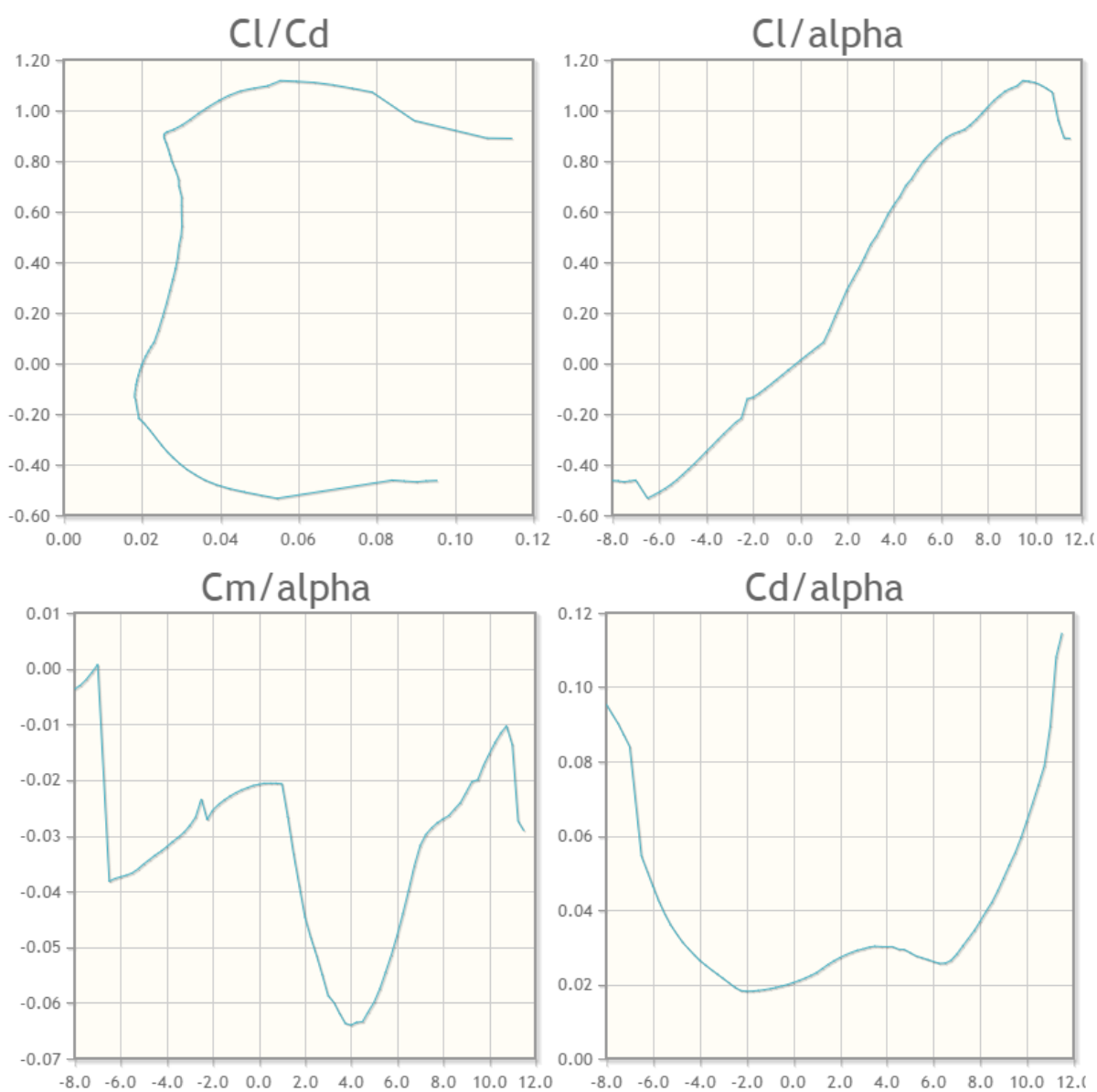


Figura 45: Curvas características Cl/Cd , Cl/α , Cm/α e Cd/α .

ANEXO III – CURVAS SÉRIE SISTEMÁTICA B DE WAGENINGEN

Neste anexo são apresentadas as tabelas utilizadas para avaliação da condição ótima de atuação e definição do hélice.

FIGURE 41. WAGENINGEN B-SERIES PROPELLERS
FOR 4 BLADES $AE/AO = 0.700$
 $P/D = 0.50$ TO 1.40

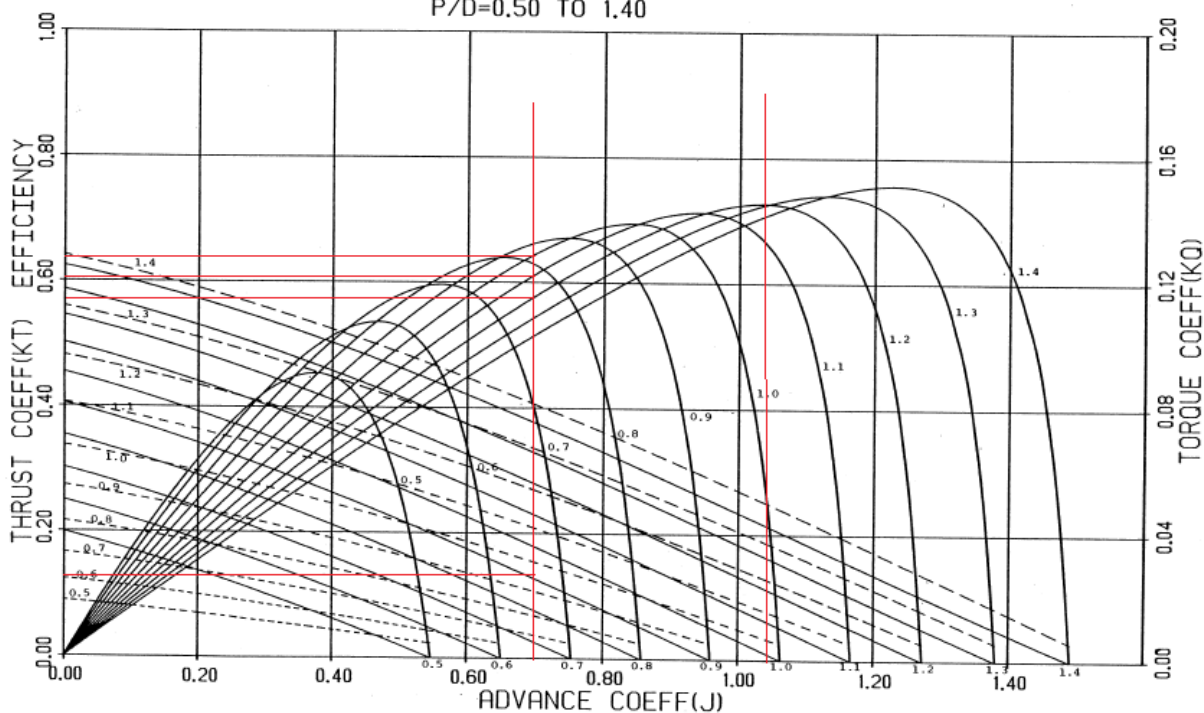


FIGURE 43. WAGENINGEN B-SERIES PROPELLERS
FOR 4 BLADES $AE/AO = 0.800$
 $P/D = 0.50$ TO 1.40

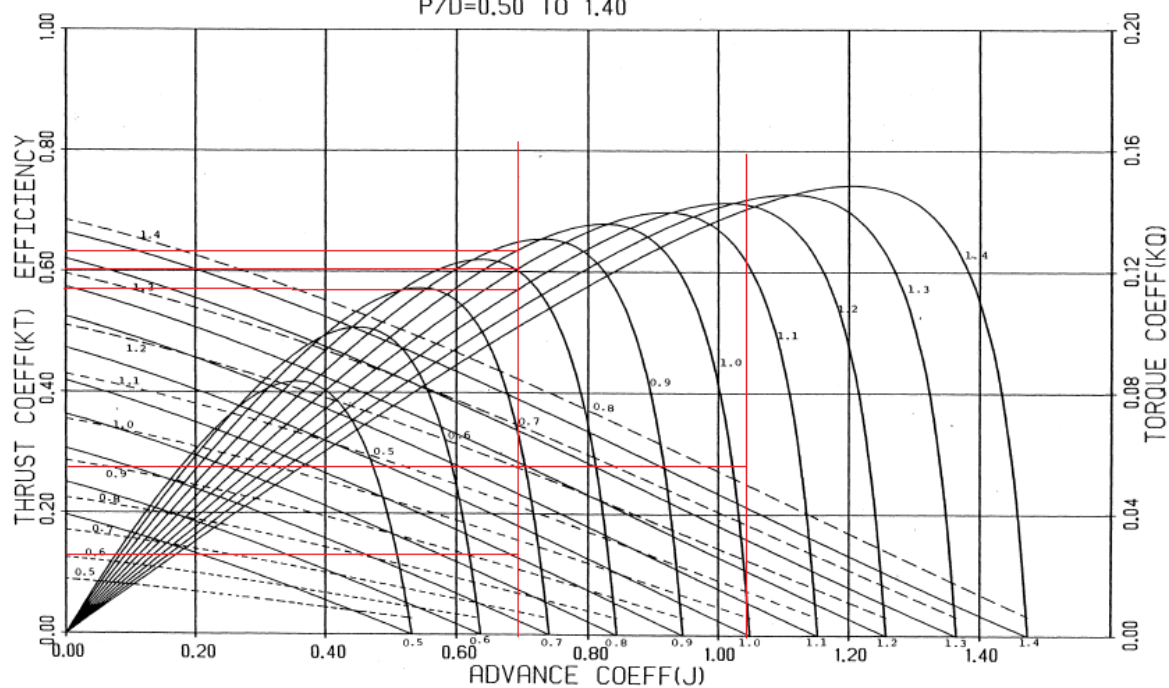


FIGURE 44. WAGENINGEN B-SERIES PROPELLERS
 FOR 4 BLADES $AE/AO = 0.850$
 $P/D = 0.50$ TO 1.40

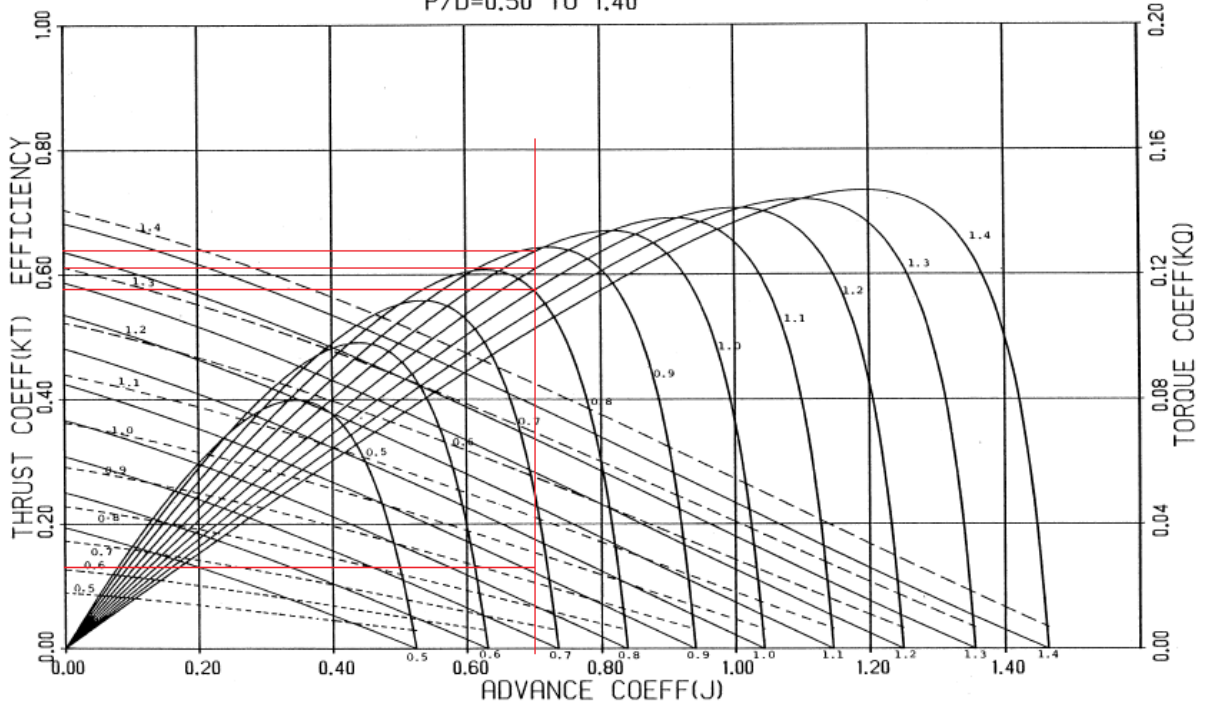


FIGURE 45. WAGENINGEN B-SERIES PROPELLERS
 FOR 4 BLADES $AE/AO = 0.900$
 $P/D = 0.50$ TO 1.40

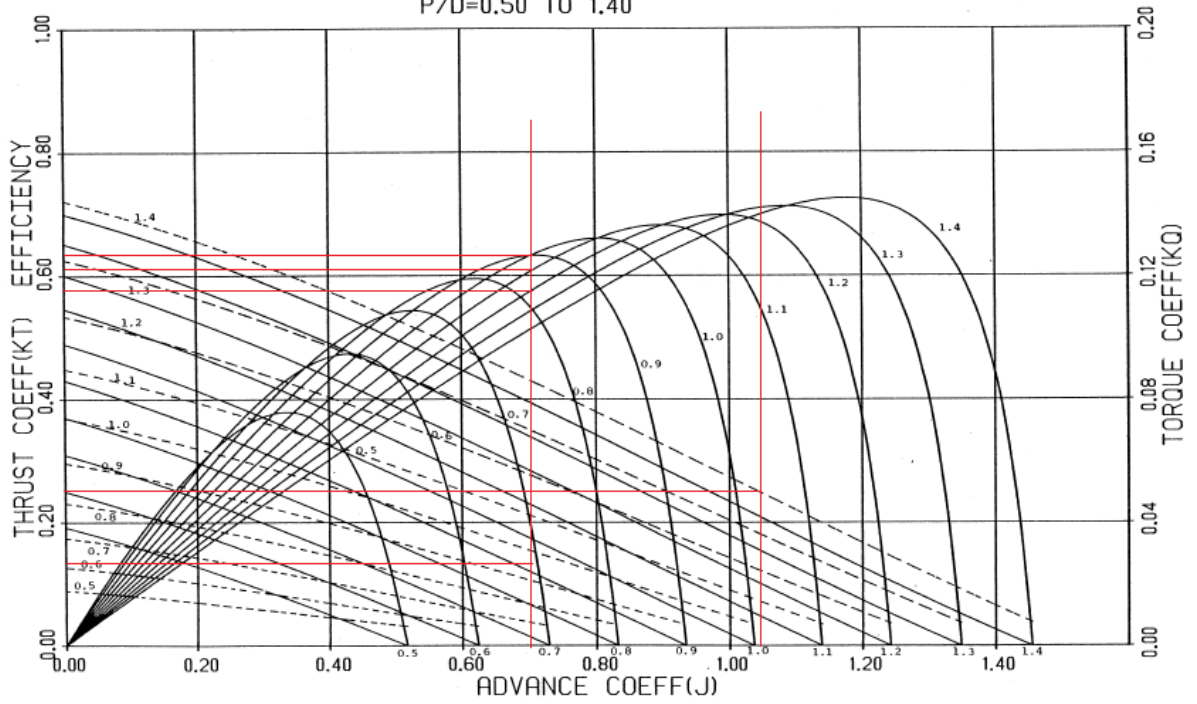


FIGURE 47. WAGENINGEN B-SERIES PROPELLERS
 FOR 4 BLADES $AE/AO = 1.000$
 $P/D = 0.50$ TO 1.40

