

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO – UFPE
CENTRO DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS - CTG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL

PROJETO PRELIMINAR DE CATAMARÃ SOLAR DE ALTO
DESEMPENHO PARA A COMPETIÇÃO DESAFIO SOLAR
BRASIL

MARCOS VINÍCIUS ASSUNÇÃO DA SILVA

Recife

2022

MARCOS VINICÍUS ASSUNÇÃO DA SILVA

PROJETO PRELIMINAR DE CATAMARÃ SOLAR DE ALTO DESEMPENHO
PARA A COMPETIÇÃO DESAFIO SOLAR BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Naval da Universidade Federal de
Pernambuco como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do Grau de
Bacharel em Engenharia Naval.

Orientador: Cesar Augusto Salhua Moreno

Recife

2022

Marcos Vinícius Assunção da Silva

**PROJETO PRELIMINAR DE CATAMARÃ SOLAR DE ALTO
DESEMPENHO PARA A COMPETIÇÃO DESAFIO SOLAR BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Naval da Universidade Federal de
Pernambuco como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do Grau de
Bacharel em Engenharia Naval.

Prof. Cesar Augusto Salhua Moreno
Doutor / Universidade Federal de Pernambuco – UFPE
Orientador

Prof. Miguel Angel Celis Carbajal
Doutor / Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Prof. Miguel Renato Manco Rivera
Doutor / Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Prof. Silvio Eduardo Gomes de Melo
Doutor / Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Recife, 2022

RESUMO

O trabalho apresenta o desenvolvimento do projeto preliminar de uma embarcação movida a energia solar com o intuito de participar na competição Desafio Solar Brasil, que reúne diversas universidades promovendo a discussão de novas tecnologias no uso de fontes alternativas de energia. O desenvolvimento se deu a partir de metodologias de projeto de embarcações, como as ferramentas de Trinômio Síntese-Análise-Avaliação e *Quality Function Deployment* (QFD), dando origem ao fluxograma de projeto. Inicialmente, são definidos a forma e a compartimentação do catamarã, sendo seguidos das análises de estabilidade intacta e em avarias. Outros tópicos elaborados são o cálculo da resistência ao avanço, sistema propulsivo, seakeeping, manobrabilidade, características estruturais e dimensionamento do sistema de geração de energia bem como seus componentes.

Palavras-chave: embarcação solar; energia limpa; catamarã; Desafio Solar Brasil.

ABSTRACT

The project presents the development of the preliminary design of a solar energy powered catamaran with the purpose of joining the competition Desafio Solar Brasil (Brazil Solar Challenge), gathering various universities to promote the discussion about new technologies regarding alternative energy sources. This development was created from ship design methodologies such as Synthesis-Analysis-Evaluation Trinomial and Quality Function Deployment (QFD), originating the Project Fluxogram. Initially, the shape and compartmentage of the catamaran are defined, being followed by the intact and damage stability analysis. Other evaluated topics are the ship resistance, propulsive system, seakeeping, maneuverability, structural characteristics and the energy generation system sizing as well as their componentes.

Keywords: solar ship; clean energy; catamaran; Brazil Solar Challenge.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Categorização de embarcações solares.	16
Figura 2. Trinômio Síntese-Análise-Avaliação.	23
Figura 3. Força tangencial e pressão atuantes na superfície da embarcação.	24
Figura 4. Padrão de Ondas formado por um catamarã, representado em linhas isométricas.	24
Figura 5. Conversão de potência em empuxo.	25
Figura 6. Considerações gerais dos componentes principais do sistema propulsivo.	26
Figura 7. Condições de Estabilidade.	27
Figura 8. Estabilidade inicial de um catamarã.	28
Figura 9. Esquemática dos componentes do sistema fotovoltaico de uma embarcação solar.	29
Figura 10. Exemplo de arranjo de sistema fotovoltaico.	30
Figura 11. Módulo fotovoltaico.	31
Figura 12. Graus de liberdade de sistemas flutuantes.	33
Figura 13. Parâmetros de posição do leme.	41
Figura 14. Dimensões Principais da embarcação.	44
Figura 15. Fluxograma de Projeto.	52
Figura 16. Curvas GZ utilizadas nos critérios de estabilidade em avaria.	56
Figura 17. Reforços longitudinais na seção mestra.	61
Figura 18. Curvas de resistência ao avanço, forma original (vermelho) e modificada (azul)	66
Figura 19. Vista longitudinal da embarcação.	66
Figura 20. Vista de planta da embarcação.	66
Figura 21. Vista transversal da embarcação.	67
Figura 22. Modelo da embarcação no software Maxsurf.	67
Figura 23. Dimensões principais da embarcação, na vista longitudinal (a) e na vista de planta (b).	68
Figura 24. Compartimentos da embarcação.	69
Figura 25. Blocos de poliuretano (em azul) nos compartimentos da embarcação.	70
Figura 26. Malha de painéis da embarcação gerada no Ansys.	74

Figura 27. Massa Adicional em Heave x Frequência.....	76
Figura 28. Massa Adicional em Roll x Frequência.....	76
Figura 29. Massa Adicional em Pitch x Frequência.....	77
Figura 30. RAOs em Heave, para as direções de (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°, (d) 135° e (e) 180°.....	78
Figura 31. RAOs em Roll, para as direções de (a) 45°, (b) 90° e (c) 135°.....	80
Figura 32. RAOs em Pitch, para as direções de (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°, (d) 135° e (e) 180°.....	81
Figura 33. Período de Picos das Ondas ao longo do litoral brasileiro.....	83
Figura 34. Espectro de Ondas de Jonswap.....	84
Figura 35. Curva de peso leve total.....	91
Figura 36. Curva de pesos de um dos cascos considerando o piloto.....	92
Figura 37. Condições ambientais consideradas para avaliar a resistência estrutural, (a) em águas calmas, (b) condição de alquebramento e (c) condição de tosamento.....	92
Figura 38. Resultados da análise da viga navio, nas condições de (a) águas calmas, (b) alquebramento e (c) tosamento.....	93
Figura 39. Estrutura de união, destacada em verde.....	95
Figura 40. Representação das forças de apoio (a) sendo decompostas em forças e momentos gerados ao longo da viga, (b) e (c), resultando na distribuição de forças e momentos mostrada na figura (d).....	96
Figura 41. Pontos de análise para o dimensionamento da estrutura de união.....	97
Figura 42. Dimensões da seção transversal da viga utilizada.....	98
Figura 43. Resultados da análise de elementos finitos, sendo (a) o momento fletor e (b) a deflexão total.....	98
Figura 44. Representação das anteparas, formando os compartimentos da embarcação.....	101
Figura 45. Reforços longitudinais de fundo, dispostos na seção mestra.....	102
Figura 46. Reforços longitudinais de costado, dispostos na seção mestra.....	103
Figura 47. Dimensão das cavernas, representada na seção mestra.....	104
Figura 48. Dimensão das hastilhas, representada na seção mestra.....	105
Figura 49. Dimensão do vão, representado na seção mestra.....	106
Figura 50. Representação das dimensões do reforço.....	106
Figura 51. Dimensões do reforço longitudinal de fundo.....	107

Figura 52. Dimensões do reforço longitudinal de costado.	108
Figura 53. Dimensões da caverna.	108
Figura 54. Representação da seção mestra, com os reforços longitudinais e a estrutura de união dispostos.	110
Figura 55. Gráfico da velocidade vs. Resistência.	111
Figura 56. Gráfico da velocidade vs. Potência.	111
Figura 57. Representação aproximada da posição do motor.	113
Figura 58. (a) Distribuição de pressão normal em um fólio e (b) distribuição de pressão com a ocorrência de cavitação.	114
Figura 59. Bateria Estacionária Heliar Freedom DF1500.	116
Figura 60. Irradiação solar diária média no local da competição, ao longo do ano.	117
Figura 61. Arranjo dos painéis fotovoltaicos.	118
Figura 62. Controlador de carga MPPT 20A XTRA 2010N, da Epever.	119
Figura 63. Inversor Senoidal 350W 12/220V Ipower IP350-12, da Epever.	120
Figura 64. Representação do leme modelado.	121
Figura 65. Arranjo geral da embarcação, (a) Vista Longitudinal, (b) Vista de Planta e (c) Vista Transversal.	126
Figura 66. Coeficientes K_t e K_q da Série Wageningen.	135
Figura 67. Influência do número de Reynolds nos coeficientes de empuxo e torque. .	136
Figura 68. Forças de Excitação em Heave, para as direções de (a) 0° , (b) 45° , (c) 90° , (d) 135° e (e) 180°	138
Figura 69. Forças de Excitação em Roll, para as direções de (a) 45° , (b) 90° e (c) 135°	140
Figura 70. Forças de Excitação em Pitch, para as direções de (a) 0° , (b) 45° , (c) 90° , (d) 135° e (e) 180°	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características das seções transversais de diferentes tipos de lemes tridimensionais.	42
Tabela 2. Características principais definidas pelo DSB.....	44
Tabela 3. Descrição dos elementos de síntese.....	46
Tabela 4. Descrição dos elementos de análise e as ferramentas utilizadas.	47
Tabela 5. Graus de Influência na Matriz de Influência.	48
Tabela 6. Matriz de Influência.....	49
Tabela 7. Matriz de Qualidade.	49
Tabela 8. Interação entre os elementos de síntese, análise e avaliação.	50
Tabela 9. Avaliações presentes no fluxograma.	53
Tabela 10. Valores das características de um propulsor da série Wageningen.	59
Tabela 11. Dimensões Principais e Coeficientes de Forma.....	67
Tabela 12. Volume de poliuretano para reserva de flutuação.	69
Tabela 13. Permeabilidade final dos compartimentos.....	70
Tabela 14. Condição de carregamento para as análises de equilíbrio e estabilidade.	70
Tabela 15. Condição de equilíbrio estático.	71
Tabela 16. Valores para os critérios de estabilidade intacta.....	72
Tabela 17. Extensões das avarias, de acordo com o HSC Code.....	72
Tabela 18. Casos de estabilidade em avarias analisados, e os critérios de estabilidade para cada caso.....	73
Tabela 19. Quantidade de nós e elementos utilizados na análise do método dos painéis.	75
Tabela 20. Raios de Giração e Propriedades de massa da embarcação.....	75
Tabela 21. Coeficientes de Restauração em Heave, Roll e Pitch.	77
Tabela 22. Frequências e Períodos Naturais em Heave, Roll e Pitch.....	77
Tabela 23. Parâmetros para o cálculo do espectro padrão.....	84
Tabela 24. Resultados do fenômeno de imersão de proa, para os diferentes aproamentos.	85
Tabela 25. Resultados do fenômeno de emersão do propulsor, para os diferentes aproamentos.....	85

Tabela 26. Peso total das fibras que compõem o casco.....	88
Tabela 27. Peso leve dos Equipamentos.....	88
Tabela 28. Divisão da embarcação em partes, usada na curva de pesos.	89
Tabela 29. Peso leve estrutural total da embarcação ao longo do comprimento.....	90
Tabela 30. Pesos considerados na soma de peso leve.	91
Tabela 31. Valores de momento fletor e tensão atuante nas diferentes condições de onda.	94
Tabela 32. Forças e momentos sobre cada viga transversal.....	97
Tabela 33. Pressões hidrostáticas de projeto atuantes no fundo e costado.....	99
Tabela 34. Espessura mínima do laminado do casco.	100
Tabela 35. Espessura mínima das anteparas.....	100
Tabela 36. Módulo de seção mínimo dos reforços longitudinais de fundo.....	101
Tabela 37. Módulo de seção mínimo dos reforços longitudinais de costado.....	102
Tabela 38. Módulo de seção das cavernas.....	103
Tabela 39. Módulo de seção das hastilhas.....	104
Tabela 40. Módulo de seção do vão.	105
Tabela 41. Valores relacionados ao cálculo do módulo de seção da seção mestra, de acordo com a ABS.....	109
Tabela 42. Valores relacionados ao cálculo do módulo de seção da seção mestra real.	109
Tabela 43. Velocidade, Resistência ao Avanço e Potência.	110
Tabela 44. Características do motor Watt&Sea 1.4kW.....	112
Tabela 45. Parâmetros de entrada no dimensionamento do propulsor.....	113
Tabela 46. Características do propulsor dimensionado.	114
Tabela 47. Dados do módulo fotovoltaico.....	117
Tabela 48. Parâmetros utilizados no cálculo da força normal que age no leme.....	122
Tabela 49. Forças normais ao leme, vante e ré.....	122
Tabela 50. Relações entre forças e momentos hidrodinâmicos e os coeficientes de amortecimento e massa adicional.	123
Tabela 51. Coeficientes hidrodinâmicos dimensionalizados da embarcação.....	123
Tabela 52. Parâmetros dimensionais do leme.	124
Tabela 53. Derivadas hidrodinâmicas adimensionais da embarcação mais leme.	124

Tabela 54. Coeficientes da equação característica do sistema, descrita pela Equação (30), sem e com a influência do leme,.....	125
Tabela 55. Forças de Excitação e respectivas fases em Heave, Roll e Pitch, nas diferentes direções.....	143

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

A_e/A_o	Relação de Áreas do Propulsor
A_{WL}	Área do plano de flutuação
D	Diâmetro do propulsor
GM_T e GM_L	Alturas metacêntricas transversal e longitudinal
J	Coefficiente de Avanço Propulsivo
K_t e K_q	Coefficientes de empuxo e torque
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> – Rastreamento do Ponto de Máxima Potência
n	Rotação nominal do propulsor [rps]
N	Newtons
NORMAM	Normas da Autoridade Marítima
P/D	Relação Passo/Diâmetro do propulsor
RAO	<i>Response Amplitude Operator</i> – Operador de Amplitude de Resposta
V_A	Velocidade de avanço do propulsor
W	Watts
Z	Número de pás da hélice do propulsor
η_o	Eficiência propulsiva
η_{rr}	Eficiência rotativa relativa
η_m	Eficiência do motor
η_h	Eficiência do casco

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Revisão Bibliográfica	17
1.2. Justificativa e Relevância.....	19
2. OBJETIVOS.....	20
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
3.1. Metodologia Síntese-Análise-Avaliação	21
3.2. Resistência ao Avanço	23
3.3. Sistema Propulsivo	25
3.4. Equilíbrio e Estabilidade da embarcação.....	26
3.4. Sistema Fotovoltaico.....	28
3.5. Seakeeping	33
3.5.1. Frequências Naturais, Forças Excitantes e Ângulos de Fase	34
3.5.2. Espectro Padrão de Ondas Irregulares.....	36
3.5.3. Análise dos Fenômenos de Seakeeping.....	37
3.6. Manobrabilidade	38
3.6.1. Análise da Estabilidade Direcional.....	38
3.6.2. Influência do Leme nos Coeficientes Hidrodinâmicos.....	40
4. METODOLOGIA	43
4.1. Regras e Recomendações do Edital	43
4.2. Metodologia de Projeto.....	45
4.3. Estabilidade Intacta e em Avarias.....	54
4.4. Sistema de Geração de Energia	56
4.5. Sistema Propulsivo	58
4.6. Dimensionamento estrutural	60
4.6.1. Determinação da espessura mínima do laminado e anteparas.....	62
4.6.2. Módulos de seção dos reforços.....	63
5. RESULTADOS	65
5.1. Forma	65
5.2. Compartimentação	68
5.3. Equilíbrio e Estabilidade Intacta.....	70
5.4. Estabilidade em Avarias	72
5.5. Seakeeping	74

5.5.1.	Forças excitantes e Fases nas Frequências Naturais.....	83
5.5.2.	Espectro de Onda Padrão.....	83
5.5.3.	Fenômenos de Seakeeping.....	84
5.6.	Peso Leve.....	87
5.6.1.	Peso Leve Estrutural.....	87
5.6.2.	Peso leve dos Equipamentos	88
5.6.3.	Curva de Pesos	88
5.7.	Resistência Estrutural	92
5.8.	Dimensionamento da estrutura de união transversal	95
5.9.	Dimensionamento Estrutural	99
5.9.1.	Espessura do laminado do casco	100
5.9.2.	Espessura das anteparas.....	100
5.9.3.	Módulo de seção dos reforços	101
5.10.	Resistência ao Avanço	110
5.11.	Sistema Propulsivo.....	112
5.12.	Sistema de Geração de Energia.....	115
5.12.1.	Seleção do banco de baterias	115
5.12.2.	Seleção dos módulos fotovoltaicos.....	116
5.12.3.	Seleção do inversor e controlador de carga	118
5.13.	Sistema de Governo	120
5.14.	Estabilidade Direcional	123
5.15.	Equipamentos de Navegação e Auxiliares	125
6.	CONCLUSÕES.....	129
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	131

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho se insere na área de Engenharia Naval, mais especificamente nos campos de Construção Naval, Energias Renováveis e Projeto de Sistemas Flutuantes. Devido à grande dependência atual de combustíveis fósseis, e por serem considerados fontes não-renováveis, surge a necessidade de utilizar soluções alternativas, ou seja, fontes renováveis, dentre elas a energia solar. Reis (2016) faz a seguinte consideração sobre a energia solar:

A energia solar é uma fonte limpa e inesgotável que pode substituir o petróleo e representa um processo de troca na matriz energética, no avesso da poluição provocada pela queima dos combustíveis fósseis, reduzindo o processo de aquecimento global causado pelo efeito estufa agravado pelos gases resultantes do processo de combustão. (REIS, 2016, p.16).

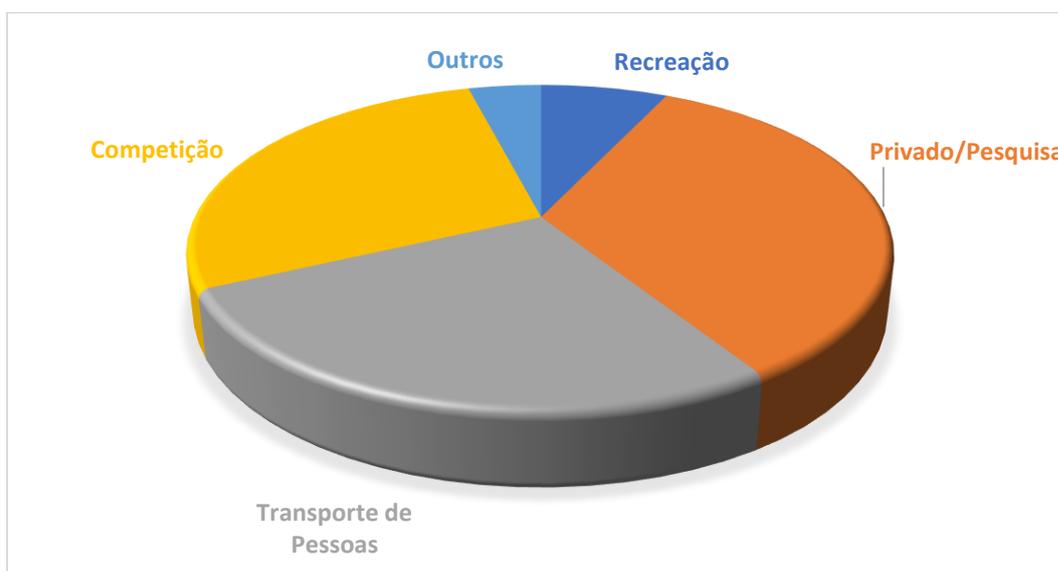
De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), pelo menos 70% da energia elétrica é gerada utilizando combustíveis fósseis, dos quais o carvão é o mais utilizado (GORTER, 2014). Em 2010, a IEA divulgou um resultado alarmante: a necessidade de gerar energia elétrica aumentou 67% de 1990 a 2007 (GORTER, 2014). Por isso, a pesquisa sobre energia renovável aplicada a embarcações é muito importante por ser um meio de transporte amplamente utilizado, tanto na locomoção de passageiros como também na movimentação eficaz de produtos (KURNIAWAN, 2016).

A energia solar fotovoltaica é a tecnologia mais difundida para a geração de energia solar, sendo considerada uma tecnologia energética promissora. O funcionamento das células solares consiste em converter diretamente em eletricidade a energia solar por meio de dispositivos semicondutores (mais comumente o silício), não tendo partes móveis e não produzindo resíduos. Por não liberar calor residual, a biosfera permanece em equilíbrio (BRAGA, 2008).

No âmbito marítimo, a utilização desse tipo de tecnologia vem sendo cada vez mais comum. De acordo com Gorter (2014), embarcações são um meio muito mais viável para a aplicação de células fotovoltaicas em comparação com carros por exemplo, pois em baixas velocidades uma embarcação pequena demanda menos energia. Entretanto, em maior escala, a viabilidade cai bastante, mesmo que a velocidades menores (GORTER apud WACHTER, 2014).

Gorter (2014) classifica as embarcações solares em quatro categorias: recreação (7%), que são alugadas por uma pessoa ou um pequeno grupo; privado/pesquisa (34%), que não possui uma finalidade definida; transporte humano (27%), utilizados comercialmente para transportar pessoas; e por fim, as embarcações de competição (28%), criados com o intuito principal de participar de competições, como por exemplo o Dong Energy Sollar Challenge (Holanda), Solar Splash (Estados Unidos), Frisian Solar Challenge (Holanda) e o Desafio Solar Mônaco. A Figura 1 representa graficamente a classificação feita por Gorter.

Figura 1. Categorização de embarcações solares.



Fonte: Adaptado de (GORTER, 2014).

Em 2008, após a participação de uma equipe brasileira no desafio Frisian Solar Challenge, que parte da cidade de Leeuwarden, na Holanda, foi criado no Rio de Janeiro o Desafio Solar Brasil (DSB), um rali de barcos movidos a energia solar, cujos objetivos principais são desenvolver a tecnologia para fontes alternativas de energia limpa e também promover o intercâmbio de ideias e experiências entre alunos universitários e pesquisadores. Os objetivos deste trabalho estão relacionados com esta competição, determinando as características essenciais para a navegabilidade da embarcação e seus sistemas, avaliando se atendem aos critérios do DSB e da autoridade marítima.

Este trabalho se estrutura da seguinte maneira: inicialmente, são listados os objetivos principais, seguidos da fundamentação teórica de tópicos como a resistência ao avanço e sistemas fotovoltaico e propulsivo; a metodologia para o dimensionamento da

embarcação e seus sistemas é, portanto, apresentada tendo os resultados apresentados em sequência. Por fim, são relatadas as conclusões obtidas, juntamente às referências e anexos.

1.1. Revisão Bibliográfica

A presente revisão bibliográfica vem trazer o estado da arte sobre o seguinte tema: parâmetros de projeto de uma embarcação movida a energia solar. Nos próximos parágrafos, são abordados 6 artigos de recente publicação em periódicos, apontando as principais vantagens e limitações de cada um deles, e como esses pontos se relacionam com a elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC).

Atualmente, boa parte dos veículos de transporte utilizam como principal fonte de energia os combustíveis fósseis, recursos estes não renováveis e agressivos ao meio ambiente (KURNIAWAN, 2016). Aliando este fator à necessidade de abordar novas tecnologias no cenário da engenharia naval, estudos voltados para a expansão do turismo de zero impacto como os de Spagnolo et al. (2012) e Chanashetty e Patil (2015), tiveram como desafio equilibrar o conflito entre proteger ecossistemas e a herança cultural e oferecer serviços públicos para visitantes com a infraestrutura adequada.

Já Tamunodukobipi *et al.* (2018) desenvolve um projeto para uma embarcação leve movida a energia solar, considerando conceitos como forma do casco, resistência e ambiente de operação. Adicionalmente, este desenvolve um algoritmo detalhado a respeito do dimensionamento de diferentes componentes do sistema de geração de energia, como o banco de baterias e os módulos fotovoltaicos.

O desenvolvimento deste algoritmo parte de dados previamente estabelecidos, sendo alguns deles a potência do motor e a irradiação solar local. A abordagem feita por Tamunodukobipi *et al.* (2018) aponta potenciais dificuldades no projeto de embarcações solares, como por exemplo a limitação de espaço para a instalação dos painéis ou até mesmo das baterias, sendo necessária uma modificação nas dimensões principais dos cascos.

No âmbito mais voltado ao desenvolvimento sustentável, Chanashetty e Patil (2015) trazem como resultados a otimização da vida útil das baterias, com o incremento do sistema de gerenciamento em tempo real da capacidade de estoque, além dos impactos positivos na preservação do ecossistema assim como redução da emissão de gases poluentes, como CO₂, NO_x, etc. Entretanto, alguns pontos desfavoráveis como menor

potência que um motor diesel comum, e custo de instalação cerca de 30% maior, mostram que o sistema fotovoltaico em geral precisa ser avaliado minuciosamente antes de ser aplicado (CHANASHETTY; PATIL, 2015).

Com o intenso crescimento das pesquisas de energia renovável aplicadas ao âmbito marítimo, Kurniawan (2016) reuniu novas metodologias e técnicas sobre embarcações solares em seu trabalho, mostrando desde a evolução dos principais componentes do sistema fotovoltaico até a redução de custos operacionais e gerenciamento de dados de consumo elétrico.

Em outro caso, Panprayun e Pitaksintorn (2018) desenvolveram um projeto mais aprofundado, com aplicação direta em uma rota turística na Tailândia, que incluía não só o projeto da embarcação, mas também a sua construção e a criação de um layout fotovoltaico específico para a utilização, realizando testes de performance em mar aberto, com o intuito de observar a autonomia das baterias e a velocidade máxima de navegação.

Como pontos de destaque, temos que o projeto de Panprayun e Pitaksintorn (2018) leva em consideração variáveis que não envolvem apenas termos energéticos, mas as expectativas dos turistas e trabalhadores, o custo de equipamentos e materiais e a irradiação solar para prover a energia necessária. Os principais resultados encontrados foram uma resposta adequada quanto à manobrabilidade, permitindo a movimentação de passageiros sem maiores problemas, bem como a baixa influência do vento e das ondas na navegação. Uma limitação que pode ser tema de pesquisa é, como citado pelo próprio artigo, a utilização de um propulsor mais adequado a um catamarã, em termos de tamanho e eficiência (PANPRAYUN; PITAKSINTORN, 2018).

Sunaryo e Ramadhani (2018) trazem uma abordagem com mais aspectos estruturais e de estabilidade, avaliando o tipo de casco mais adequado para uma embarcação elétrica-solar recreativa com o intuito de navegar nas águas da Indonésia. Na sua estrutura, o artigo primeiramente apresenta um contexto do problema, tanto geográfico quanto econômico; em seguida, são feitas considerações sobre o tipo e as dimensões ótimas do casco; e por fim, algumas análises de estabilidade são avaliadas (SUNARYO; RAMADHANI, 2018).

O trabalho de Sunaryo e Ramadhani (2018) é conveniente para o melhor entendimento dos parâmetros que influenciam na escolha de um ou outro tipo de casco. Porém, algumas limitações são bem notáveis neste estudo, como por exemplo, a omissão

de como foi definido o número de pessoas a bordo e a avaliação incorreta da estabilidade de acordo com a IMO, tendo em vista que outros parâmetros devem ser analisados, como altura metacêntrica inicial e área sobre a curva GZ.

Portanto, mostrou-se que a embarcação solar aparece como uma alternativa às que utilizam combustível fóssil por vários motivos, sejam eles econômicos (e.g. custo de combustível), ambientais (e.g. redução da emissão de gases poluentes) ou de projeto (e.g. mais espaço disponível pela ausência de motores a diesel). Na maioria dos trabalhos nesta revisão bibliográfica, observou-se que há espaço para muitas melhorias (e.g. dimensionamento de um propulsor adequado a um catamarã, análises de estabilidade mais criteriosas, comportamento da embarcação para diferentes condições de mar).

1.2. Justificativa e Relevância

O presente trabalho utiliza como ponto de partida os pontos relevantes encontrados na revisão bibliográfica, colocando em prática no projeto preliminar de uma embarcação solar. Sendo assim, contribui para a evolução do conhecimento nesta área de pesquisa. A embarcação do presente projeto participará da competição Desafio Solar Brasil (DSB), e por isso, os aspectos de forma, resistência ao avanço, velocidade, sistema propulsivo e eficiência do sistema fotovoltaico serão os tópicos mais destacados neste trabalho.

O projeto de uma embarcação solar de alto desempenho exige conhecimentos de engenharia naval, em especial conceitos de arquitetura naval, instalação de máquinas e hidrodinâmica da embarcação. O desenvolvimento de um projeto como este é uma importante adição para a literatura, pois atualmente são poucos os exemplos de projetos para uma embarcação movida a energia solar. Este tipo de projeto requer do engenheiro naval nos seguintes aspectos: conhecimento teórico, conhecimento de ferramentas computacionais, propostas inovadoras quanto à disposição dos equipamentos e sistemas de geração de energia (placas fotovoltaicas).

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é realizar o projeto preliminar de uma embarcação solar de alto desempenho com o intuito de competir no Desafio Solar Brasil. Para atingir esse objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- Determinar as características geométricas, hidrostáticas e físicas da embarcação, seguindo o fluxograma de projeto, mediante a aplicação das matrizes advindas do método QFD;
- Dimensionar os sistemas auxiliares da embarcação, como sistema propulsivo, sistema de geração de energia, refrigeração e governo, de acordo com o fluxograma de projeto;
- Avaliar o comportamento no mar da embarcação para diversas direções, frequências e alturas significativas de onda;
- Analisar os critérios da competição e da autoridade marítima (NORMAM 03/DPC (2005)) e verificar se foram devidamente cumpridos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste presente capítulo, temos uma breve introdução à metodologia aplicada ao projeto, conhecida como síntese-análise-avaliação, utilizada como uma forma de estabelecer objetivos de projeto e avaliar se foram atingidos adequadamente (LAMB, 2003). Aqui, também são mostrados os fenômenos de resistência ao avanço bem como o equilíbrio e estabilidade de embarcações, e como eles são analisados no caso de um catamarã. Outro ponto apresentado é o sistema fotovoltaico e seus diversos componentes. Por fim, são apresentadas as equações que caracterizam os fenômenos de seakeeping e manobrabilidade, tendo em vista obter resultados que descrevem o comportamento em água da embarcação.

3.1. Metodologia Síntese-Análise-Avaliação

De acordo com Lamb (2003), o desenvolvimento de um projeto pode ser dividido em fases, que são caracterizadas pela natureza do trabalho realizado, o nível de detalhamento necessário, o número de pessoas envolvidas, dentre outros aspectos. O número de fases varia de acordo com a fonte, mas o mais comum é considerar as seguintes fases: projeto conceitual, projeto preliminar, projeto contratual e projeto de detalhamento (LAMB, 2003). Por se tratar de um projeto preliminar de uma embarcação solar, serão tratadas neste trabalho apenas as duas primeiras fases, que são detalhadas a seguir.

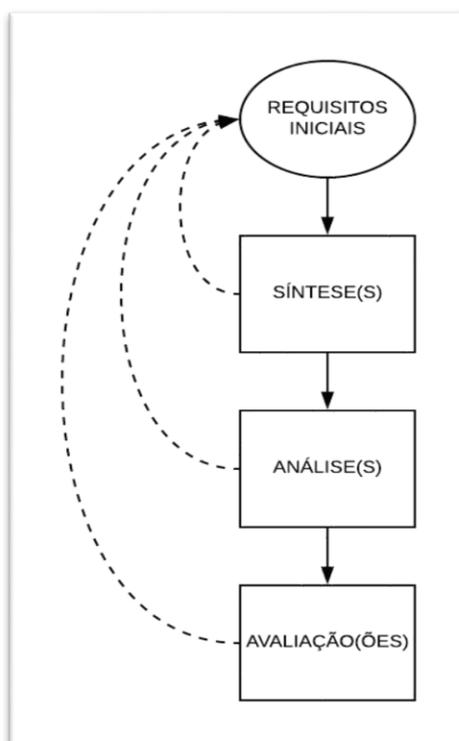
O principal objetivo do projeto conceitual é determinar os principais requisitos da embarcação, ou seja, a missão da embarcação e os principais atributos de performance, que refletem no equilíbrio custo x benefício. Por esse motivo, essa fase também é conhecida como Estudo de Custo e Viabilidade. Já no projeto preliminar, são definidas as características de performance discutidos anteriormente, bem como os principais sistemas da embarcação de forma quantitativa (LAMB, 2003). Em resumo, é nessa fase que são validados todos os requisitos técnicos desejados para o funcionamento da embarcação.

Para que essa validação seja feita de uma forma criteriosa e sequencial, é preciso ser adotada uma metodologia de projeto aplicada à construção naval. Dentre as metodologias disponíveis na literatura, optou-se por utilizar o Trinômio Síntese-Análise-Avaliação (Figura 2), que consiste em um processo iterativo que é repetido diversas vezes, no intuito de aumentar gradualmente o nível de detalhamento de cada sistema da embarcação (LAMB, 2003). É importante lembrar que esse tipo de metodologia permite

que muitos elementos do projeto sejam trabalhados em paralelo, dando maior fluidez ao processo e conseqüentemente, à integração final dos sistemas. Os principais passos da metodologia de Síntese, Análise e Avaliação são:

- *Requisitos iniciais*: refletem a necessidade operacional de cada sistema e os principais objetivos, restrições e condições que tal sistema deve contribuir para o funcionamento adequado da embarcação;
- *Síntese*: utilizando diversas abordagens técnicas, são criados conceitos e ideias que melhor representam as necessidades dos sistemas encontradas na etapa anterior e que funcionam como elementos funcionais de cada um;
- *Análise*: uma vez definido como cada sistema será sintetizado, a eficiência geral, custos e riscos são analisados por meio de conceitos teóricos e análises práticas, quantitativa ou qualitativamente. De acordo com o avanço do projeto, o número de atributos analisados e o nível de detalhamento tendem a aumentar;
- *Avaliação*: os resultados gerados pelas análises devem ser avaliados levando em conta os requisitos iniciais, sendo necessário verificar se foram atendidos de maneira satisfatória. Caso contrário, é preciso retornar à etapa de síntese para uma criação de proposta alternativa ou até mesmo uma reformulação completa (MELO, 2018).

Figura 2. Trinômio Síntese-Análise-Avaliação.



Fonte: Autor.

3.2. Resistência ao Avanço

No dimensionamento do sistema propulsivo, é preciso entender como uma embarcação se comporta ao mover-se na água e quais são as forças atuantes no corpo submerso. Por isso, o estudo da resistência ao avanço e suas componentes se faz essencial para compreender, por exemplo, como acontece a absorção de energia pelas ondas formadas pelo avanço do casco e pela região em regime turbulento que se forma a ré da embarcação, chamada de esteira (MOLLAND, 2011).

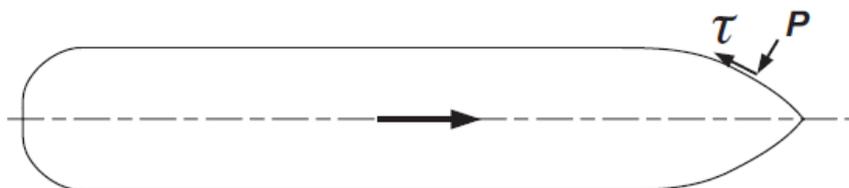
De acordo com Molland (2011), é possível separar fisicamente a resistência total de uma embarcação em três componentes:

1) *Resistência friccional + pressão*: representam as forças tangenciais τ e o diferencial de pressão P que agem sob cada elemento de superfície, e podem ser somados para resultar a resistência friccional total (Figura 3);

2) *Resistência viscosa*: inclui uma parcela da resistência friccional e resistência pela pressão, já que a perda de energia ao longo do casco por conta de forças viscosas tem como consequência uma diminuição de pressão na popa da embarcação. Esta componente pode ser calculada medindo justamente a energia na região de esteira;

3) *Resistência por formação de onda*: o padrão de ondas criado pelo casco pode ser analisado e medido de acordo com as suas componentes e a energia requerida por cada uma delas totaliza esta fração da resistência total.

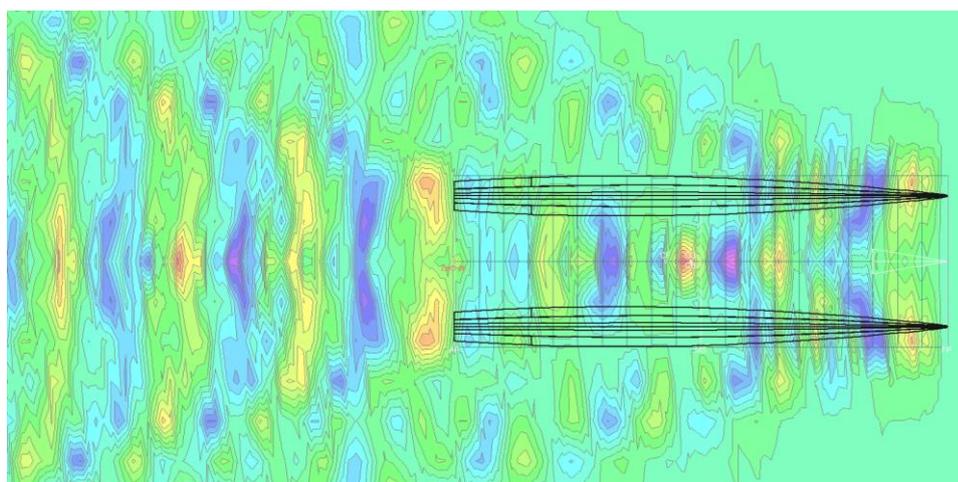
Figura 3. Força tangencial e pressão atuantes na superfície da embarcação.



Fonte: (MOLLAND, 2011).

No caso de catamarãs, a resistência ao avanço torna-se um problema um pouco mais complexo, pois além da resistência dos cascos isolados ser considerada, é preciso também levar em conta os efeitos de interferência entre os cascos (Figura 4). Dois tipos de interferência existentes em catamarãs podem ser identificados: a interferência viscosa, causada pelo fluxo assimétrico em torno dos cascos e seu efeito no fluxo viscoso como a formação de camada-limite e o desenvolvimento de vórtices; e a resistência originária da interferência entre os sistemas de ondas de ambos os cascos (INSEL; MOLLAND, 1992).

Figura 4. Padrão de Ondas formado por um catamarã, representado em linhas isométricas.



Fonte: Autor.

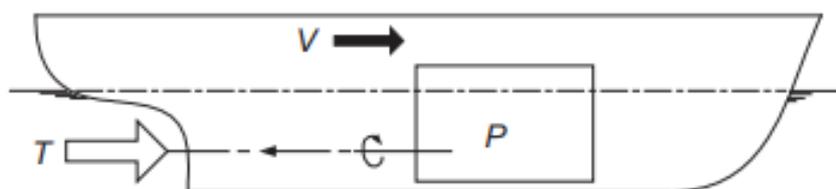
Quanto à interferência viscosa, Insel e Molland (1992) afirmam que um fator de interferência na resistência viscosa β (dependente do campo de pressão ao redor do casco e do aumento de velocidade entre os cascos) utilizado no cálculo da resistência total é

independente da velocidade e aumenta de acordo com a razão L/B , mas sofre pouca influência com a variação da separação entre os cascos (S/L). Já a interferência entre o sistema de ondas é pequena para valores grandes de S/L , sendo benéfica para números de Froude entre 0.35 e 0.42. A interferência de ondas pode ser efetivamente negligenciada para altas velocidades, o que em alguns casos permite uma escolha de separação entre cascos baseada em outros requisitos, como por exemplo a performance de seakeeping da embarcação (INSEL; MOLLAND, 1992).

3.3. Sistema Propulsivo

O conceito geral de um sistema propulsivo pode ser entendido como a conversão de energia em empuxo real (T), de forma que se iguale à resistência de avanço da embarcação (R) à uma velocidade requerida (V). Para isso, é fundamental estabelecer a potência do motor P que será aplicada em todo o sistema (MOLLAND, 2011). A Figura 5 esquematiza esta conversão.

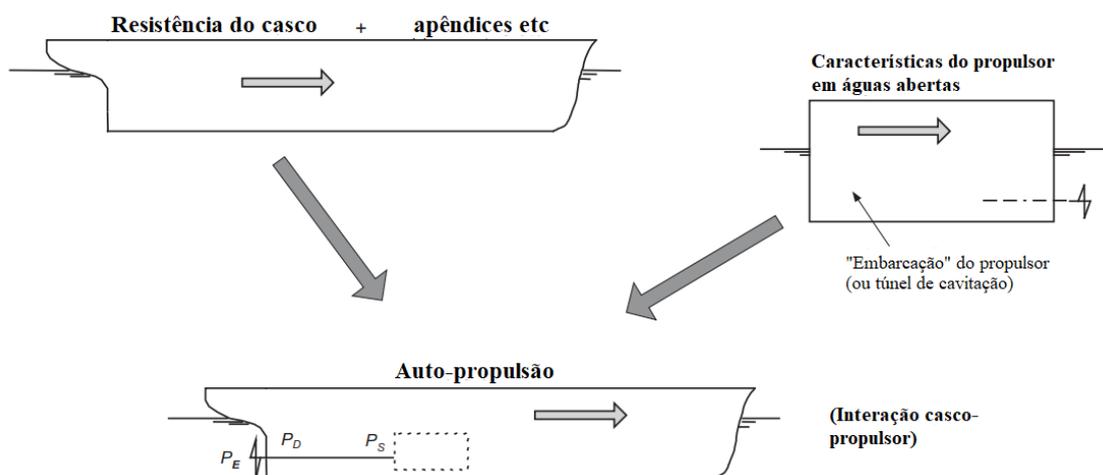
Figura 5. Conversão de potência em empuxo.



Fonte: (MOLLAND, 2011).

A obtenção dos valores estimados da potência necessária só pode ser feita sob o entendimento das características de desempenho do sistema propulsivo com relação à embarcação, ou seja, como eles interagem entre si para alcançar uma determinada eficiência total do sistema (Figura 6).

Figura 6. Considerações gerais dos componentes principais do sistema propulsivo.



Fonte: Adaptado de (MOLLAND, 2011).

3.4. Equilíbrio e Estabilidade da embarcação

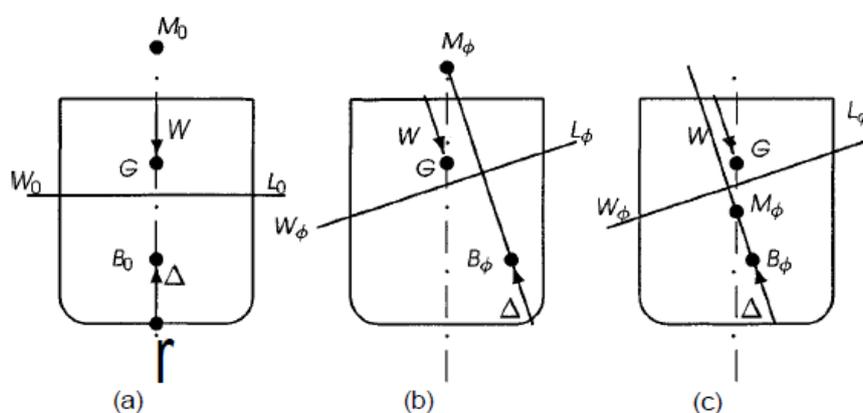
Um corpo rígido é dito em equilíbrio estático quando a força e o momento resultantes que atuam sobre ele é zero. Quando sujeito a uma pequena perturbação da posição de equilíbrio, o corpo rígido pode reagir de três formas diferentes: se o corpo tende a voltar ao estado inicial, diz-se que ele possui estabilidade positiva ou está em equilíbrio estável; caso o corpo permaneça na nova posição após a perturbação, conclui-se que ele possui estabilidade neutra ou está em equilíbrio neutro; por último, quando o corpo rígido continua a se afastar da sua posição original, então é dito que ele tem estabilidade negativa ou está em equilíbrio instável (RAWSON; TUPPER, 2001).

Considerando uma seção transversal como apresentada na Figura 7. Na figura (a), é mostrada uma seção na condição vertical, sem escora. A linha d'água é W_0L_0 . A força peso W atua no centro de gravidade G ; já a força de empuxo Δ atua no centro de carena B_0 . Como as forças são colineares e iguais, dizemos que a embarcação está em uma condição de equilíbrio (BIRAN; LÓPEZ-PULIDO, 2003).

Agora, na figura (b), o navio é inclinado para bombordo com um ângulo ϕ . Se os pesos são mantidos, o centro de gravidade permanece no mesmo ponto G . Por conta do volume submerso a bombordo, e um volume igual que sai da água a boreste, o centro de carena se move para uma nova posição a bombordo, B_ϕ . As forças W e Δ são verticais e perpendiculares a linha d'água W_0L_0 . Estas duas forças criam um momento que tende a empurrar a embarcação em direção a boreste, ou seja, sua posição inicial. Com isso, podemos afirmar que a embarcação é estável (BIRAN; LÓPEZ-PULIDO, 2003).

Já na figura (c) temos também um navio inclinado para bombordo com um mesmo ângulo ϕ . Porém, neste caso, o momento criado pelas duas forças W e Δ aumentam ainda mais o ângulo de escora em direção a bombordo. Por esse fato, é dito que a embarcação é instável. Nos últimos dois casos, a diferença entre eles pode ser descrita através do conceito de metacentro, que é o ponto de interseção entre a nova linha de ação da força de empuxo (condição de escora) e a linha de ação dessa força na situação inicial. Em (b), o metacentro está acima do centro de gravidade G , e em (c), o metacentro está localizado abaixo do centro de gravidade G (BIRAN; LÓPEZ-PULIDO, 2003).

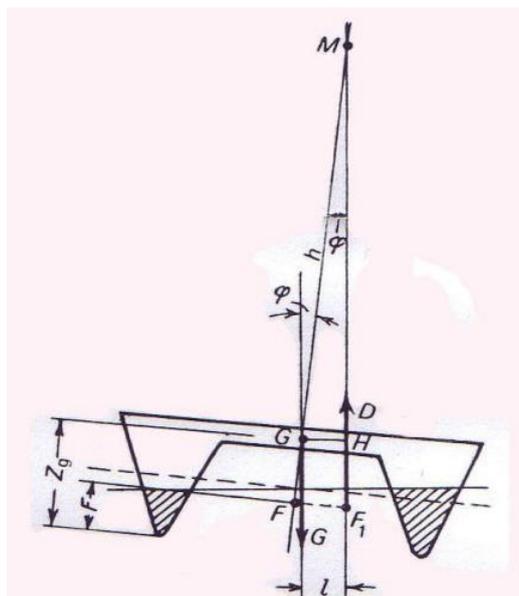
Figura 7. Condições de Estabilidade.



Fonte: (BIRAN; LÓPEZ-PULIDO, 2003).

Já no caso de um catamarã convencional, a estabilidade é caracterizada pela variação de pesos atuantes no centro de gravidade G e no centro de flutuação F , no plano transversal, como representada na Figura 8. De acordo com a mudança da posição do centro de flutuação F (podendo atingir valores máximos de até $\frac{1}{4}$ da boca da embarcação), fica claro que o momento exercido é limitado pela configuração do multicasco. Devido a essa configuração, o catamarã pode apresentar pequenos ângulos de escora mesmo com maiores mudanças transversais do ponto F (KOS et al., 2010).

Figura 8. Estabilidade inicial de um catamarã.



Fonte: (KOS et al., 2010).

O momento de inércia total de um catamarã é dado pela soma da inércia dos dois cascos, adicionada ao produto entre a área do plano de linha d'água e o quadrado da distância entre o centro desse plano até o eixo de simetria da embarcação. Em outras palavras, o fator determinante da inércia é a separação entre os cascos. A variação da separação pode permitir por exemplo a redução total da resistência ao avanço (devido à interação entre os sistemas de ondas geradas pelos cascos e à velocidade do escoamento entre eles) bem como a redução de ângulos de escora ou acelerações transversais (KOS et al., 2010).

Geralmente, a influência da separação entre os cascos na resistência é bem complexa e depende da velocidade do catamarã, parâmetros de forma e razões das dimensões principais. Por exemplo, para pequenos valores de L/B , tanto a forma quanto a separação entre os cascos influenciam igualmente na resistência por geração de ondas; por outro lado, maiores valores de L/B implicam uma maior contribuição da separação (KOS et al, 2010).

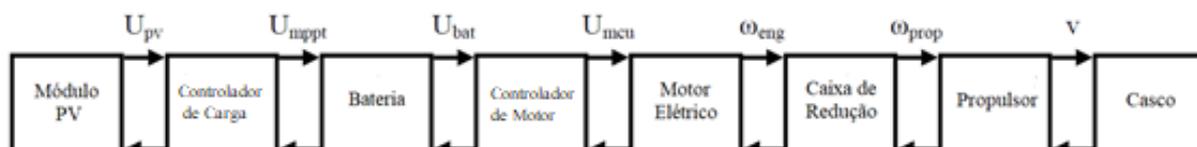
3.4. Sistema Fotovoltaico

O sistema fotovoltaico de uma embarcação solar pode ser dividido em componentes mecânicos e elétricos. O domínio elétrico é composto pelo arranjo fotovoltaico, bateria e a unidade controladora do motor (MCU). Já o domínio mecânico

consiste no motor elétrico, caixa de redução e propulsor, com o motor sendo o elo de ligação entre os dois domínios (GORTER, 2015).

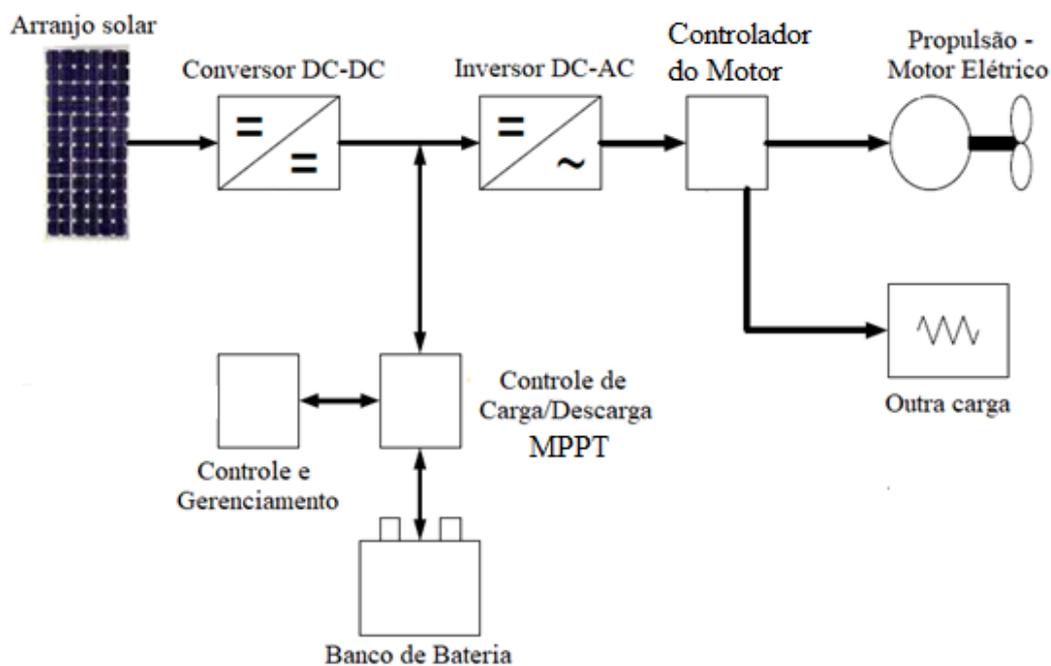
O módulo fotovoltaico fornece uma voltagem U_{pv} que é transformada pelo MPPT em U_{mppt} para carregar a bateria. A bateria então provê uma voltagem U_{bat} ao quadro de controle que é transformada em U_{mccu} para ser aplicada ao motor elétrico. Com isso, o motor desenvolve uma velocidade angular ω_{eng} , proporcional à voltagem recebida. Conseqüentemente, o propulsor, conectado diretamente ao motor ou por meio da caixa de redução, começa a rotacionar em uma velocidade angular ω_{prop} e assim, proporciona à embarcação determinada velocidade (GORTER, 2015). A Figura 9 ilustra como esses componentes interagem entre si e a Figura 10 representa um exemplo de como tais componentes estariam dispostos na embarcação.

Figura 9. Esquemática dos componentes do sistema fotovoltaico de uma embarcação solar.



Fonte: Adaptado de GORTER (2015).

Figura 10. Exemplo de arranjo de sistema fotovoltaico.



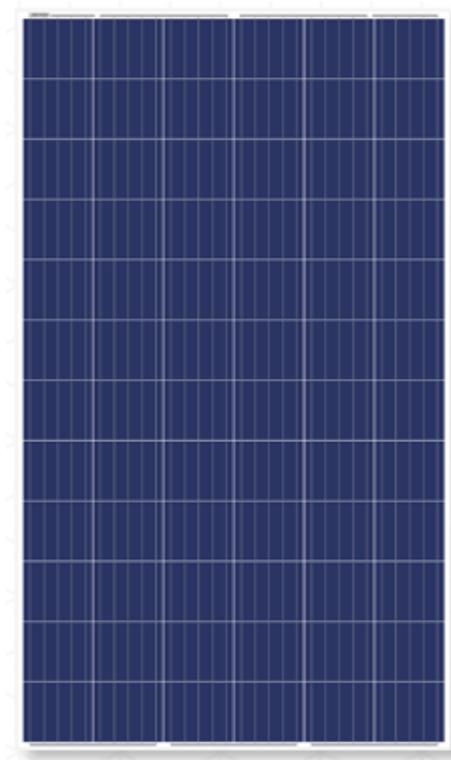
Fonte: Adaptado de (KURNIAWAN, 2016).

A seguir, é mostrado como alguns desses componentes influenciam no funcionamento do sistema fotovoltaico, como são implementados no projeto da embarcação solar e quais são as vantagens e desvantagens da sua aplicação. Os principais componentes são: arranjo fotovoltaico, conversor DC-DC (como condicionador de potência), o MPPT, bateria e seu sistema de controle, inversor e motor elétrico (KURNIAWAN, 2016).

A. Módulo fotovoltaico

Um módulo fotovoltaico (Figura 11) é composto por células fotovoltaicas, elementos responsáveis por converter diretamente em eletricidade a luz solar, por meio do efeito fotoelétrico. Como mencionado na Introdução, as células são fabricadas a partir de dispositivos semicondutores, como por exemplo silício. As células fotovoltaicas são sempre agrupadas em módulos por conta da baixa tensão e corrente de saída das células, tornando-se indispensável para obter correntes de saída e tensões apropriadas para o uso. A quantidade de células e o tipo de arranjo dependerá dos parâmetros de utilização desejados (BRAGA, 2008).

Figura 11. Módulo fotovoltaico.



Fonte: (ZYRONGEO, 2020).

A utilização da energia solar em veículos é benéfica principalmente por ser uma energia limpa. Porém, a maior perda é a eficiência e é justamente nesse ponto que faltam pesquisas mais desenvolvidas como o foco na aplicação marítima, segundo Kurniawan (2016). Para obter dados mais precisos, seria necessário considerar, dentre outros fatores, temperatura, irradiação solar e umidade (KURNIAWAN, 2016).

B. Conversor DC-DC como Condicionador de Potência

Como dito no tópico anterior, a eficiência é o maior problema em um sistema fotovoltaico. O conversor DC-DC surge como possibilidade de melhoria nesse contexto, pois pode atuar tanto regulando a voltagem de saída do arranjo assim como ajudando a gerar uma máxima potência, caso haja um MPPT aplicado (KURNIAWAN, 2016).

Segundo Kurniawan (2016), existem basicamente 3 tipos de conversor DC-DC. O primeiro é o conversor do tipo *boost*, em que a voltagem de saída é maior que a de entrada e é aplicado em sistemas que operam em uma voltagem relativamente alta. O segundo é o conversor *buck*, que funciona de maneira contrária ao *boost*, ou seja, a voltagem de entrada é maior que a de saída, operando em sistemas de voltagem baixa. O terceiro é

uma combinação dos dois anteriores, chamado *buck-boost*, que possibilita a voltagem de saída ser maior ou menor que a de entrada (KURNIAWAN, 2016).

Algumas pesquisas mais específicas vêm sendo feitas sobre esse tipo de conversor, mas não para aplicação marítima. Isso se deve basicamente ao fato de a performance do conversor não ser afetada pelas condições climáticas no mar (KURNIAWAN, 2016).

C. Desenvolvimento do MPPT em uma Embarcação Solar

Ao contrário do conversor, a potência fornecida pelo módulo fotovoltaico varia com o clima, especialmente com diferentes níveis de irradiação solar. Por isso, rastrear os pontos de máxima potência é essencial, e isso é feito regulando a voltagem de saída para o conversor. Dentre os principais modelos propostos de MPPT, os que mais se destacam com o pretexto de aplicabilidade num veículo como uma embarcação são os de lógica difusa, apresentado por FREIRE (2009) e o de rede neural. Esses métodos são bons porque são de rápida resposta, conseguindo acompanhar as mudanças de irradiação (KURNIAWAN, 2016).

D. Gerenciamento do Sistema de Baterias em uma Embarcação Solar

Numa embarcação solar, a utilização das baterias corretas é estritamente importante, por conta da intermitência da energia solar, que pode colocar em risco a operação desses veículos. Xing et al. (2011) propôs um sistema de gerenciamento modular para embarcações híbridas, enquanto Leiner (2007) projetou um conjunto hardware-software, onde o software controla o comportamento do hardware, que consiste em um circuito de segurança, sensor, coletor de dados e controladores de carga e temperatura (KURNIAWAN, 2016).

E. Propulsão Elétrica

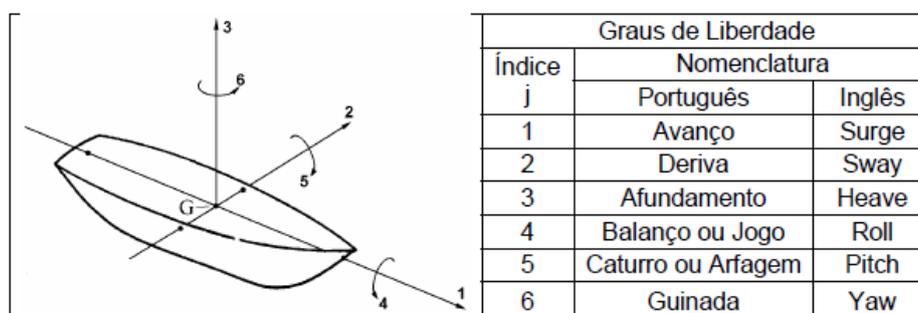
A propulsão nas embarcações solares é feita por motores elétricos. Eles são divididos em motores AC e DC. Os motores DC são preferíveis pela facilidade de controlar a velocidade; porém, com o avanço da tecnologia, os motores AC também são igualmente recomendados, além de serem menores e mais leves (KURNIAWAN, 2016).

3.5. Seakeeping

O estudo dos movimentos que uma embarcação executa quando sofre a ação de ondas, ou seja, o seu “comportamento no mar”, é conhecido como *seakeeping*. Alguns dos motivos que incitam a necessidade desse tipo de estudo são, para a aplicação em questão, a segurança da tripulação e da embarcação contra riscos de emborcamento e vibrações excessivas (SIMOS, 2007). Aqui, este estudo será feito levando em consideração que o catamarã navega em águas abertas e profundas, já que a competição ocorre em mar aberto, com ondas completamente irregulares e como temos a relação profundidade/altura de onda maior que 0.5, então as águas são consideradas profundas (MOLLAND, 2011).

Os sistemas flutuantes como navios e plataformas tem seu movimento livre definido em seis graus de liberdade, três deles sendo lineares (surge, Sway e heave) e três angulares (roll, pitch e yaw), como ilustrado na Figura 12. A análise desses movimentos e como eles interagem entre si é bastante complexa e, por necessidade de simplificação e por serem movimentos restaurativos, serão analisados apenas os movimentos de heave, roll e pitch. Essa análise é feita utilizando o software *Ansys Aqwa*.

Figura 12. Graus de liberdade de sistemas flutuantes.



Fonte: (SIMOS, 2007).

Os dados extraídos como saída do Aqwa das análises hidrodinâmicas são:

- Coeficiente de Massa Adicional (A_{ij}): o fluido ao redor do casco é perturbado com o movimento da embarcação, aumentando os efeitos totais de massa e inércia do sistema.
- Coeficiente de Amortecimento (B_{ij}): são dois mecanismos principais – um associado a viscosidade e o outro a geração de ondas.
- Força Excitante (Froude-Krylov + Difração);

- RAO;
- Defasagem ou ângulos de fase (ϵ_{ij}).

Para corpos livres que flutuam, os termos restaurativos dos movimentos estão presentes apenas em heave, roll e pitch, que são os movimentos analisados (JOURNÉE, MASSIE; 2001). Esses coeficientes dependem de propriedades geométricas e hidrostáticas e são dadas da seguinte forma:

$$\text{heave} : c_{zz} = \rho g A_{WL} \quad (1)$$

$$\text{roll} : c_{\phi\phi} = \rho g \nabla \overline{GM} \quad (2)$$

$$\text{pitch} : c_{\theta\theta} = \rho g \nabla \overline{GM}_L \quad (3)$$

Onde: $C_{zz} = C_{33} =$ *Coeficiente de restauração em Heave.*

$C_{\phi\phi} = C_{44} =$ *Coeficiente de restauração em Roll.*

$C_{\theta\theta} = C_{55} =$ *Coeficiente de restauração em Pitch.*

3.5.1. Frequências Naturais, Forças Excitantes e Ângulos de Fase

Para encontrarmos uma maneira de calcular analiticamente as frequências naturais da embarcação, precisamos partir das equações dos respectivos momentos de heave, roll e pitch. As equações de movimento são representadas abaixo:

$$(m + A_{33}) z'' + B_{33} z' + C_{33} z = 0 \quad (4)$$

$$(I_{xx} + A_{44}) \phi'' + B_{44} \phi' + C_{44} \phi = 0 \quad (5)$$

$$(I_{yy} + A_{55}) * \theta'' + B_{55} * \theta' + C_{55} \theta = 0 \quad (6)$$

Manipulando algebricamente as equações, dividindo-as pelo termo de massa, para a equação de heave, ou inércia para os movimentos de roll e pitch (mais o termo de massa adicional), podemos obter as equações para as frequências naturais para cada movimento.

$$\omega_{n33} = \sqrt{\frac{c_{33}}{m + A_{n33}}} \quad (7)$$

$$\omega_{n44} = \sqrt{\frac{c_{44}}{I_{xx} + A_{n44}}} \quad (8)$$

$$\omega_{n55} = \sqrt{\frac{c_{55}}{I_{yy} + A_{n55}}} \quad (9)$$

Com o auxílio do Aqwa, obtemos os dados de massa adicional relativo a cada faixa de frequência. Plotando no Excel as frequências de resposta da embarcação, encontramos a interseção entre as duas frequências, que representa a frequência natural para cada movimento. Interpolando os valores de frequência, podemos obter os coeficientes de massa adicional e amortecimento para a frequência natural.

A obtenção das forças de excitação e suas defasagens segue o mesmo procedimento da seção anterior, porém as equações de movimento agora apresentam um termo de força harmônica. As frequências naturais serão utilizadas para encontrar as forças, já que quando excitado com a força, o sistema tende a entrar em ressonância. O Aqwa fornece tanto os valores das forças quanto seus ângulos de fase correspondentes.

As novas equações de movimento são dadas por:

$$(m + A_{33}) * z'' + b_{n33} * z' + c_{33} * z = F_{a33} * \text{sen}(w * t + \varepsilon_{33}) \quad (10)$$

$$(I_{xx} + A_{44}) * \phi'' + b_{n44} * \phi' + c_{44} * \phi = F_{a44} * \text{sen}(w * t + \varepsilon_{44}) \quad (11)$$

$$(I_{yy} + A_{55}) * \theta'' + b_{n55} * \theta' + c_{55} * \theta = F_{a55} * \text{sen}(w * t + \varepsilon_{55}) \quad (12)$$

Onde F_{aij} é a força de excitação para cada movimento e ε_{ij} é o ângulo de fase de cada movimento.

A interpolação numérica é novamente utilizada aqui, desta vez para encontrar os valores da força e defasagem para cada frequência natural. Estes valores formam a

equação do movimento, que agora pode ser resolvida utilizando o software Matlab, avaliando a solução num intervalo de tempo determinado.

3.5.2. Espectro Padrão de Ondas Irregulares

Os espectros padrão de ondas são utilizados na tentativa de descrever o espectro de frequência de uma onda irregular por meio de uma relação matemática. Dois espectros são bem difundidos: o de Bretschneider e o JONSWAP. A principal diferença entre os dois é que aquele é mais adequado para navegação em mar aberto e este para pistas de mar limitadas. Na costa brasileira, o espectro que mais se adequa à representação das ondas são os espectros de Pierson-Moskowitz e Jonswap (COSTA apud BRANDÃO, 2008).

O espectro de Pierson-Moskowitz é representado da seguinte forma:

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} \cdot H_{1/3}^2 \cdot \omega_p^4 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left\{-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right\} \quad (13)$$

Onde ω_p é a frequência angular de pico: $\omega_p = \frac{2\pi}{T_p}$.

Por outro lado, o espectro de Pierson-Moskowitz sofreu adaptações que deram origem ao espectro de Jonswap, para estado de mar completamente desenvolvido, com a seguinte formulação:

$$S_J(\omega) = A_\gamma \cdot S_{PM}(\omega) \cdot \gamma^{\exp\left\{-0,5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p}\right)^2\right\}} \quad (14)$$

Sendo $SPM(\omega)$ o espectro de Pierson-Moskowitz e:

- γ = Parâmetro (não dimensional) de pico do espectro;
- A_γ = Fator de normalização ($A_\gamma = 1 - 0.287 \ln(\gamma)$);
- σ = Parâmetro de largura espectral,

$$\sigma = \sigma_a \text{ se } \omega < \omega_p$$

$$\sigma = \sigma_b \text{ se } \omega > \omega_p.$$

Os valores médios para os dados experimentais do espectro de Jonswap são, de acordo com o manual DNVGL-RP-CP205 (DNV, 2017):

$$\gamma = 3.3, \sigma_a = 0.07 \text{ e } \sigma_b = 0.09$$

Sabendo os movimentos do CG e os relativos a ele, podemos calcular o movimento e qualquer ponto na estrutura utilizando superposição. Os ângulos de rotação

são adotados como pequenos, o que simplifica a matriz de rotação (JOURNÉE, MASSIE; 2001), resultando na seguinte:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\psi & \theta \\ \psi & 1 & -\phi \\ -\theta & \phi & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{pmatrix} \quad (15)$$

Utilizando a matriz, as componentes do movimento harmônico absoluto de um certo ponto P (x_b, y_b, z_b) na estrutura é dado pelas seguintes equações:

$$x_P = x - y_b \psi + z_b \theta \quad (16)$$

$$y_P = y + x_b \psi - z_b \phi \quad (17)$$

$$z_P = z - x_b \theta + y_b \phi \quad (18)$$

O movimento vertical z do ponto P é, na verdade, uma contribuição dos movimentos de heave, roll e pitch, por isso é preciso acoplar os três movimentos para uma descrição mais precisa. Com as equações de acoplamento, é plotado o RAO no ponto P com o auxílio do Excel. A próxima etapa é definir o espectro de energia de ondas no ponto P. A definição do espectro de energia de ondas irregulares é dada por:

$$S_\zeta(\omega_n) \cdot d\omega = \frac{1}{2} \zeta_{a_n}^2 \quad (19)$$

No ponto P, o espectro de energia é calculado de maneira similar, em função do espectro de energia calculado anteriormente e do RAO do ponto P elevado ao quadrado. Essa fórmula é então computada e calculada utilizando o Excel.

3.5.3. Análise dos Fenômenos de Seakeeping

Agora, temos a capacidade de calcular algumas probabilidades relacionadas a certos fenômenos comuns a embarcações submetidas a condições diversas de mar. Aqui, avaliaremos os efeitos de água no convés e emersão do propulsor. A situação de água no convés ocorre quando o deslocamento relativo entre o sistema flutuante e a onda de proa é maior que a sua borda livre. Já a emersão é basicamente o contrário: caso o

deslocamento relativo entre o ponto máximo e a linha d'água for maior que a profundidade desse ponto, o propulsor irá sair da água.

Para calcular a probabilidade desses eventos acontecerem, iremos utilizar o critério com a probabilidade mostrada abaixo:

$$P[h_a > H] = e^{-\frac{H^2}{2M_0}} = 0.05 \quad (20)$$

Onde:

H: borda livre da embarcação, no caso de água no convés ou a profundidade do ponto mais alto do propulsor, no caso de emersão do propulsor;

M_0 : área abaixo do espectro de resposta do ponto P (LLOYD, 1998).

3.6. Manobrabilidade

3.6.1. Análise da Estabilidade Direcional

Um corpo é dito estável em qualquer estado específico de equilíbrio em repouso ou em movimento se, quando temporariamente for perturbado por uma força externa ou momento, ele tende a voltar ao estado de equilíbrio inicial ao cessar a atuação da força externa ou momento (LEWIS, 1989).

A dinâmica básica de manobrabilidade e estabilidade direcional pode ser descrita e analisada utilizando a segunda lei de Newton, obtendo as equações de movimento regentes do modelo em questão. Aqui, serão avaliados apenas os movimentos de *sway* (deriva) e *yaw* (guinada), que, no estudo de estabilidade direcional e manobrabilidade, são os movimentos mais significativos. Neste caso, o *roll* é desprezado e as perturbações externas são dadas apenas em função do deslocamento angular do leme. A equação na forma matricial é dada na Equação (21):

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = Q(t) \quad (21)$$

Os coeficientes A, B e C estão relacionados com os coeficientes hidrodinâmicos de manobrabilidade citados na seção 3.6.1, $\dot{q}(t)$ são as velocidades nos graus de liberdade avaliados e $Q(t)$ são as forças e momentos atuando no modelo em discussão, que são nulas na análise da estabilidade direcional. As equações do movimento podem ser encontradas em SIMOS (2007):

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - Y_v v + (m x_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} + (m \bar{U} - Y_r)r = Y(t) = Y_{\delta} \delta \quad (22)$$

$$(m x_G - N_{\dot{v}})\dot{v} - N_v v + (I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} + (m \bar{U} x_G - N_r)r = N(t) = N_{\delta} \delta \quad (23)$$

Escrevendo na forma matricial, temos:

$$A = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{r}} \\ -N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$B = \begin{bmatrix} -Y_v & m \bar{U} - Y_r \\ -N_v & -N_r \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$C = 0 \quad (26)$$

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} v(t) \\ r(t) \end{bmatrix} \quad (27)$$

As velocidades dos graus de liberdade podem ser dadas por meio da solução de equações diferenciais ordinárias homogêneas de segundo grau com coeficientes constantes:

$$v(t) = v_1 e^{\lambda_1 t} + v_2 e^{\lambda_2 t} \quad (28)$$

$$r(t) = r_1 e^{\lambda_1 t} + r_2 e^{\lambda_2 t} \quad (29)$$

Sendo v_1 , v_2 , r_1 e r_2 constantes de integração e $e \approx 2.718...$ Substituindo essas soluções nas equações de movimento, obtemos um sistema de equações no qual será analisado os possíveis resultados de σ , que relaciona o comportamento da embarcação no plano horizontal após uma perturbação. A equação característica para o sistema é:

$$\bar{A}\lambda^2 + \bar{B}\lambda + \bar{C} = 0 \quad (30)$$

$$\lambda_{1,2} = -\frac{\bar{B} \pm \sqrt{\bar{B}^2 - 4\bar{A}\bar{C}}}{2\bar{A}} \quad (31)$$

Em que:

$$\bar{A} = (m - Y_{\dot{v}}) (I_z - N_{\dot{r}}) - N_{\dot{v}} Y_{\dot{r}} \quad (32)$$

$$\bar{B} = -(m - Y_{\dot{v}}) N_{\dot{r}} - (I_z - N_{\dot{r}}) Y_{\dot{v}} + N_{\dot{v}} (mU - Y_{\dot{r}}) - N_{\dot{v}} Y_{\dot{r}} \quad (33)$$

$$\bar{C} = Y_{\dot{v}} N_{\dot{r}} + N_{\dot{v}} (mU - Y_{\dot{r}}) \quad (34)$$

As condições para estabilidade são reduzidas a necessidade de que B/A e C/A sejam necessariamente quantidades positivas, ou seja, o coeficiente C, que também é conhecido como Índice de Estabilidade Direcional (σH), também deve ser maior que zero para garantir tal estabilidade.

$$\sigma H = Y_{\dot{v}} N_{\dot{r}} + N_{\dot{v}} (mU - Y_{\dot{r}}) > 0 \quad (35)$$

Há a possibilidade de a embarcação oscilar antes de voltar a trajetória em linha reta, quando as raízes da equação são um par conjugado de raízes imaginárias, ocorrendo quando C é um valor muito grande. No caso comum, com C sendo um valor pequeno, as raízes serão reais e negativas. Se C for menor que zero, a embarcação continuará sua trajetória curva até que haja a atuação de alguma força externa, como os lemes, e as raízes serão reais (SIMOS, 2007).

3.6.2. Influência do Leme nos Coeficientes Hidrodinâmicos

É importante ressaltar que tanto os equipamentos do sistema de governo, como os lemes também influenciam nos coeficientes hidrodinâmicos de estabilidade. Essas contribuições são dadas a partir do coeficiente de sustentação de cada instrumento. Neste caso, foi utilizado um perfil padrão encontrado em (MOLLAND, TURNOCK; 2007): o perfil com forma transversal IfS 58 TR 15.

Os coeficientes hidrodinâmicos do leme podem ser dados por CELIS (2017):

$$Y'_{\delta} = a' \left(\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right)_0 \quad (36)$$

$$N'_\delta = -a' \left(\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right)_0 \quad (37)$$

$$Y'_{v,R} = - \left(\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right)_0 \quad (38)$$

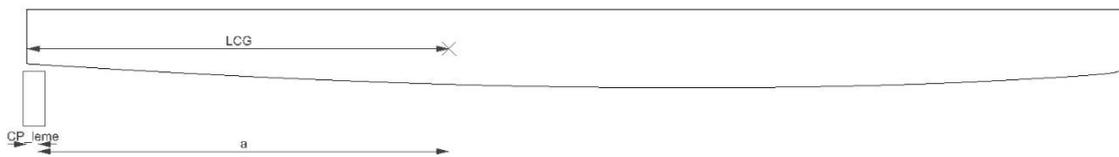
$$Y'_{r,R} = a' \left(\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right)_0 \quad (39)$$

$$N'_{v,R} = a' \left(\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right)_0 \quad (40)$$

$$N'_{r,R} = -a'^2 \left(\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right)_0 \quad (41)$$

Nas equações acima, a' é a adimensionalização de a (distância longitudinal entre o centro de gravidade da embarcação e o centro de pressões do leme) pelo comprimento da embarcação (L). O centro de pressão do leme foi considerado como localizado a uma distância de aproximadamente 1/3 da corda em relação ao bordo de ataque (LEWIS, 1989), como na mostrado na Figura 13.

Figura 13. Parâmetros de posição do leme.



Com os coeficientes do leme calculados, eles precisam ser adicionados aos coeficientes do casco nu, para que sejam obtidos os coeficientes finais:

$$Y'_v = Y'_{v0} + Y'_{v,R} \quad (42)$$

$$Y'_r = Y'_{r0} + Y'_{r,R} \quad (43)$$

$$N'_v = N'_{v0} + N'_{v,R} \quad (44)$$

$$N'_r = N'_{r0} + N'_{r,R} \quad (45)$$

Os parâmetros hidrodinâmicos do leme são extraídos a partir da Tabela 1.

Tabela 1. Características das seções transversais de diferentes tipos de lemes tridimensionais.

Section Shape	t/c	Fig. No.	Re × 10 ⁶	Ahead/Astern	$\frac{dC_L}{d\alpha}$	C _L 10°	C _L 20°	C _L max	α _{stall}	C _{D0}	C _D 10°	C _D 20°	CPc 10°	CPc stall
Flat plate	0.015	36	0.71	Either	0.030	0.349	0.749	1.18	40	0.018	0.072	0.271	0.26	0.40
Flat plate	0.030	37	0.71	Either	0.031	0.342	0.722	1.14	40	0.033	0.092	0.289	0.28	0.41
Flat plate	0.050	38	0.67	Either	0.033	0.345	0.697	1.13	40	0.054	0.117	0.315	0.31	0.43
NACA0015	0.15	20	0.79	Ahead	0.028	0.289	0.622	1.05	34	0.020	0.042	0.135	0.18	0.35
NACA0015	0.15	21	0.56	Astern	0.048	0.385	0.643	1.06	40	0.050	0.102	0.258		
NACA0025	0.25	22	0.78	Ahead	0.026	0.270	0.586	1.34	46	0.031	0.052	0.145	0.20	0.35
NACA0025	0.25	23	0.56	Astern	0.053	0.412	0.672	0.91	37	0.095	0.142	0.289		
IFS 58 TR 15	0.15	24	0.78	Ahead	0.032	0.322	0.670	1.18	34	0.029	0.053	0.166	0.25	0.34
IFS 58 TR 15	0.15	25	0.56	Astern	0.026	0.272	0.648	1.11	40	0.052	0.092	0.286		
IFS 58 TR 25	0.25	26	0.78	Ahead	0.030	0.313	0.660	1.45	48	0.043	0.076	0.191	0.29	0.37
IFS 58 TR 25	0.25	27	0.56	Astern	0.030	0.293	0.674	0.98	40	0.085	0.139	0.356		
NACA0015	0.15	T4	0.77	Ahead	0.033	0.327	0.670	1.26	36	0.058	0.091	0.210	0.27	0.35
+ 5% wedge NACA0015	0.15	T7	0.77	Ahead	0.033	0.327	0.653	1.25	35	0.088	0.142	0.257	0.28	0.36
+ 10% wedge NACA0015	0.15	T8	0.76	Ahead	0.031	0.319	0.661	1.20	35	0.108	0.159	0.294	0.29	0.36
+ 15% wedge IFS 55 BR 15	0.15	32	0.71	Either	0.037	0.335	0.601	0.721	30	0.028	0.059	0.182	0.30	0.36
IFS 54 BR 15	0.15	33	0.78	Either	0.030	0.341	0.630	0.990	38	0.060	0.121	0.284	0.34	0.42
IFS 57 BR 15	0.15	35	0.72	Either	0.030	0.293	0.572	1.038	40	0.028	0.068	0.217	0.24	0.41

Fonte: (MOLLAND, TURNOCK; 2007).

4. METODOLOGIA

No capítulo a seguir, estão listadas as principais regras e recomendações que nortearam as decisões do presente projeto, tanto com relação à forma e estabilidade da embarcação bem como equipamentos obrigatórios. Em seguida, são apresentados os elementos de síntese, análise e avaliação obtidos de acordo com a metodologia de projeto, resultando por fim na construção das matrizes de influência e qualidade e do fluxograma de projeto. Os critérios utilizados para avaliação da estabilidade intacta e em avarias são apresentados logo em seguida. A metodologia de dimensionamento do sistema de geração de energia, com o número de placas solares necessárias, e do propulsor ótimo dão prosseguimento ao capítulo. Por fim, são mostradas as formulações da ABS para o dimensionamento estrutural, como espessuras de laminado e módulos de seção mínimos de componentes internos.

4.1. Regras e Recomendações do Edital

O presente projeto foi executado levando em conta as regras e recomendações presentes no documento *Regras de Competição 2018*, do Desafio Solar Brasil. A seguir, são listadas as regras relevantes para o desenvolvimento do projeto.

A. Categoria

O catamarã desenvolvido encaixa-se na Classe A, Catamarã Padrão DSB. Essa classe de embarcação é construída de acordo com as especificações fornecidas e homologadas pela organização do DSB, atendendo às regras do DSB e tendo massa mínima de 220 kg (embarcação sem piloto e sem lastro).

B. Características Principais

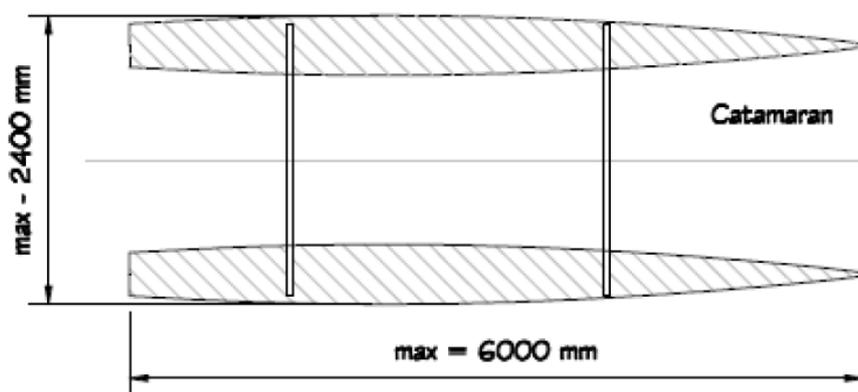
As dimensões principais que a competição estabelece estão demonstradas na Tabela 2.

Tabela 2. Características principais definidas pelo DSB.

Característica	Valor
Comprimento Total	6 m
Boca máxima	2.4 m
Altura máxima acima da linha d'água	1.3 m
Largura mínima das cabines	46 cm

O comprimento total é medido do extremo de proa ao extremo de popa, incluindo motor, leme ou qualquer anexo. Não há restrição quanto ao calado e massa máximos. Uma representação de um catamarã Classe A e suas dimensões principais está na Figura 14.

Figura 14. Dimensões Principais da embarcação.



Fonte: (DSB, 2018).

C. Embarcação

Todas as embarcações devem ser projetadas com uma borda livre mínima de 25 cm nos primeiros 2 m, medidos a partir da proa da embarcação, e uma borda livre de pelo menos 20 cm no resto da embarcação. As bordas livres são determinadas com a embarcação totalmente carregada.

Todas as embarcações devem obrigatoriamente estar equipadas com uma ou mais bombas elétricas e automáticas, com uma capacidade de bombeamento mínima de 1500 litros por hora. No caso de um catamarã, cada casco deve ter uma bomba com capacidade mínima de 750 litros por hora.

Todas as embarcações devem ser projetadas de maneira a garantir flutuação suficiente quando totalmente carregadas. Por flutuação “suficiente” entenda-se a capacidade necessária para carregar a estrutura completa do barco e a tripulação, mais uma capacidade reserva de 20%.

A velocidade média das embarcações será de pelo menos 3 nós, característica que será averiguada durante a primeira prova da competição. Nesta etapa, uma distância de até 6 milhas náuticas pode ser exigida.

Todo barco deverá ter uma bandeira amarela de 33 cm x 47 cm, presa a um mastro rígido, a uma altura mínima de 100 cm da linha d'água.

D. Sistemas Elétricos

A capacidade máxima de potência instalada dos painéis solares a bordo não deve ultrapassar 1040 Wp. Quanto à tensão máxima permitida do sistema, o valor máximo é de 60 V CC ou CA RMS.

Adicionalmente, as embarcações devem estar equipadas com um banco de baterias de capacidade nominal máxima permitida de 1.5 kWh. As baterias, tanto a principal quanto a auxiliar, devem ser instaladas em compartimentos separados, de modo a eliminar o risco de contato direto entre a tripulação e as baterias. A distância mínima entre a tripulação e a bateria principal é de 1 (um) metro.

É obrigatório o uso de um Sistema de Monitoramento da bateria adequadamente funcionando para todas as baterias, com exceção das de Chumbo-ácido e Chumbo-gel. O sistema deve monitorar tanto a tensão quanto à temperatura da bateria e ser capaz de desligar o sistema quando necessário. Para baterias de Lítio-polímero, o monitoramento das correntes de carga e descarga é requerido. O Sistema de Monitoramento da Bateria deve ser projetado para monitorar (equalizar) todas as células individuais da bateria.

Os compartimentos devem ter um sistema de ventilação forçada com uma capacidade mínima de 0.3 m³/min.

4.2. Metodologia de Projeto

Na Seção 3.1, foi discutida a aplicação da metodologia de Síntese-Análise-Avaliação e como esses elementos interagem entre si, auxiliando na estruturação e tomada

de decisões de um projeto. Nesta seção, são definidos inicialmente os elementos de síntese relevantes ao presente projeto, com descrições sucintas de cada um deles (Tabela 3).

Tabela 3. Descrição dos elementos de síntese.

Síntese	Descrição
Forma	Modelo geométrico do casco da embarcação
Sistema Propulsivo	Conjunto de equipamentos (motor, eixo e propulsor) responsável pela propulsão da embarcação
Sistema de Geração de Energia	Conjunto de equipamentos responsável pelo fornecimento de toda a energia elétrica da embarcação
Topologia Estrutural	Elementos estruturais que oferecem resistência estrutural à embarcação
Sistema de Refrigeração	Equipamentos que dissipam o calor gerado nos componentes elétricos
Sistema de Governo	Conjunto de equipamentos responsável pela direção e manobrabilidade da embarcação
Compartimentação	Divisão do espaço interno em compartimentos com determinada função
Arranjo Geral	Representação gráfica do posicionamento de todos os equipamentos que compõem a embarcação

Com os elementos de síntese devidamente estabelecidos, são levantados os principais pontos que precisam ser aprofundados e quais ferramentas são aplicados nesse processo. A Tabela 4 mostra os tais pontos e eventuais softwares, documentos e métodos de cálculo utilizados no desenvolvimento das análises.

Tabela 4. Descrição dos elementos de análise e as ferramentas utilizadas.

Análise	Descrição	Ferramenta
Resistência ao Avanço	Análise numérica da resistência pelo método de <i>slender body</i>	Maxsurf Resistance
Equilíbrio	Cálculo da posição de equilíbrio, de acordo com as propriedades hidrostáticas	Maxsurf Stability
Estabilidade Intacta	Cálculo das curvas de estabilidade para as condições de carregamento	Maxsurf Stability
Comportamento em Ondas	Análise de seakeeping (cálculo de acelerações, deslocamentos, velocidades e frequências naturais)	ANSYS Aqwa
Eficiência do Sistema Propulsivo	Cálculo da eficiência do propulsor, por meio dos coeficientes de empuxo (K_t) e torque (K_q)	Análise Numérica / Excel
Balanco Elétrico	Cálculo da demanda elétrica de todos os componentes	Análise Numérica
Autonomia	Avaliação da capacidade das baterias, em termos de tempo de navegação	Análise Numérica
Análise de Peso do Casco	Cálculo do peso de todos os elementos que compõem a embarcação	Análise Numérica
Resistência Estrutural	Cálculo dos esforços cortantes e momentos fletores que atuam na embarcação	Análise Numérica
Segurança	Análise das temperaturas dos componentes elétricos	Análise Numérica
Controle de Velocidade	Verificação da velocidade aplicada no controle e da velocidade de saída no propulsor	Análise Numérica
Manobrabilidade	Cálculo das derivadas direcionais e parâmetros de manobrabilidade e determinação do grau de estabilidade direcional da embarcação	Análise Numérica / Excel/ANSYS

Análise	Descrição	Ferramenta
Estabilidade em Avarias	Cálculo das curvas de estabilidade para as condições de carregamento	Maxsurf Stability
Ergonomia e Habitabilidade	Avaliação dos espaços disponíveis para a tripulação, em termos de eficácia	AutoCAD
Peso Leve e CG	Cálculo do peso leve e centro de gravidade da embarcação	Análise Numérica / Maxsurf Stability
Sistema de Salvatagem	Equipamentos e dispositivos necessários para a segurança do tripulante e da embarcação	Verificação do Edital da Competição

As matrizes mostradas abaixo são advindas do chamado *Quality Function Deployment (QFD)*, que resumidamente é um método de projetar a qualidade de um serviço ou produto (MELO apud HANSEL, 2018). Essa técnica é fundamental na visualização de quais componentes são de alta prioridade para o andamento do projeto, bem como as possíveis dependências entre sínteses e/ou análises. Os graus de influência (Tabela 5) são os responsáveis por medir o nível de relação entre os elementos de síntese.

Tabela 5. Graus de Influência na Matriz de Influência.

Grau de Influência	
0	Não há influência
1	Baixa Influência
2	Média Influência
3	Grande Influência

A primeira matriz (Tabela 6) é a matriz de influência, cujo objetivo é mostrar a relação entre os elementos de síntese por meio dos graus de influência e por conseguinte, constatar quais os elementos são mais influenciados ou mais influentes no projeto.

Em seguida, são definidas as expectativas para cada elemento de análise, comumente chamadas de elementos de avaliação (Tabela 8). Essa etapa dá à metodologia de síntese-análise-avaliação o caráter iterativo, pois caso a expectativa não seja atendida, faz-se necessário o retorno às fases iniciais para um redirecionamento ou até mesmo criação de uma nova solução. É importante ressaltar que os elementos de avaliação e a matriz de qualidade foram elaborados tomando como referência as regras e recomendações tanto do DSB quanto da classificadora, quando necessárias.

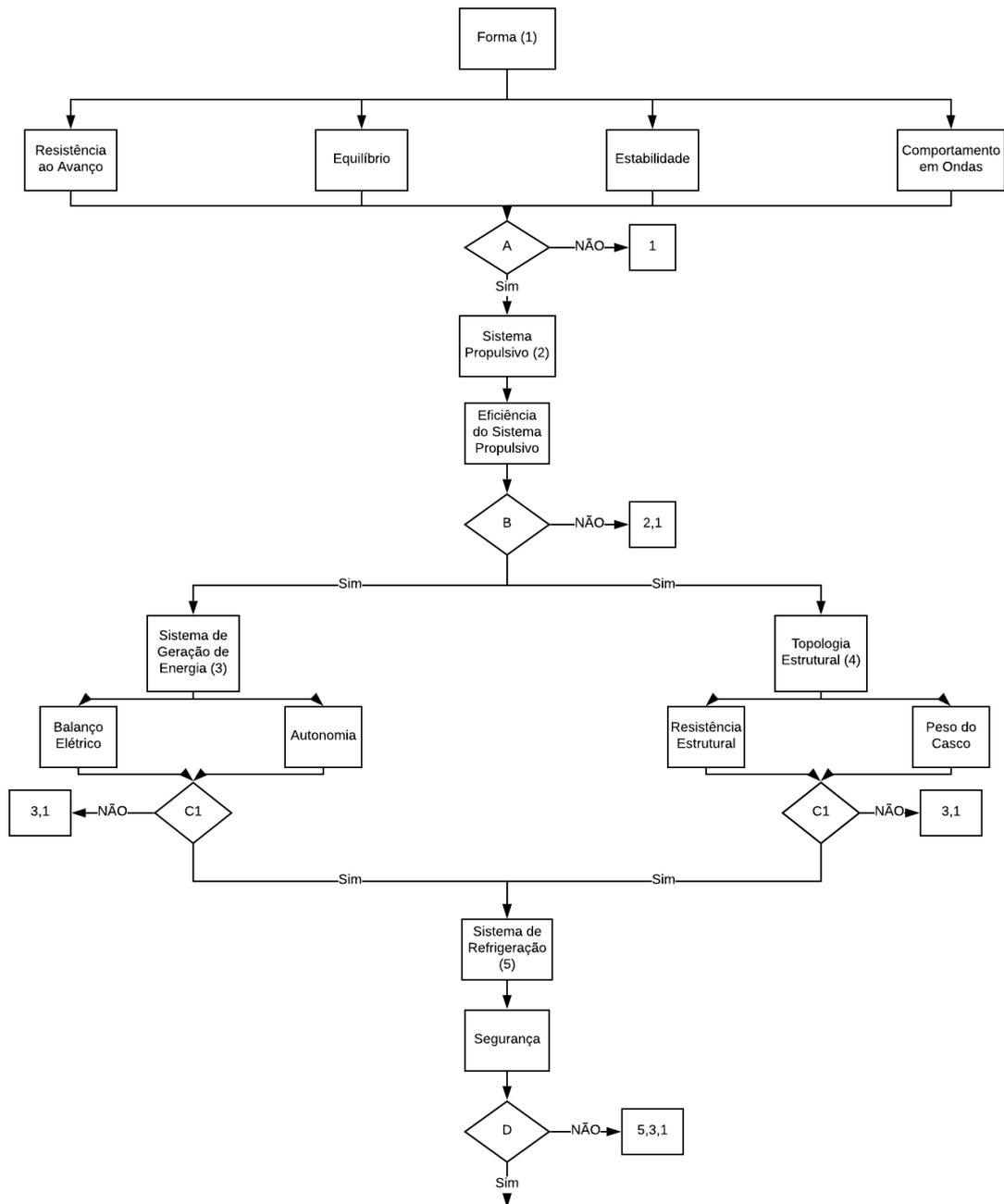
Tabela 8. Interação entre os elementos de síntese, análise e avaliação.

Síntese	Análise	Avaliação
Forma (1)	Resistência ao Avanço	A resistência ao avanço é mínima?
	Equilíbrio	Atende aos critérios da competição?
	Estabilidade Intacta	Atende aos critérios da competição e normas classificadoras?
	Comportamento em Ondas	Atende aos critérios da competição?
Avaliações atendidas? SIM (2), NÃO (1).		
Sistema Propulsivo (2)	Eficiência do Sistema Propulsivo	A eficiência é máxima para os casos avaliados?
Avaliações atendidas? SIM (3, 4); NÃO (2, 1).		
Sistema de Geração de Energia (3)	Balanco Elétrico	O arranjo fotovoltaico fornece energia suficiente?
	Autonomia	A embarcação consegue navegar por um intervalo de tempo mínimo?
Avaliações atendidas? SIM (5); NÃO (3, 1).		
Topologia Estrutural (4)	Peso do Casco	Atende aos critérios da competição (massa mínima de 220 kg)?
	Resistência Estrutural	A estrutura resiste às cargas solicitadas?

Síntese	Análise	Avaliação
Avaliações atendidas? SIM (5); NÃO (4, 1).		
Sistema de Refrigeração (5)	Segurança	O projeto garante a dissipação de todo o calor gerado pelo sistema propulsivo?
Avaliações atendidas? SIM (6, 7); NÃO (5, 3, 1).		
Sistema de Governo (6)	Controle de Velocidade	A velocidade fornecida é a máxima possível?
	Manobrabilidade	A embarcação apresenta estabilidade direcional?
Avaliações atendidas? SIM (8); NÃO (6, 1).		
Compartimentação (7)	Ergonomia e Habitabilidade	Atende às recomendações e requisitos da competição?
	Estabilidade em Avarias	Atende aos critérios da competição?
Avaliações atendidas? SIM (8); NÃO (7, 1).		
Arranjo Geral (8)	Peso Leve e CG	Atende aos critérios da competição?
	Sistema de Salvatagem	Atende às recomendações da competição?
Avaliações atendidas? SIM (Fim); NÃO (8, 7, 1).		

Finalmente, é montado o fluxograma de projeto onde são apresentadas as etapas do projeto de maneira sequencial e, quando uma avaliação não for satisfeita, quais processos devem ser reconsiderados. É importante ressaltar que, para cada avaliação, os critérios, valores e requisitos estarão destacados dentro de cada seção específica.

Figura 15. Fluxograma de Projeto.



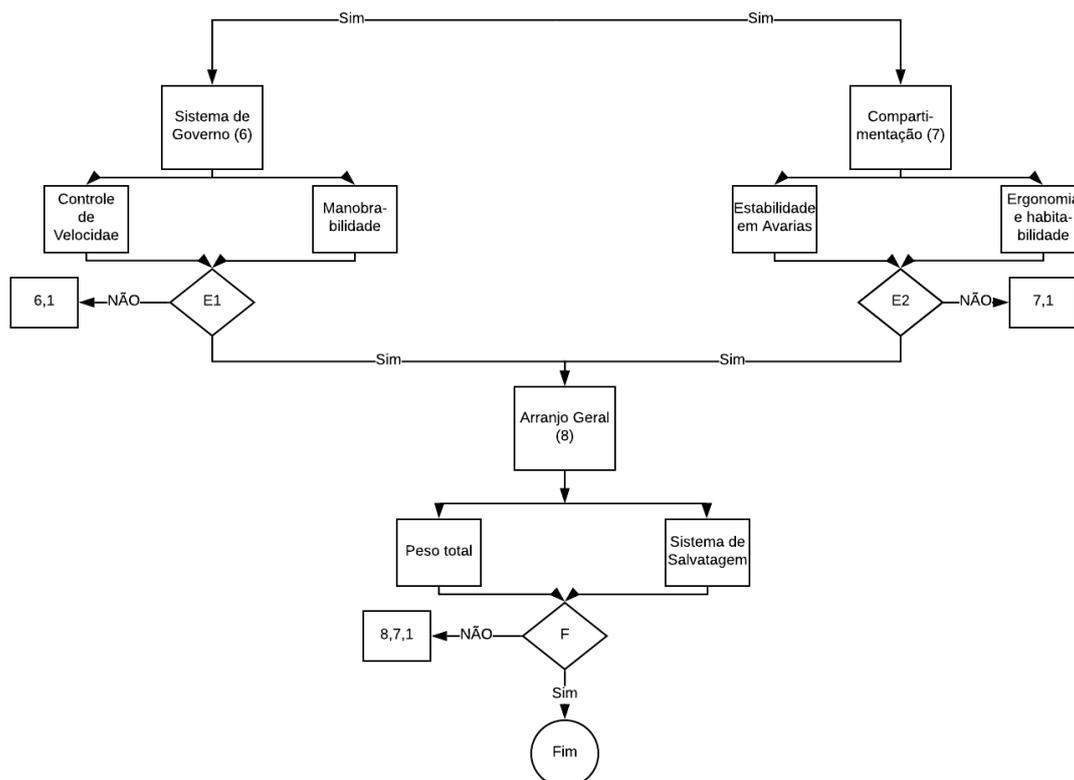


Tabela 9. Avaliações presentes no fluxograma.

Avaliações	
A	Possui resistência ao avanço mínima? Atende aos critérios da competição de equilíbrio, estabilidade e comportamento em ondas?
B	A eficiência propulsiva é máxima para os casos avaliados?
C1	O arranjo fotovoltaico fornece energia suficiente? A embarcação consegue navegar por um intervalo de tempo mínimo (a ser definido)?
C2	A estrutura resiste às cargas solicitadas? O peso atende aos requisitos da competição?
D	O projeto garante a dissipação de todo o calor gerado pelo sistema propulsivo?
E1	A velocidade fornecida é a máxima possível? A embarcação apresenta estabilidade direcional?
E2	Atende às recomendações e requisitos da competição?
F	Atende aos critérios da competição?

4.3. Estabilidade Intacta e em Avarias

➤ Estabilidade Intacta

A NORMAM estabelece alguns critérios de estabilidade, concedendo segurança à embarcação e aos tripulantes que nela navegam. Como a embarcação do projeto encaixa-se na descrição da NORMAM-03 como uma embarcação de esporte, o único critério de estabilidade definido na norma é a lotação da embarcação, definido por anexos na NORMAM-01; entretanto, não existe critérios claros para o cálculo da estabilidade de embarcações menores que 24 m.

Por esse motivo, foram aplicados os critérios definidos nas resoluções IMO A.749 – *Code for Intact Stability* e MSC.36 do *International Code of Safety for High Speed Craft* (Código Internacional de Segurança para Embarcações de Alta Velocidade), ou *HSC Code*. Para a utilização do *HSC Code*, é preciso verificar se a embarcação encaixa na definição de “high-speed craft” apresentada no código: “high-speed craft” é uma embarcação capaz de atingir uma máxima velocidade, em m/s, igual ou maior que $3.7 \nabla^{0.1667}$, onde ∇ é o volume de deslocamento correspondente a linha d’água de projeto, em m³ (HSC CODE, 2000). Os critérios de estabilidade intacta usados foram os seguintes:

- **IMO A.749, 3.1.2.1** – A área abaixo da curva do braço de endireitamento (curva GZ) não deve ser menor que 0.055 m.rad de $\Theta = 0^\circ$ a 30° nem menor que 0.09 m.rad de $\Theta = 0^\circ$ a 40° ou o ângulo de alagamento Θ_f se esse ângulo for menor que 40° . Adicionalmente, a área abaixo da curva de $\Theta = 30^\circ$ a 40° não deve ser menor que 0.03 m.rad.
- **IMO A.749, 3.1.2.4** – O GM_T inicial não deve ser menor que 0.15m.
- **HSC Code, MSC.36, Anexo 7.1.2** – O valor de GZ máximo deve ocorrer a um ângulo maior que 10° .
- **HSC Code, MSC.36, Anexo 7.1.5** – A área entre a curva GZ e as curvas do braço de escora (HTL) não deve ser menor que 0.028 m.rad.
- **HSC Code, MSC.36, Anexo 7.3.2.1** – O ângulo de equilíbrio não deve ser maior que 10° .
- **Critério de estabilidade intacta do DSB** - Quanto à estabilidade, a embarcação não poderá apresentar banda maior ou igual a 12.5 graus quando solicitada por um momento adernante de 150 Nm com o barco carregado com 50 kg no lugar do piloto.

➤ Estabilidade em Avarias

Para a análise da estabilidade em avarias, inicialmente devem ser calculadas quais as possíveis extensões e quais partes da embarcação seriam afetadas por estas avarias. De acordo com o *HSC Code* (2000), as avarias são classificadas de acordo com os dois locais em que possivelmente podem ocorrer: no costado e no fundo do casco. Para a avaria no costado, temos as seguintes dimensões:

- a extensão longitudinal da avaria deve ser $0.1L$, ou $3\text{m} + 0.03L$ ou 11m , o que for menor;
- a extensão transversal da penetração no casco deve ser de $0.2B$ ou $0.05L$ ou 5m , o que for menor;
- a extensão vertical da avaria deve ser tomada como o comprimento do pontal da embarcação.

Já para as avarias que ocorrerem no fundo do casco, elas devem ser consideradas da seguinte maneira:

- a extensão longitudinal da avaria deve ser $0.1L$, ou $3\text{m} + 0.03L$ ou 11m , o que for menor;
- a extensão transversal da penetração no casco deve ser do tamanho da boca máxima do casco ou 7m , o que for menor;
- a extensão vertical deve ser de $0.02B$ ou 0.5m , o que for menor.

De acordo com o *HSC Code* (2000), os critérios para avaliar se a embarcação apresenta estabilidade em avaria são os seguintes:

1. A área A_2 (Figura 16) deve ser maior que 0.0280 m .
2. O valor de máximo GZ deve ser maior que 0.05 m (não há requisitos para o ângulo em que ocorre o máximo GZ).
3. O intervalo de estabilidade positiva deve ser no mínimo 7° .
4. O ângulo de escora por conta de vento constante quando submetido ao braço escorante HL_3 não deve exceder 15° . O valor do braço HL_3 é dado pela seguinte equação:

$$HL_3 = \frac{120 * V_w^2 * A * Z}{676 * 9800 * \Delta} \quad (46)$$

Onde:

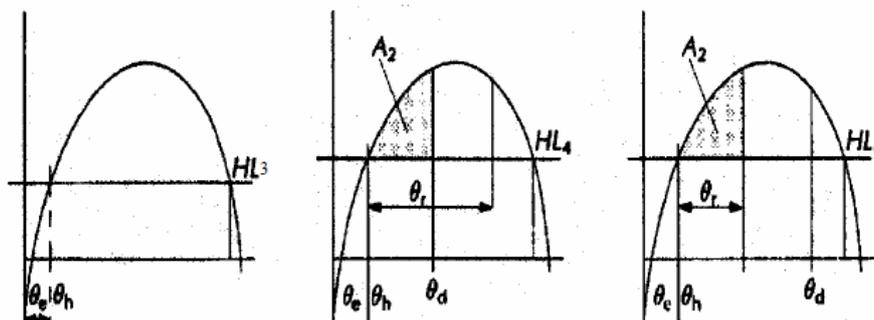
V_w : velocidade do vento nas piores condições (m/s);

A : área lateral projetada da porção da embarcação acima da linha d'água (m²);

Z : distância vertical do centro de A à metade do calado de projeto (m);

Δ : deslocamento (ton).

Figura 16. Curvas GZ utilizadas nos critérios de estabilidade em avaria.



Fonte: (HSC CODE, 2000).

4.4. Sistema de Geração de Energia

A metodologia utilizada para o dimensionamento do sistema de geração por energia solar pode ser encontrada em Tamunodukobipi et al. (2018). Um arranjo fotovoltaico deve ser desenvolvido considerando os componentes individualmente bem como a interação entre cada uma das partes e com o restante dos sistemas da embarcação, já que esse dimensionamento envolve não somente os painéis solares, mas também o banco de baterias e o inversor, necessários para atender a demanda de energia (TAMUNODUKOBIPI et al., 2018).

Para que se possa escolher corretamente o banco de baterias, a medida inicial é obter a demanda média de energia e o tempo de autonomia do armazenamento. Portanto, a capacidade estimada do banco é calculada usando a Equação (47):

$$E_{est} = E_d * D_{aut} \quad (47)$$

Onde E_{est} = armazenamento de energia estimado, E_d = demanda média de energia, D_{aut} = tempo de autonomia.

Depois dessa etapa, o próximo passo é determinar o armazenamento considerando um fator de segurança. Essa capacidade é computada utilizando a profundidade máxima de descarga permitida da bateria, por meio da Equação (48):

$$E_{seg} = \frac{E_{est}}{PDD} \quad (48)$$

Onde E_{seg} = capacidade segura de energia, PDD = Profundidade de descarga.

Em seguida, é preciso determinar a capacidade total do banco de baterias, em ampères-hora, dividindo a capacidade segura de energia pela voltagem CC nominal de uma das baterias utilizada:

$$C_{tb} = \frac{E_{seg}}{V_b} \quad (49)$$

Onde C_{tb} = a capacidade total do banco de bateria em ampères-hora e V_b = voltagem CC da bateria.

Agora, torna-se possível encontrar o número de baterias, N_{tb} , que deve fazer parte do banco, dividindo a capacidade C_{tb} calculada anteriormente pela capacidade de uma bateria (C_b), como demonstrado na Equação (50):

$$N_{tb} = \frac{C_{tb}}{C_b} \quad (50)$$

O número de baterias em série (N_{bs}) também pode ser determinado dividindo a voltagem CC do sistema pela voltagem CC nominal de uma bateria:

$$N_{bs} = \frac{V_{cc}}{V_b} \quad (51)$$

Da mesma forma, podemos determinar o número de baterias em paralelo seguindo o conceito da Equação (51). Já para o arranjo fotovoltaico, a primeira etapa é definir qual a demanda diária média requerida de energia, que é obtida dividindo a demanda média de energia pelo produto das eficiências dos componentes do sistema, como dado na Equação (52):

$$E_{dr} = \frac{E_d}{\eta_b \eta_i \eta_c} \quad (52)$$

Onde η_b = eficiência da bateria, η_i = eficiência do inversor e η_c = eficiência do controlador de carga.

A potência de pico média é então calculada pela razão entre a demanda diária requerida de energia e o número médio de horas de sol no local (T_{hs}), por dia:

$$P_{méd,pico} = \frac{E_{dr}}{T_{hs}} \quad (53)$$

A corrente total do sistema é então obtida por meio da divisão entre a potência máxima média e a voltagem CC nominal do sistema fotovoltaico, na Equação (54):

$$I_{CC} = \frac{P_{máx}}{V_{dc}} \quad (54)$$

Finalmente, podemos calcular o número de módulos no sistema, em série e em paralelo, utilizando-se da voltagem do sistema e da voltagem nominal de cada módulo, para os módulos em série (N_{ms}), e da corrente total do sistema e da corrente nominal de cada módulo, para os módulos em paralelo (N_{mp}):

$$N_{ms} = \frac{V_{cc}}{V_m} \quad (55)$$

$$N_{mp} = \frac{I_{cc}}{I_m} \quad (56)$$

Onde V_m e I_m são a voltagem nominal e a corrente nominal de um módulo, respectivamente.

O número total de módulos que formam o arranjo fotovoltaico é determinado pela multiplicação entre o número de módulos em série e em paralelo, representada na Equação (57):

$$N_m = N_{ms} * N_{mp} \quad (57)$$

4.5. Sistema Propulsivo

Ao longo dos anos, testes experimentais em propulsores buscavam medir as características de operação e eficiência por meio de mudanças em parâmetros como passo/diâmetro (P/D) e razão de áreas (BAR). Os resultados de tais experimentos foram reunidos em séries, que atualmente servem como fonte de dados para o projeto e análise de propulsores.

A série Wageningen é a mais difundida e utilizada, por permitir a aplicação em qualquer faixa de velocidades e ter uma curva $K_T - K_Q$ mais apropriada para cálculos computacionais (MOLLAND, 2011). Além disso, em comparação com outras séries de domínio público, ela tem uma cobertura paramétrica mais expansiva, em termos de número de pás e razão passo/diâmetro. Carlton (2007) mostra que enquanto séries como

a Gawn ou KCA possuem dados de cerca de 35 propulsores, a Wageningen conta com aproximadamente 120, o que permite uma utilização mais precisa no dimensionamento de propulsores.

Abaixo, estão representados os intervalos dos valores que cada parâmetro do propulsor pode assumir.

Tabela 10. Valores das características de um propulsor da série Wageningen.

Característica	Valor Mínimo	Valor Máximo
Z	2	7
J	0.05	1.5
Ae/Ao	0.3	1.05
P/D	0.60	1.40

Fonte: (MOLLAND, 2011).

Os valores ótimos de K_T e K_Q são calculados a partir dos polinômios (58) e (59), tendo como entrada os coeficientes da Figura 66 – ANEXO A, o passo diâmetro, a razão de áreas e o número de pás. Vale ressaltar que estas equações são referentes ao valor do número de Reynolds Re de 2×10^6 . Para um outro número entre 2×10^6 e 2×10^9 , é preciso utilizar as formulações de ΔK_T e ΔK_Q , que também se encontram no ANEXO A - Figura 67.

$$K_T = \sum_{n=1}^{39} C_n(J)^{S_n} (P/D)^{t_n} (A_E/A_0)^{u_n} (z)^{v_n} \quad (58)$$

$$K_Q = \sum_{n=1}^{47} C_n(J)^{S_n} (P/D)^{t_n} (A_E/A_0)^{u_n} (z)^{v_n} \quad (59)$$

Os coeficientes de torque e empuxo representados nas equações acima são utilizados para o cálculo do coeficiente de avanço ótimo (J) (Equação (60) e, conseqüentemente encontrar as características ideais do propulsor, dadas as condições limitantes (diâmetro e rotações por minuto máximos, por exemplo). Por meio de um processo iterativo, o passo/diâmetro, a razão de áreas e os coeficientes propulsivos do

propulsor ótimo que estão associados à eficiência máxima podem ser obtidos (SCHOEPING, 2014).

$$J = \frac{V_a}{nD} \quad (60)$$

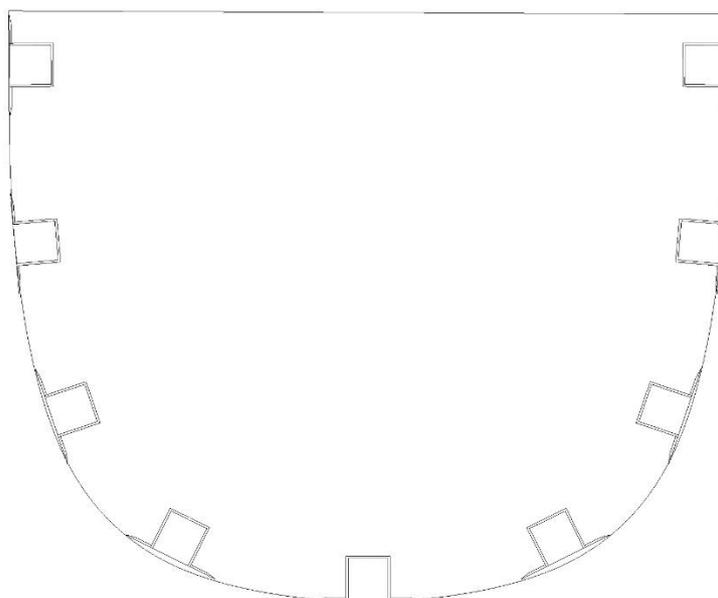
Alguns parâmetros de entrada, como a dedução de empuxo (t) e o coeficiente de esteira (w) precisam ser calculados por meio de formulações empíricas, que podem ser encontradas em Holtrop e Mennen (1982).

4.6. Dimensionamento estrutural

Os componentes estruturais de uma embarcação muitas vezes são projetados para atender a mais de uma função além de fornecer a integridade estrutural. O casco, por exemplo, serve também como um envelope estanque do barco, determina a resistência ao avanço (e, portanto, interfere nas características propulsivas) e o nível de manobrabilidade aceitável (PAULLING, 2008). Por isso, é preciso que esses componentes sejam dimensionados de acordo com as necessidades da embarcação.

Adotando o tipo de estrutura longitudinal, o primeiro passo é determinar o número de reforços longitudinais e o espaçamento entre cada um deles. O número de reforços não é definido pela regra utilizada da ABS (*High Speed Craft*), por isso foi preciso utilizar como referência o livro *The Elements of Boat Strength: For Builders, Designers and Owners*, de Dave Gerr (2000). Nele, é recomendado que se utilize uma distribuição simétrica dos reforços, com três no fundo e três em cada bordo, totalizando nove reforços (Figura 17).

Figura 17. Reforços longitudinais na seção mestra.



Para dimensionar o módulo de seção para cada reforço, são calculadas inicialmente as pressões hidrostáticas de projeto para as diferentes regiões da embarcação, neste caso, fundo, costado e convés. A pressão de fundo também é utilizada no cálculo da espessura mínima do laminado. As equações utilizadas para determinar as pressões de projeto são dadas abaixo:

$$p_d = N_3(0.64H + d) \quad (61)$$

$$p_s = N_3(H_s - y) \quad (62)$$

$$p_c = 30N_1F_D F_1 V V_1 \left(1 - 0.85 \frac{h_a}{h_1^{\frac{3}{3}}}\right) \quad (63)$$

Onde:

- P_d , P_s e P_c : pressão de projeto baseada em forças hidrostáticas no fundo, no costado e no convés, respectivamente, dada em kN/m^2 ;
- $N_1 = 0.1$;
- $F_D = 0.96$;
- $F_1 = 1$;
- $N_3 = 9.8$;
- H : parâmetro de onda, $0.0172L + 3.653$ m;

- d: calado da embarcação, em metros;
- $H_s = D + 1.22$ em metros, onde D é o pontal da embarcação, no caso de embarcações menores de 30 m;
- Y: distância acima da linha de base até o ponto considerado, em metros;
- V: velocidade de projeto da embarcação;
- V_1 : velocidade de impacto relativa;
- H_a : Distância vertical da linha de flutuação ao deck;
- $H_{1/3}$: Altura de onda significativa.

Em posse dos módulos de seção mínimos, é dimensionado então o reforço que atende a todos os reforços calculados, de acordo com ABS (2020), em *High Speed Craft*, Seção 3-2-6/1.3.5.

4.6.1. Determinação da espessura mínima do laminado e anteparas

De acordo com a ABS (2020), em *High Speed Craft*, Seção 3-2-3/5.5.1, a espessura do laminado do casco não deve ser menor que a encontrada pela Equação (64):

$$t = sc \sqrt{\frac{pk}{1000\sigma_a}} \text{ mm} \quad (64)$$

Onde:

- s = espaçamento entre as longitudinais do casco, em mm;
- c = fator de curvatura da placa, de valor mínimo de 0.70;
- p = pressão de projeto de fundo, dada pela Equação (61);
- k = coeficiente da razão de aspecto da placa;
- σ_a = tensão de escoamento do laminado, em MPa.

A espessura mínima das anteparas é definida também pela Equação (64), mas neste caso a pressão de projeto considerada é maior encontrada dentre as calculadas, ou seja, o pior caso; já o espaçamento utilizado é entre as próprias anteparas e como temos distâncias variáveis para cada compartimento, será tomada o maior espaçamento entre elas.

4.6.2. Módulos de seção dos reforços

➤ Reforços longitudinais

De acordo com a ABS (2020), em *High Speed Craft*, Seção 3-2-4/3.5.1, o módulo de seção dos reforços longitudinais não deve ser menor que o dado pela seguinte equação:

$$SM = \frac{83.3 * psl^2}{\sigma_a} cm^3 \quad (65)$$

Onde:

- p = pressão de projeto de fundo para os reforços longitudinais de fundo, pressão de projeto de costado para os reforços de costado e pressão de projeto de convés para o vão, em kN/m²;
- s = espaçamento entre os reforços longitudinais, de acordo com a região (costado ou fundo), em metros;
- l = espaçamento entre as anteparas, em metros;
- σ_a = tensão de escoamento do laminado, em MPa.

➤ Módulo de seção das cavernas

O módulo de seção das cavernas é dado pela Equação (65), mas neste caso a pressão de projeto utilizada será a maior dentre as calculadas; já o espaçamento neste caso é entre as cavernas, aplicando o maior valor de espaçamento entre as anteparas.

➤ Módulo de seção da seção mestra

Em seguida, o dimensionamento estrutural é finalizado com o cálculo do módulo de seção da seção mestra real, com todos os elementos longitudinais já encontrados, e comparado ao módulo dado pela norma da classificadora. Este critério é atendido e portanto, a embarcação está bem dimensionada estruturalmente, quando o módulo da seção mestra real é maior que o encontrado com as formulações da norma.

De acordo com a ABS (2020), em *High Speed Craft*, Seção 3-2-1/1.1.1, a equação utilizada para este cálculo é a seguinte:

$$SM = C_1 C_2 L^2 B (C_b - 0.7) K_3 C Q \quad (66)$$

Onde:

$$C_1 = 0.044L + 3.75;$$

$$C_2 = 0.01;$$

L = comprimento da embarcação, em metros;

B = boca da embarcação, em metros;

V = velocidade máxima em águas calmas, em nós;

C_b = coeficiente de bloco para o calado de projeto;

$$K_3 = 0.7 + 0.3 \left[\frac{V/\sqrt{L}}{2.36} \right];$$

$$C = 0.8;$$

$$Q = 400/0.75 S_u.$$

5. RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentadas as dimensões principais da embarcação, bem como a sua forma, nas diferentes vistas. A compartimentação é feita logo em seguida, sendo necessária para a melhor distribuição de pesos e equipamentos bem como as reservas de flutuação. Após isso, temos os cálculos de equilíbrio e estabilidade intacta e em avarias, de acordo com as regras da competição e da classificadora.

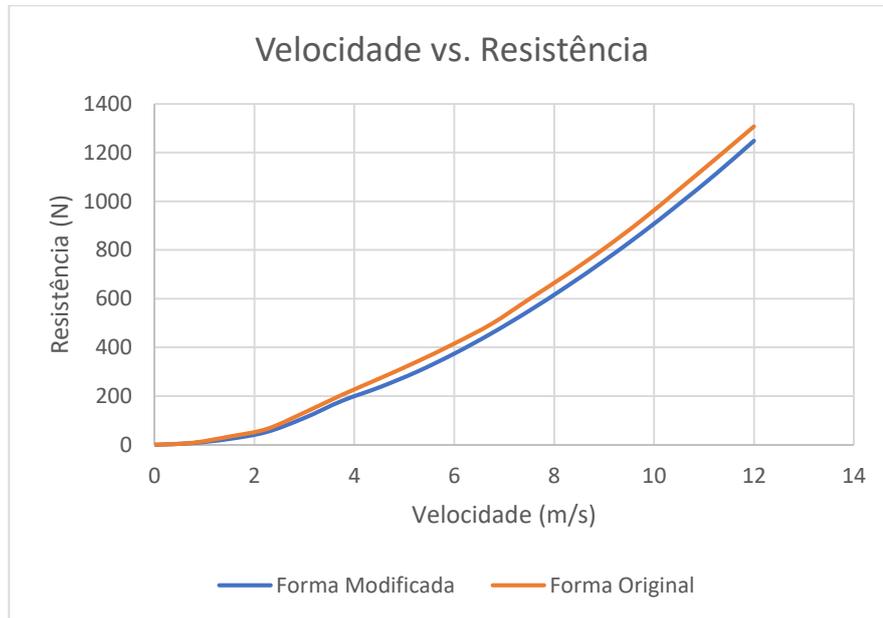
Dando continuidade, o comportamento em ondas da embarcação é discutido, com base nos movimentos de resposta avaliados no software Ansys Aqwa. O próximo tópico é o peso leve, dado pela soma do peso estrutural e dos equipamentos, resultando na curva de pesos leves total.

5.1. Forma

A forma da embarcação utilizada foi fornecida pela organização do DSB, que permite qualquer tipo de modificação, contanto que não afete os limites dimensionais. Tomando inicialmente as dimensões dadas pelo Desafio, foram feitas mudanças na forma original, com o auxílio da ferramenta de transformação paramétrica do Maxsurf Modeler, em parâmetros como o coeficiente de bloco e coeficiente prismático, de tal forma que o LCB ficasse localizado 2% à ré da seção mestra.

Adicionalmente, foram comparadas as resistências ao avanço da forma original e da modificada, de maneira a verificar que, mesmo após as transformações paramétricas, a forma final apresentava uma menor resistência para a velocidade máxima de projeto. Abaixo na Figura 18, pode-se observar as duas curvas de resistência x velocidade, com a original em vermelho e a modificada em azul.

Figura 18. Curvas de resistência ao avanço, forma original (vermelho) e modificada (azul)



Nas Figuras 19, 20 e 21, estão representadas as diferentes projeções bidimensionais da forma final.

Figura 19. Vista longitudinal da embarcação.

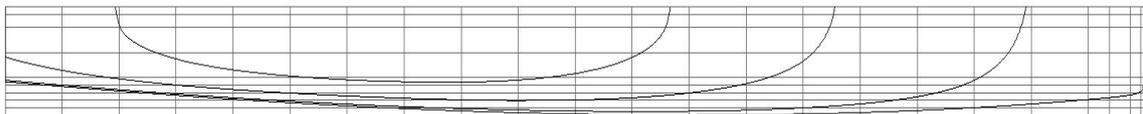


Figura 20. Vista de planta da embarcação.

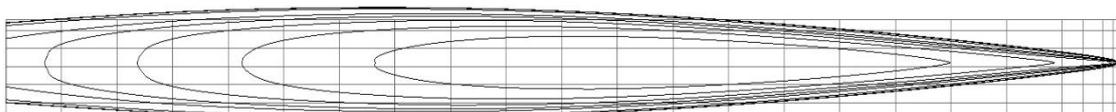
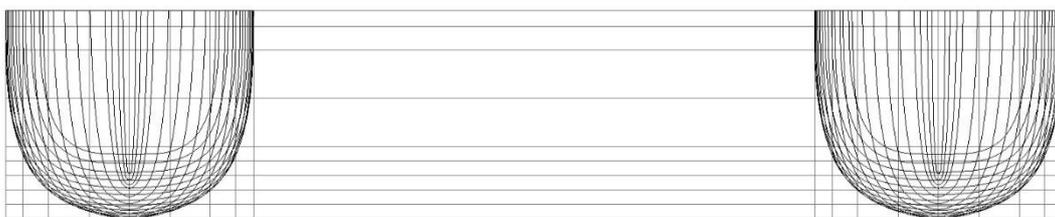
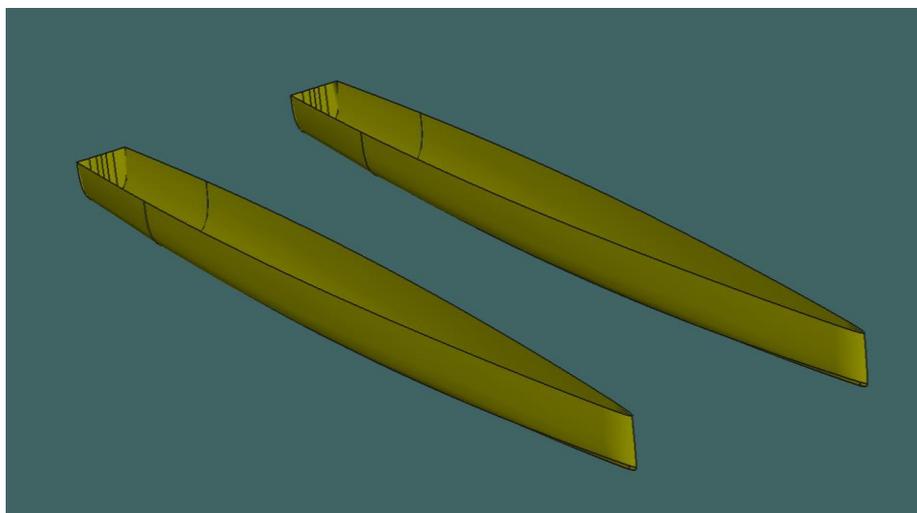


Figura 21. Vista transversal da embarcação.



Com a forma definida, foi feito o uso do software Maxsurf Stability (Figura 22) para calcular os coeficientes de forma, mais tarde utilizados no dimensionamento do propulsor, por exemplo.

Figura 22. Modelo da embarcação no software Maxsurf.



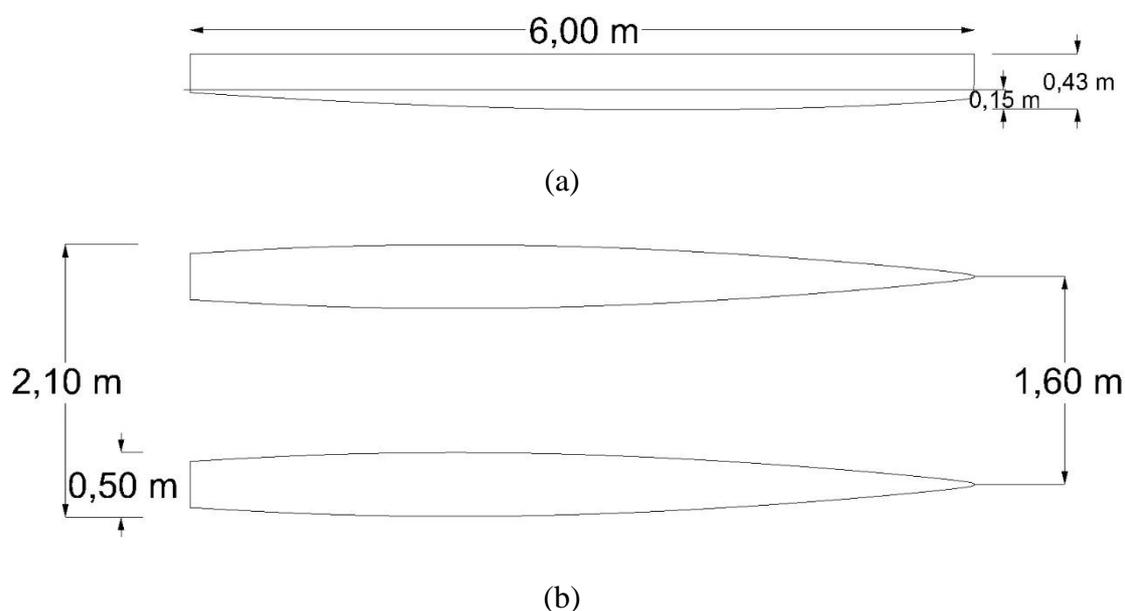
Na Tabela 11, temos os principais parâmetros de forma, como os coeficientes de forma e dimensões principais, que podem ser visualizadas na Figura 23.

Tabela 11. Dimensões Principais e Coeficientes de Forma.

Característica	Valor	Unidade
Comprimento	6.00	m
Boca	0.50	m
Boca total	2.10	m
Calado (m)	0.15	m
Pontal (m)	0.43	m
Volume submerso	0.365	m ³
Deslocamento	374.125	Kg
Coeficiente de Bloco	0.423	-

Característica	Valor	Unidade
Coefficiente Prismático	0.595	-
Coefficiente de Seção Mestra	0.772	-
Coefficiente do Plano de Flutuação	0.625	-

Figura 23. Dimensões principais da embarcação, na vista longitudinal (a) e na vista de planta (b).



5.2. Compartimentação

A NORMAM-03/DPC (2003) não estabelece critérios de compartimentação; por este motivo, foi utilizado o procedimento determinado na NORMAM-01/DPC. De acordo com a NORMAM-01/DPC (2005), Capítulo 7, Seção VIII, em embarcações de casco não metálico, são instaladas anteparas retardadoras de alagamento, cuja função é assegurar um mecanismo que, em casos de avaria no casco abaixo da linha de flutuação, atrase o alagamento das embarcações.

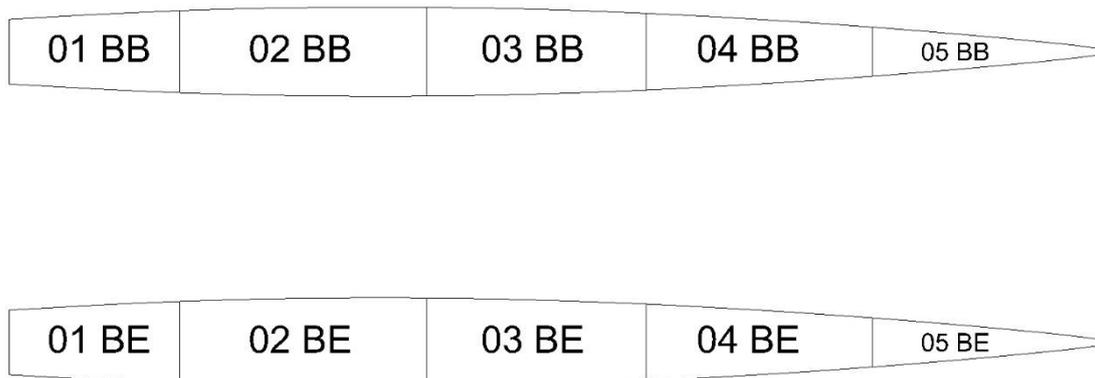
A determinação no número mínimo de anteparas deve ser feita em concordância com os seguintes procedimentos:

- Os espaços destinados aos passageiros ou reservados às instalações de máquinas deverão estar separados entre si por meio de Anteparas Retardadoras de Alagamento;

- Nenhum compartimento poderá apresentar comprimento superior a 40% do Comprimento de Regra da Embarcação (NORMAM-01/DPC, 2005).

Com base nessas observações, ficou decidido que a embarcação apresentaria 5 compartimentos, em cada casco, como representado na Figura 24.

Figura 24. Compartimentos da embarcação.



O edital do Desafio Solar Brasil aponta a necessidade de distribuir uma reserva de flutuação de 20% a mais que o total do deslocamento da embarcação. Com o deslocamento calculado, é acrescido a porcentagem requerida pelo edital da competição.

Tabela 12. Volume de poliuretano para reserva de flutuação.

Característica	Valor
∇_{total}	0.3646 m ³
$\rho(\text{poliuretano})$	30 kg/m ³
$\nabla_{\text{poliuretano}}$	0.4375 m ³

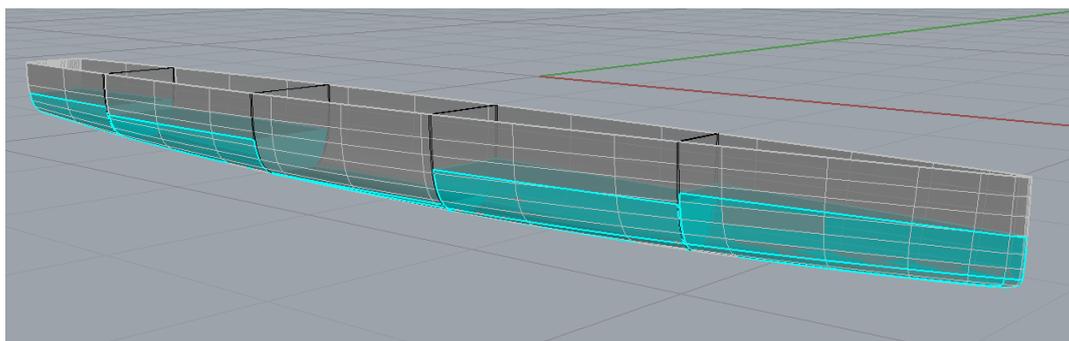
No caso de um catamarã, esse volume da reserva de flutuação deve ser distribuído igualmente entre os dois cascos. Portanto, em cada casco deve ser adicionado um volume de 0.2188 m³ de poliuretano. Além disso, é preciso distribuir essa quantia ao longo dos cinco compartimentos presentes de tal forma que os critérios de estabilidade sejam atendidos.

Tabela 13. Permeabilidade final dos compartimentos.

Compartimentos	Volume total dos compartimentos	Volume de poliuretano	Permeabilidade
1	0.011 m ³	0.045 m ³	58.69%
2	0.218 m ³	0.081 m ³	62.91%
3	0.206 m ³	0.010 m ³	95.14%
4	0.159 m ³	0.060 m ³	62.31%
5	0.065 m ³	0.030 m ³	54.08%

Em posse dos volumes de poliuretano que cada compartimento deve possuir para que seja atingida a reserva de flutuação desejada, foi feita uma disposição visual de como esses blocos estariam posicionados na embarcação, como mostra a Figura 25.

Figura 25. Blocos de poliuretano (em azul) nos compartimentos da embarcação.



5.3. Equilíbrio e Estabilidade Intacta

Para analisar o equilíbrio estático e as condições de estabilidade intacta e em avarias da embarcação, é preciso definir qual a condição de carregamento que ela está sujeita. A Tabela 14 mostra quais os pesos considerados e posições dos centros de gravidade de cada item do carregamento. O centro de gravidade é dado na forma: coordenada longitudinal x transversal x vertical.

Tabela 14. Condição de carregamento para as análises de equilíbrio e estabilidade.

Item	Peso	Centro de Gravidade
Peso Leve	72.6 kg	(2.322 x 0 x 0.1) m
Baterias BB	28 kg	(0.577 x 0.8 x 0.13) m
Baterias BE	28 kg	(0.577 x -0.8 x 0.13) m
Placa Solar 1	22.7 kg	(1.198 x 0 x 0.356) m

Item	Peso	Centro de Gravidade
Placa Solar 2	22.7 kg	(2.676 x -0.458 x 0.356) m
Placa Solar 3	22.7 kg	(4.722 x 0 x 0.356) m
Motor	10 kg	(0.163 x 0 x -0.053) m
Piloto	70 kg	(2.76 x 0.8 x 0.210) m
Peso Adicional	20 kg	(2.76 x 0.8 x 0.210) m
Lastro	77 kg	(2.76 x -0.8 x 0.210) m
Reserva de Flutuação 01 BB/BE	1.35 kg	(0.461 x \pm 0.8 x 0.150) m
Reserva de Flutuação 02 BB/BE	2.43 kg	(1.600 x \pm 0.8 x 0.150) m
Reserva de Flutuação 03 BB/BE	0.30 kg	(2.876 x \pm 0.8 x 0.150) m
Reserva de Flutuação 04 BB/BE	1.80 kg	(4.100 x \pm 0.8 x 0.150) m
Reserva de Flutuação 05 BB/BE	0.90 kg	(5.362 x \pm 0.8 x 0.150) m

Com o carregamento devidamente definido, podemos calcular como a embarcação se comporta na condição de equilíbrio estático. Alguns dos parâmetros encontram-se na tabela abaixo.

Tabela 15. Condição de equilíbrio estático.

Parâmetro	Valor
Calado na seção mestra	0.150 m
Volume deslocado	0.3965 m ³
Calado na perpendicular de proa	0.074 m
Calado na perpendicular de popa	0.225 m
Trimado	0.151 m
Imersão (TPC)	0.039 ton/cm
Centro de Flutuação	2.416 m
Altura do Centro de gravidade KG	0.194 m
Inclinação máxima do convés	1.448°

Nesta condição, é possível perceber que a embarcação apresenta um trim pela popa. O calado na perpendicular de ré é aproximadamente 0.08 m maior que o calado médio. A imersão (TPC) é de 0.039 ton/cm. Esse valor se dá porque o calado e, portanto,

o volume submerso, são relativamente pequenos. A inclinação do convés é causada pelo trim do catamarã e por isso tem o mesmo ângulo, de 1.45°.

Como descrita na Seção 4.3 da Metodologia, a estabilidade intacta foi calculada de acordo com resoluções da IMO e do HSC Code e com o edital do DSB. As áreas abaixo da curva GZ em intervalos de ângulos diferentes bem como o valor inicial do GM_T e o ângulo do GZ máximo, representados na tabela, ditam se a embarcação apresentada estabilidade suficiente para a navegação.

Tabela 16. Valores para os critérios de estabilidade intacta.

Crítérios	Valores de Regra	Valores Obtidos
Área (0° a 30°)	> 0.055 m.rad	0.3513 m.rad
Área (0° a 40°)	> 0.090 m.rad	0.4721 m.rad
Área (30° a 40°)	> 0.030 m.rad	0.1208 m.rad
GM_T	> 0.15 m	6.528 m
Ângulo $GZ_{máx}$	> 10°	13.6°
Área entre GZ e HTL	> 0.028 m.rad	0.1509 m.rad
Ângulo de equilíbrio	< 10°	0.1°
Crítério da competição	< 12.5°	0.4°

Como todos os valores obtidos são maiores que os valores estabelecidos nas Regras e no edital da competição, pode-se dizer que a embarcação apresenta as condições de estabilidade necessárias.

5.4. Estabilidade em Avarias

A estabilidade em avarias tem como objetivo avaliar se a embarcação é estável quando for avariada em diferentes locais do casco. Por isso, é preciso calcular o comprimento dessas extensões e saber quantos e quais compartimentos são afetados com a avaria, como apresentados na Tabela 17.

Tabela 17. Extensões das avarias, de acordo com o HSC Code.

Extensão	Valor
Extensão de costado	0.6 m
Extensão longitudinal de fundo	0.6 m
Extensão transversal de fundo	0.5 m

De acordo com a tabela anterior, a extensão máxima de fundo atinge o total de 2 compartimentos sucessivos. Como a distribuição de pesos na embarcação não é simétrica, é preciso analisar a estabilidade em avarias em cada um dos cascos. Os compartimentos avariados para cada caso estão apresentados na Tabela 18. Com isso, podemos observar os valores obtidos de acordo com os critérios estabelecidos na Seção 4.3. O braço escorante HL_3 , que define o critério 4, é calculado utilizando como parâmetros uma área lateral de 1.6901 m^2 e distância entre centroides de 0.203 m . Portanto, temos os seguintes resultados para cada caso de avaria listado na Tabela 18:

Tabela 18. Casos de estabilidade em avarias analisados, e os critérios de estabilidade para cada caso.

Casos	Compartimentos avariados	1	2	3	4
Caso 1	Compart.01 BB	0.1307 m.rad	0.847 m	94.1°	0°
Caso 2	Compart.02 BB	0.1281 m.rad	0.840 m	94.1°	0.6°
Caso 3	Compart.03 BB	0.1271 m.rad	0.836 m	94.1°	0.9°
Caso 4	Compart.04 BB	0.1305 m.rad	0.846 m	94.1°	0.1°
Caso 5	Compart.05 BB	0.1326 m.rad	0.852 m	94.1°	0.3°
Caso 6	Compart.01 BE	0.1337 m.rad	0.852 m	93.5°	0.8°
Caso 7	Compart.02 BE	0.1334 m.rad	0.843 m	93.1°	1.4°
Caso 8	Compart.03 BE	0.1371 m.rad	0.857 m	93.0°	1.6°
Caso 9	Compart.04 BE	0.1358 m.rad	0.861 m	93.6°	0.9°
Caso 10	Compart.05 BE	0.1333 m.rad	0.854 m	94.0°	0.5°
Caso 11	Comparts.01 e 02 BB	0.1234 m.rad	0.837 m	94.1°	1.5°
Caso 12	Comparts.02 e 03 BB	0.1207 m.rad	0.825 m	94.1°	2.4°
Caso 13	Comparts.03 e 04 BB	0.1232 m.rad	0.830 m	94.1°	1.7°
Caso 14	Comparts.04 e 05 BB	0.1299 m.rad	0.844 m	94.1°	0.2°
Caso 15	Comparts.01 e 02 BE	0.1039 m.rad	0.688 m	93.7°	2.4°
Caso 16	Comparts.02 e 03 BE	0.1095 m.rad	0.702 m	92.9°	3.2°
Caso 17	Comparts.03 e 04 BE	0.1250 m.rad	0.799 m	92.2°	2.5°
Caso 18	Comparts.04 e 05 BE	0.1354 m.rad	0.858 m	93.3°	1.0°

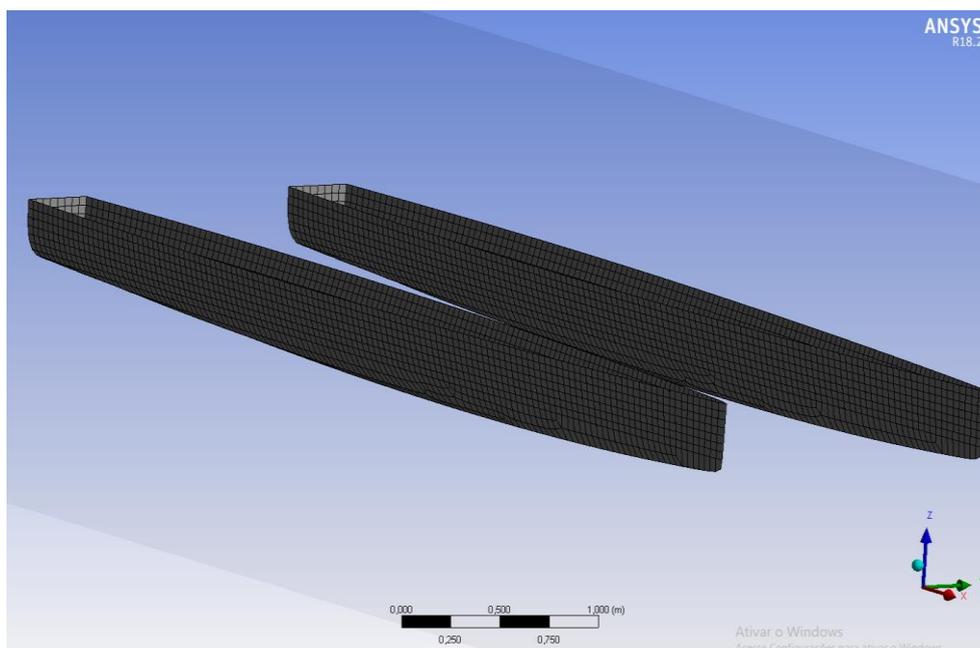
Finalmente, podemos afirmar que em todos os casos de avaria analisados, a embarcação ainda apresenta a estabilidade suficiente.

5.5. Seakeeping

Como dito na seção 3.5, o estudo do comportamento de uma embarcação quando está sob a ação de ondas, ou *seakeeping*, é realizado por meio da análise dos movimentos de resposta. A análise de seakeeping se faz necessária porque a competição é realizada em águas abertas, ou seja, com a influência de um estado de mar com ondas completamente irregulares.

Inicialmente, são calculados os raios de giração da embarcação, que por sua vez são necessários para obtenção dos momentos de inércia nos graus de liberdade rotacionais de roll, pitch e yaw. Já no ANSYS Aqwa, foi gerada a malha de painéis (Figura 26), com uma faixa de frequências considerada. É importante ressaltar que essas simulações são feitas levando em consideração a velocidade de avanço máxima.

Figura 26. Malha de painéis da embarcação gerada no Ansys.



O Ansys utiliza a metodologia de Elementos Finitos, que consiste em discretizar um domínio contínuo em um número finito de pontos. Como é possível ver, a malha é composta por diversos painéis retangulares, que são os chamados elementos. Os pontos de interseção entre cada um desses elementos são denominados nós, que são as coordenadas no espaço em que os graus de liberdade são definidos.

A análise é feita nos elementos e nós que tem a incidência de ondas, ou seja, em que ocorrem a difração das ondas. Por isso, a Tabela 19 mostra os elementos totais necessários pra construção da malha e os que serão efetivamente aplicados na análise.

Tabela 19. Quantidade de nós e elementos utilizados na análise do método dos painéis.

Parâmetros	Valor
Número de nós totais	5446
Número de elementos totais	5184
Número de nós difratados	1790
Número de elementos difratados	1530

Dentre os parâmetros obtidos no software, temos os coeficientes de massa adicional e amortecimento bem como as forças excitantes e suas defasagens e os operadores de amplitude de resposta (RAO). Esses são utilizados para encontrar o espectro padrão e o espectro de resposta em pontos específicos da embarcação, assim descrevendo os principais fenômenos de *seakeeping*.

➤ Propriedades de Massa

A seguir, a partir dos raios de giração K_{xx} , K_{yy} e K_{zz} , encontram-se os momentos de inércia, calculados pelo Ansys. As formulações utilizadas são demonstradas a seguir e podem ser encontradas em artigos do próprio Ansys (2013) e em Faltinsen (2005, p. 221), com pequenas variações. Juntamente, são representados os momentos de inércia de área da embarcação.

Tabela 20. Raios de Giração e Propriedades de massa da embarcação.

Propriedade	Valor
K_{xx}	$0.34*B = 0.714 \text{ m}$
K_{yy}	$0.25*L = 1.500 \text{ m}$
K_{zz}	$0.25*L = 1.500 \text{ m}$
I_{xx}	$2.02 \text{ E}+02 \text{ kg.m}^2$
I_{yy}	$8.42 \text{ E}+02 \text{ kg.m}^2$
I_{zz}	$8.42 \text{ E}+02 \text{ kg.m}^2$

➤ Coeficientes Hidrodinâmicos

Nesta seção, estão representados os coeficientes de massa adicional e amortecimento de acordo com a frequência para os movimentos que apresentam restauração, heave, roll e pitch, obtidos no Ansys. Os coeficientes de restauração, calculados a partir de propriedades geométricas, também se encontram a seguir.

Figura 27. Massa Adicional em Heave x Frequência.

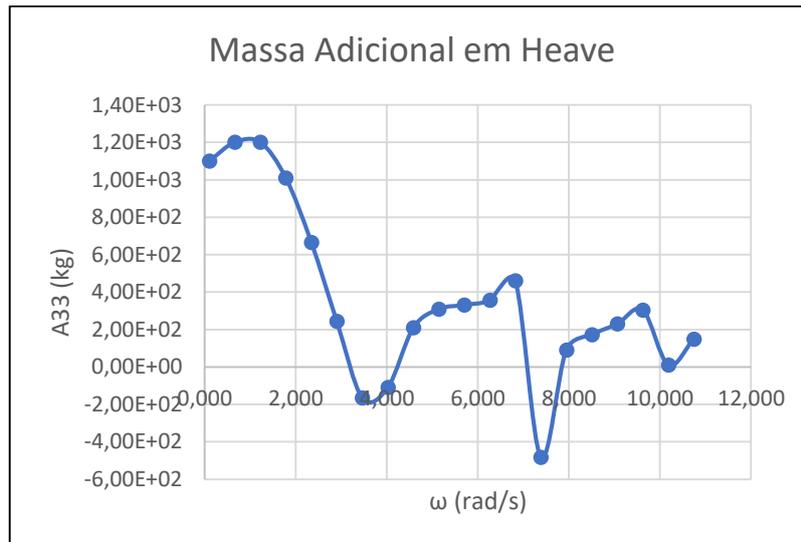


Figura 28. Massa Adicional em Roll x Frequência.

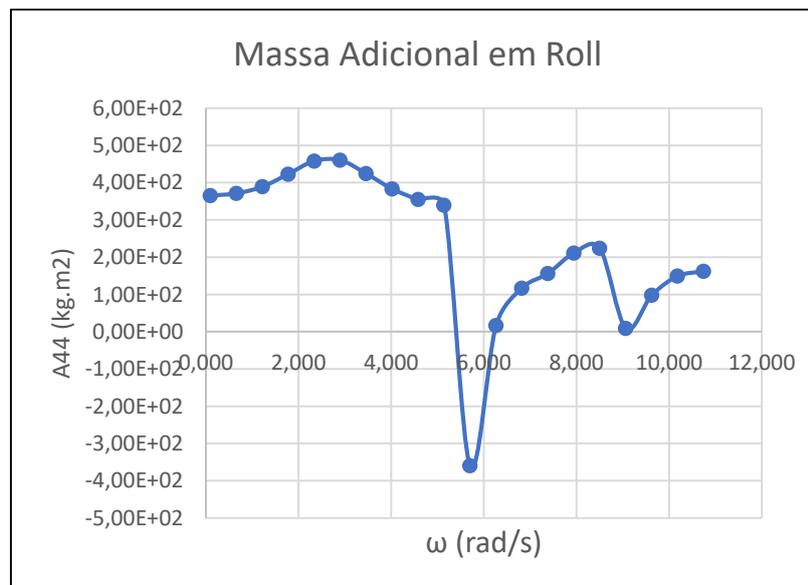


Figura 29. Massa Adicional em Pitch x Frequência.

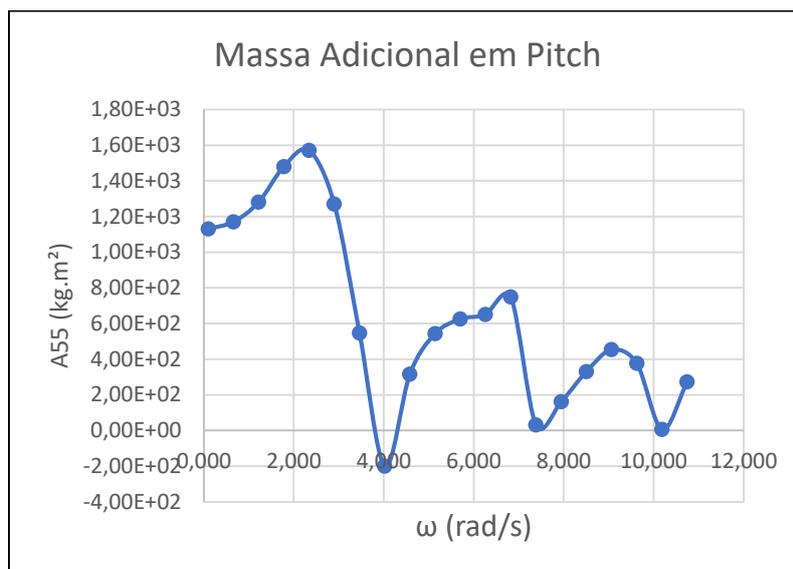


Tabela 21. Coeficientes de Restauração em Heave, Roll e Pitch.

Coeficiente	Valor
C_{33}	37687.077 kg/s ²
C_{44}	26968.381 kg ² /m.s ²
C_{55}	88054.629 kg ² /m.s ²

➤ Frequências Naturais dos Movimentos

Para encontrar as frequências naturais, são plotadas as frequências de resposta da embarcação e encontramos a interseção entre as duas frequências, que representa a frequência natural para cada movimento. O mesmo procedimento é feito para determinar os períodos naturais.

Tabela 22. Frequências e Períodos Naturais em Heave, Roll e Pitch.

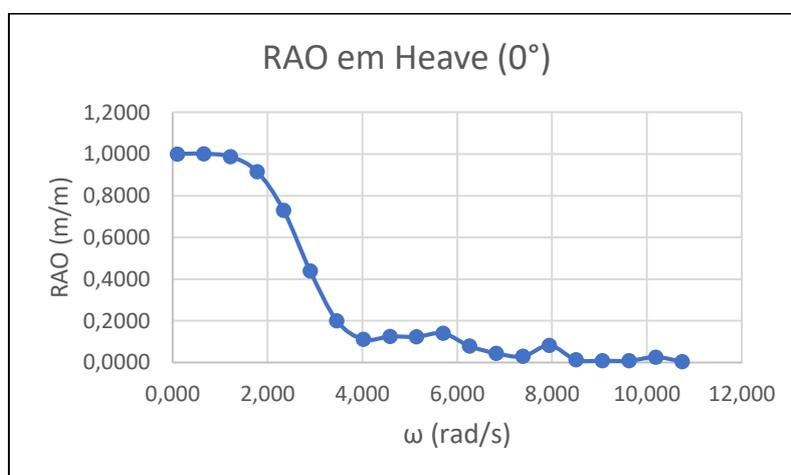
Frequência	Valor	Período	Valor
W_{33}	6.7675 rad/s	T_{33}	0.9279 s
W_{44}	0.1203 rad/s	T_{44}	60.8943 s
W_{55}	0.1166 rad/s	T_{55}	61.2498 s

➤ **Response Amplitude Operator (RAO)**

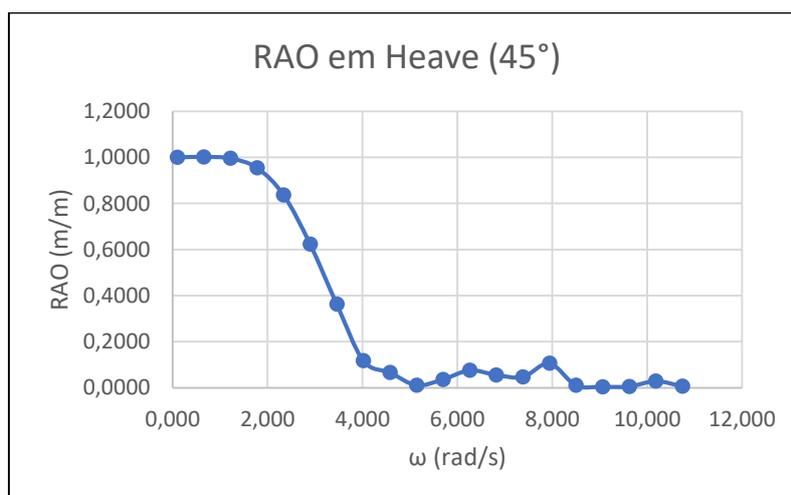
Sabendo os movimentos do CG e os relativos a ele, podemos calcular o movimento e qualquer ponto na estrutura utilizando superposição. Os ângulos de rotação são adotados como pequenos, o que simplifica a matriz de rotação. Com os RAOs dos movimentos obtidos no Ansys, conseguimos calcular a resposta em determinados pontos de estudo.

Figura 30. RAOs em Heave, para as direções de (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°, (d) 135° e (e) 180°.

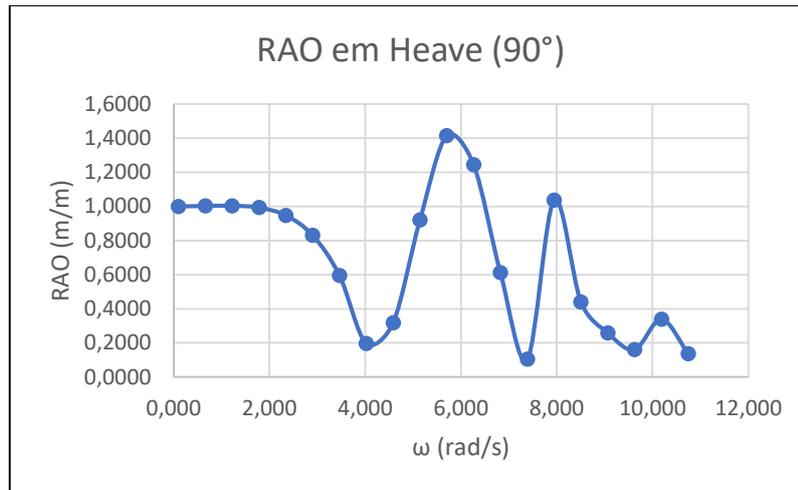
(a)



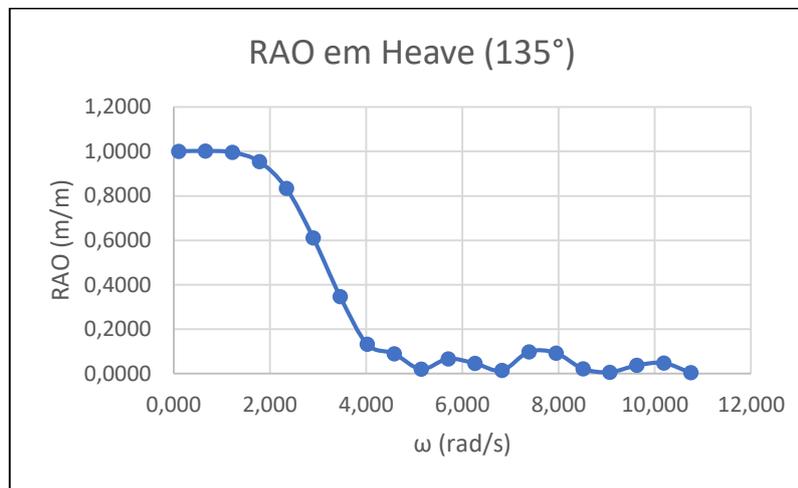
(b)



(c)



(d)



(e)

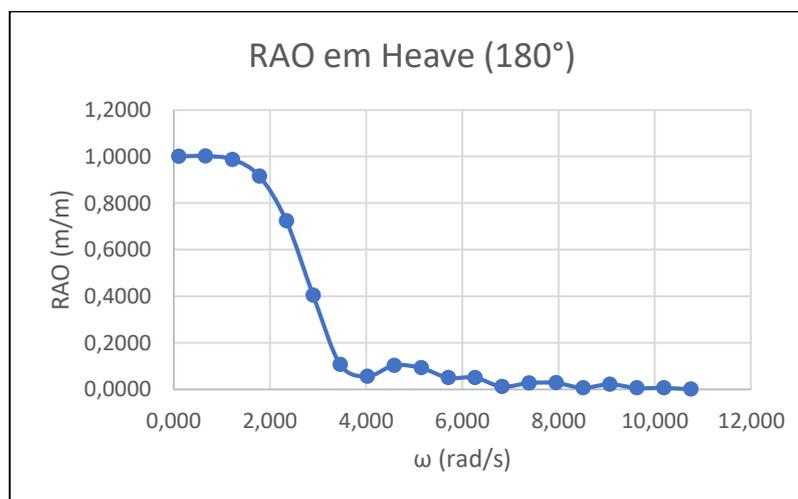
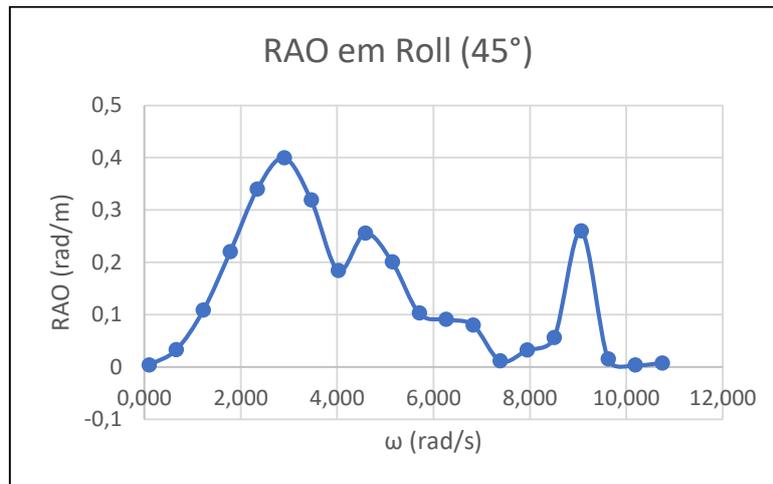
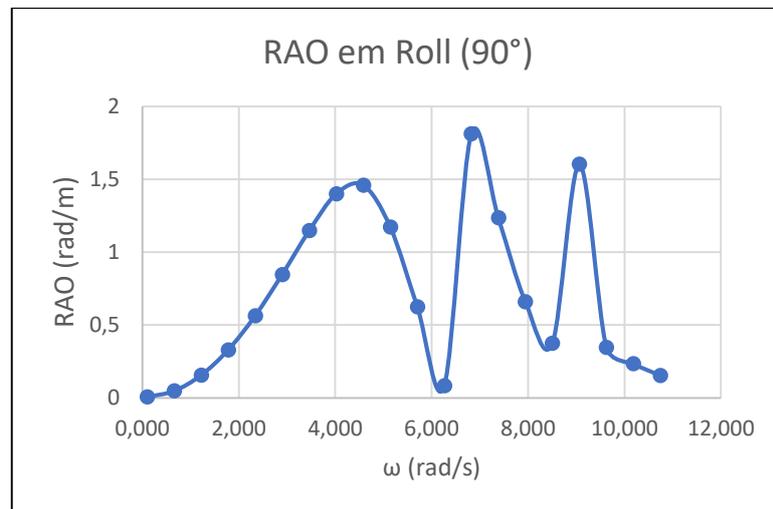


Figura 31. RAOs em Roll, para as direções de (a) 45°, (b) 90° e (c) 135°.

(a)



(b)



(c)

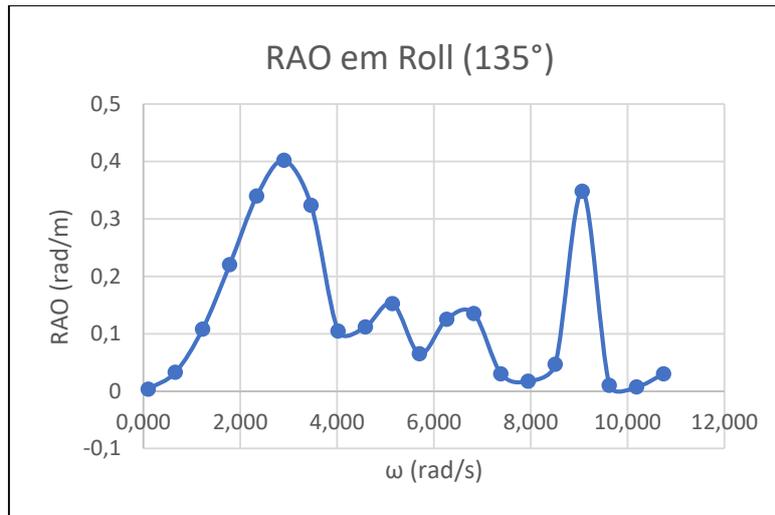
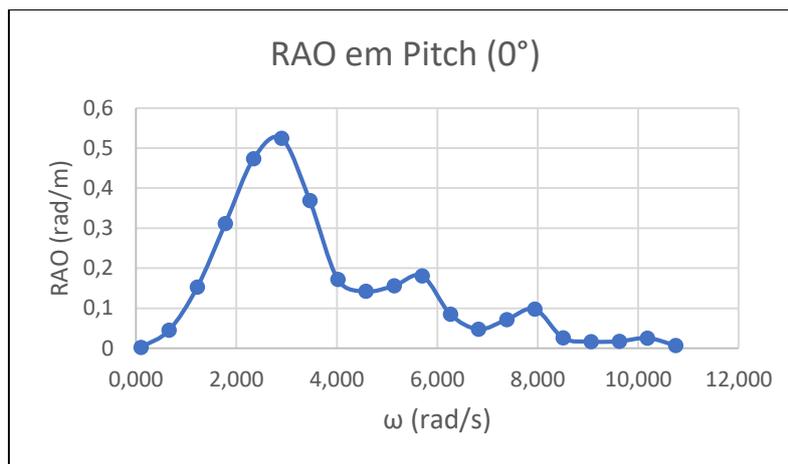
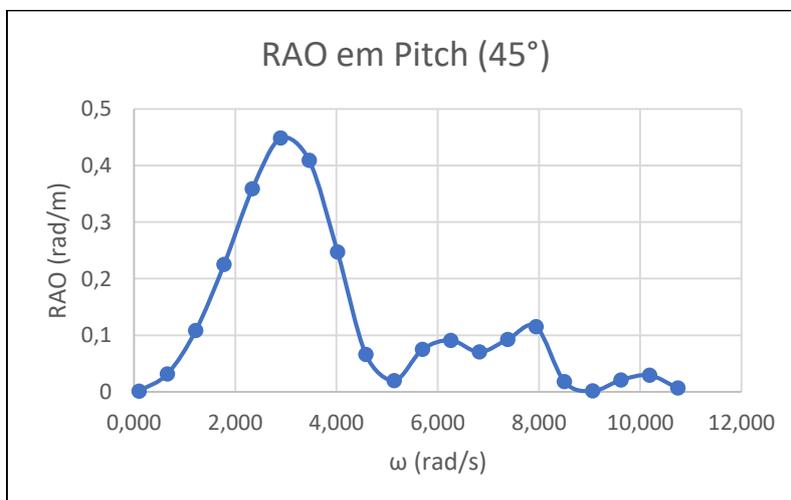


Figura 32. RAOs em Pitch, para as direções de (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°, (d) 135° e (e) 180°.

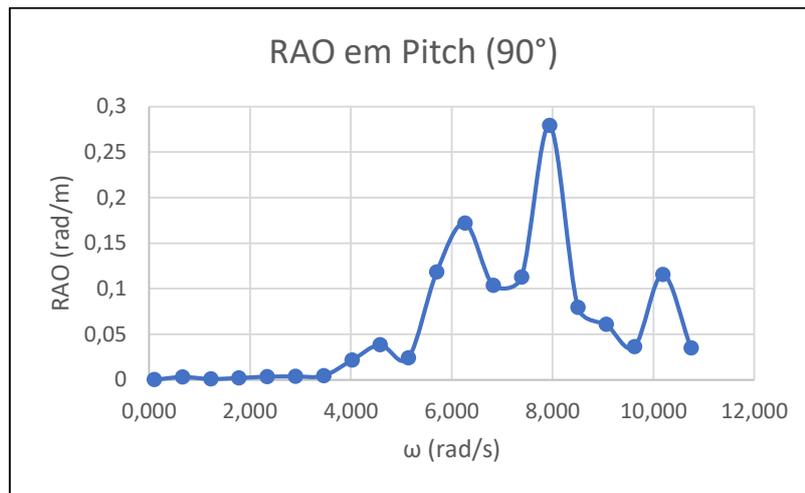
(a)



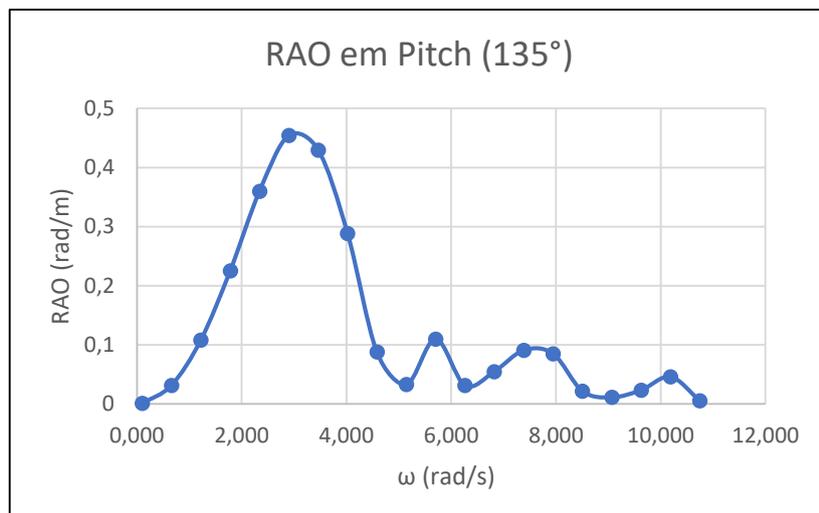
(b)



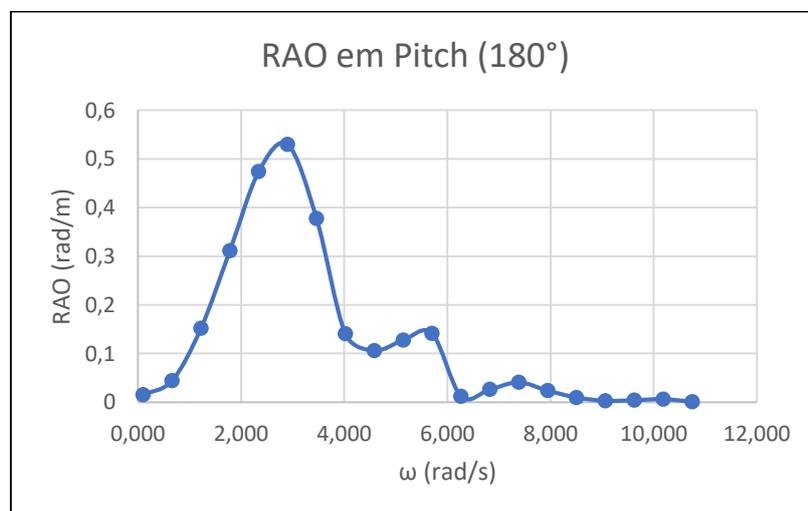
(c)



(d)



(e)



5.5.1. Forças excitantes e Fases nas Frequências Naturais

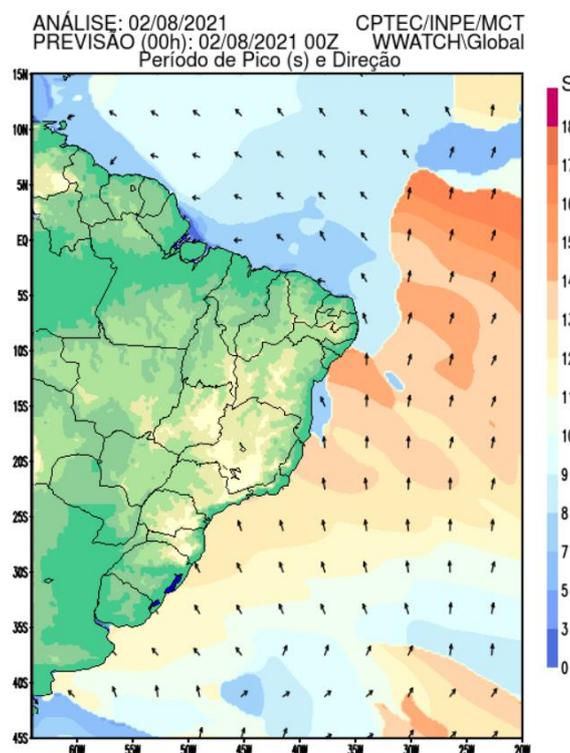
A obtenção das forças de excitação e suas defasagens utiliza-se das frequências naturais, já que quando excitado com a força, o sistema tende a entrar em ressonância. O Aqwa fornece tanto os valores das forças quanto seus ângulos de fase correspondentes. No Anexo C, estão representadas as forças excitantes para os movimentos de heave, roll e pitch, bem como os respectivos valores de força e fase nas frequências naturais.

5.5.2. Espectro de Onda Padrão

Como descrito na Seção 3.5.2, os espectros padrão de ondas são aplicados com o intuito de descrever o espectro de frequência de uma onda irregular por meio de uma relação matemática, usando como parâmetros a altura significativa das ondas e o período de picos na região desejada, imputados na Equação (13). O espectro utilizado é o Jonswap modificado, que melhor representa o comportamento das ondas na costa brasileira.

Como o Edital não especifica altura de onda máxima e sim uma borda de livre mínima de 25cm, este valor foi considerado como altura significativa. Já o período de picos foi avaliado de acordo com as previsões do INPE e está representado na Figura 33.

Figura 33. Período de Picos das Ondas ao longo do litoral brasileiro.



Fonte: (INPE, 2021).

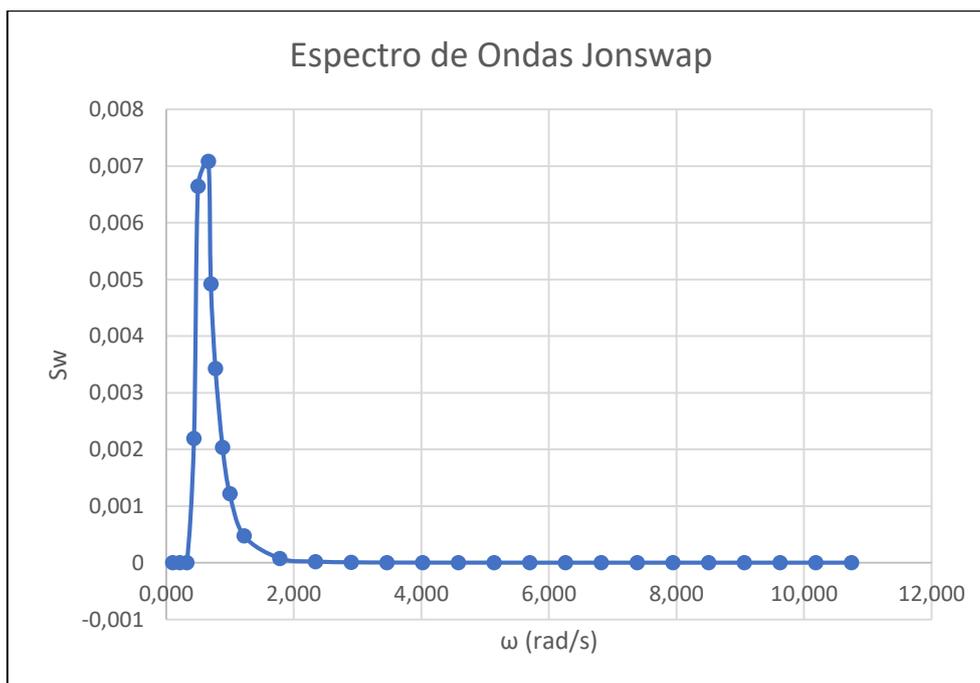
Abaixo na Tabela 23, encontram-se os parâmetros utilizados para o cálculo do espectro padrão de ondas em questão.

Tabela 23. Parâmetros para o cálculo do espectro padrão.

Parâmetro	Valor
$H_{1/3}$	0.25 m
T_p	11 s
T_1	8.49 s
ω_p	0.571 rad/s

Com isso, o espectro pode ser plotado de acordo com as diferentes faixas de frequência desejadas, como mostra a Figura 34.

Figura 34. Espectro de Ondas de Jonswap.



5.5.3. Fenômenos de Seakeeping

Em posse dos valores do espectro padrão, podemos analisar como diferentes pontos da embarcação irão responder quando estiverem navegando nas condições consideradas. Neste caso, serão analisados três fenômenos de seakeeping: a imersão de proa, a emersão de propulsor e a aceleração de cockpit.

Nos casos de imersão de proa e emersão de propulsor, são utilizados os RAO's de posição para os pontos P (ponto mais alto e à vante da proa) e H (ponto mais alto da pá

do propulsor). Com isso, são calculadas as probabilidades de que esses eventos ocorram, de acordo com a Equação (20). Em seguida, é possível obter o número de ocorrências que cada evento terá ao longo de um período de tempo determinado. Nas Tabela 24 e Tabela 25, são mostradas as probabilidades para os diferentes aproamentos da embarcação e o número de ocorrências N em um período de 1 hora, sendo essa a condição mais crítica, que é dado por:

$$N = \frac{3600 * P}{T_{p,avg}} \quad (67)$$

Sendo P = probabilidade de imersão de proa ou emersão de propulsor e $T_{p,avg}$ = período médio entre picos, dado por $T_{p,avg} = 2\pi \sqrt{\frac{m_2}{m_4}}$.

Tabela 24. Resultados do fenômeno de imersão de proa, para os diferentes aproamentos.

Parâmetro	Direção 0°	Direção 45°	Direção 90°	Direção 135°	Direção 180°
H	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432
M_0	0.004364	0.01276	0.1802	0.006848	0.002354
P	6.29E-10	0.00071	0.60	1.37E-06	8.81E-18
N	1.56E-07	0.18	148.06	0.00034	2.18E-15

Tabela 25. Resultados do fenômeno de emersão do propulsor, para os diferentes aproamentos.

Parâmetro	Direção 0°	Direção 45°	Direção 90°	Direção 135°	Direção 180°
H	0.245	0.245	0.245	0.245	0.245
M_0	0.004263	0.007756	0.08035	0.007892	0.004254
P	0.00087	0.021	0.69	0.022	0.00086
N	0.22	5.16	170,24	5.52	0.21

De acordo com as tabelas, as ocorrências dos eventos de imersão de proa e emersão do propulsor são maiores quando a incidência da onda ocorre em 90° , o que já era o esperado. Os valores encontrados, a princípio, parecem ser elevados, porém é preciso reiterar que essa seria uma condição de navegação peculiar; vale lembrar também que as análises foram feitas levando em conta uma condição de mar em que a maior onda possível tenha a altura de 0.25m e por isso, quando observadas ondas maiores na prática, é recomendável que a embarcação volte ao pier. Outra observação deve ser feita pelo próprio piloto que, sempre que possível, não deve navegar com as ondas incidindo a um ângulo de 90° .

Quanto à aceleração do cockpit, a classificadora ABS estabelece um limite máximo, dado em *High Speed Craft*, Seção 3-2-2/1.1.3, pela Eq. (68):

$$n_{CG} = 1.39 + k_n \frac{V}{\sqrt{L}} \quad (68)$$

Onde $k_n = 0.256$, V é a velocidade de avanço e L o comprimento total da embarcação.

Da mesma forma, a aceleração média do centro de gravidade (1/100 das acelerações verticais mais elevadas) é fornecida pela ABS como representada na equação abaixo:

$$n_{CG} = N_2 \left[\frac{12h_{1/3}}{N_h B_w} + 1.0 \right] \tau [50 - \beta_{CG}] \frac{V^2 (N_h B_w)^2}{\Delta} g's \quad (69)$$

$N_2 = 0.0078$;

$h_{1/3}$: altura significativa das ondas, em metros;

N_h : número de cascos;

B_w : boca máxima da embarcação, na linha d'água, em metros;

τ : ângulo de trim, em graus, não podendo ser tomado menos que 4° para embarcações de $L < 50$ m;

β_{CG} : ângulo de deadrise, em graus;

V : velocidade de avanço da embarcação, em nós;

Δ : deslocamento de projeto, em quilogramas.

De acordo com a equação (68), a aceleração não pode ser maior que 2.223g. Já o valor encontrado pela equação (69) foi de 0.636g, ou seja, dentro dos limites estabelecidos.

5.6. Peso Leve

De acordo com o edital do Desafio Solar Brasil, o peso leve mínimo da embarcação deve ser de 220 kg, sem piloto e sem lastro. Por isso, o cálculo do peso leve é feito inicialmente levando em conta dois tipos de peso: o peso leve estrutural, composto pelas fibras, resinas e gel coat aplicadas na construção dos cascos; e o peso dos equipamentos necessários para o funcionamento da embarcação, como o motor, placas solares e baterias. Por fim, é mostrado o gráfico da curva de pesos, representada ao longo do comprimento do catamarã.

5.6.1. Peso Leve Estrutural

Para definir o material utilizado como composição do casco, foi utilizada uma técnica conhecida como laminado estrutural, assegurando a capacidade de resistência aos esforços que atuam no laminado, sejam externos ou internos. Este processo é construído por camadas alternadas de mantas de fibra de vidro com gramatura de 450 g/m^2 e tecidos bidirecionais de fibra de vidro de 600 g/m^2 (TG FIBERGLASS, 2020). A proporção de resina para fibra de vidro comumente é de 2:1, mas quando a aplicação é manual a porcentagem de resina pode chegar a 70% do peso total (TG FIBERGLASS, 2020). Sendo assim, no presente projeto foi aplicada uma proporção de 2.5:1. A espessura das mantas de fibra de vidro de 450 g/m^2 é de 1 mm, cada; já o tecido de 600 g/m^2 tem uma espessura de 1.4 mm (MACAMP, 2020).

Também é preciso considerar o peso do gel coat, material aplicado para substituir a pintura convencional e proteger a superfície da peça contra a ação de intempéries e do meio ambiente. Neste caso, a camada de gel coat deve cobrir a superfície do molde com uma camada de 600 a 1000 g/m^2 , aplicado de uma só vez, que resulta em uma espessura de 0.3 a 0.5 mm (MACAMP, 2020). Aqui, será utilizado um valor intermediário de 800 g/m^2 e espessura de 0.4 mm.

Abaixo, estão listadas as características de peso (kg/m^2), área A da superfície recoberta por cada camada de fibra e gel coat (m^2) e espessura e da camada desses materiais (mm). Todos os valores estão representados na Tabela 26.

Tabela 26. Peso total das fibras que compõem o casco.

Material	Densidade (kg/m ²)	A(m ²)	e (mm)	Vol(m ³)	Peso Camada (kg)	Peso Resina (kg)	Peso total(kg)
Manta 450	0.45	6	1	0.006	2.7	6.75	9.45
Tecido 600	0.6	6	1,4	0.0084	3.6	9	12.6
Manta 450	0.45	6	1	0.006	2.7	6.75	9.45
Gel Coat	0.8	6	0.4	0.0024	4.8	-	4.8
			3.8	0.0198			36.3

5.6.2. Peso leve dos Equipamentos

A outra componente do peso leve, além do peso estrutural, advém dos equipamentos necessários ao funcionamento da embarcação, como o banco de baterias, as placas solares e o motor. O dimensionamento desses equipamentos e quais os modelos selecionados serão discutidos mais à frente; a princípio, os valores de pesos aqui considerados tem o intuito de construir uma curva de peso inicial, representados na Tabela 27.

Tabela 27. Peso leve dos Equipamentos.

Equipamento	Peso
Motor	10 kg
Bateria	4 x 14 kg
Placa Solar	3 x 22.7 kg

5.6.3. Curva de Pesos

A metodologia utilizada para representar a curva de pesos pode ser obtida seccionando a embarcação em 20 balizas, espaçadas igualmente de 0.3 m. Com isso, é possível delimitar um volume entre duas balizas consecutivas, onde X_i representa a baliza inicial e X_f a baliza final, e a partir disso, calcular o peso de cada uma dessas partes delimitadas.

Tabela 28. Divisão da embarcação em partes, usada na curva de pesos.

Partes	X_i (m)	X_f (m)	X_m (m)
Parte 1	0	0.3	0.15
Parte 2	0.3	0.6	0.45
Parte 3	0.6	0.9	0.75
Parte 4	0.9	1.2	1.05
Parte 5	1.2	1.5	1.35
Parte 6	1.5	1.8	1.65
Parte 7	1.8	2.1	1.95
Parte 8	2.1	2.4	2.25
Parte 9	2.4	2.7	2.55
Parte 10	2.7	3.0	2.85
Parte 11	3.0	3.3	3.15
Parte 12	3.3	3.6	3.45
Parte 13	3.6	3.9	3.75
Parte 14	3.9	4.2	4.05
Parte 15	4.2	4.5	4.35
Parte 16	4.5	4.8	4.65
Parte 17	4.8	5.1	4.95
Parte 18	5.1	5.4	5.25
Parte 19	5.4	5.7	5.55
Parte 20	5.7	6	5.85

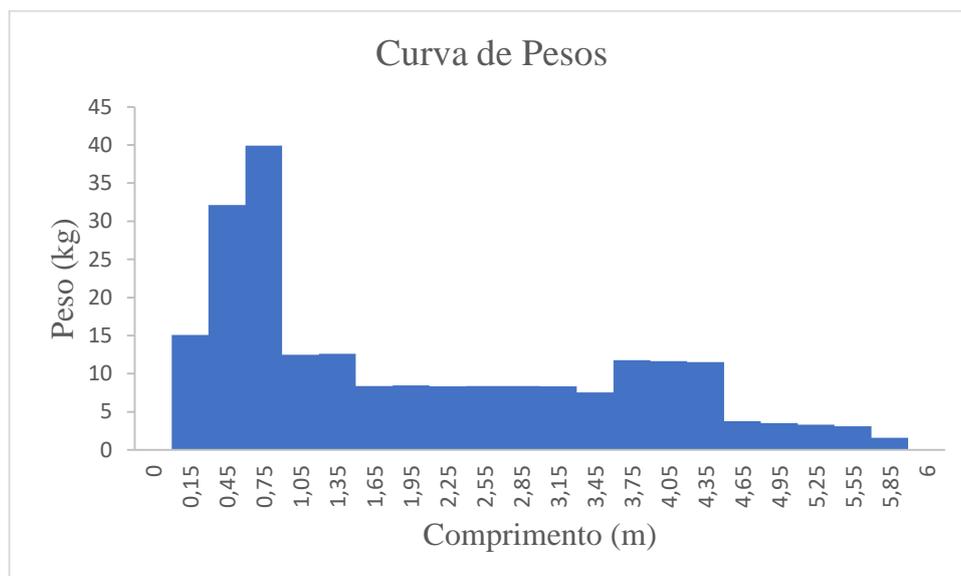
A próxima etapa é seccionar o peso leve calculado (estrutural e equipamentos) entre as partes definidas anteriormente. Primeiro, são calculados os comprimentos de cada baliza, medidos de forma a contornar todo o casco sobre a baliza. Como definido, o espaçamento entre as balizas é de 0.3m; por meio da regra do trapézio, calcula-se a área de cada Parte descrita na Tabela 28. Por fim, o volume é calculado multiplicando-se a área e a espessura do casco obtida na Tabela 26, permitindo dividir o peso leve total proporcionalmente à cada parte.

Tabela 29. Peso leve estrutural total da embarcação ao longo do comprimento.

Balizas	L (mm)	L (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)	Peso (kg)
0	822.093	0.822	0.095	0.004	-
1	882.909	0.883	0.256	0.010	2.141
2	940.062	0.940	0.273	0.010	1.668
3	990.365	0.990	0.290	0.011	1.767
4	1031.754	1.032	0.303	0.012	1851
5	1064.625	1.065	0.314	0.012	1.919
6	1090.074	1.090	0.323	0.012	1.972
7	1108.626	1.109	0.330	0.013	2.012
8	1119.877	1.120	0.334	0.013	2.039
9	1123.094	1.123	0.336	0.013	2.053
10	1117.946	1.118	0.336	0.013	2.051
11	1104.696	1.105	0.333	0.013	2.034
12	1083.862	1.084	0.328	0.012	2.003
13	1055.632	1.056	0.321	0.012	1.958
14	1020.067	1.020	0.311	0.012	1.900
15	978.39	0.978	0.300	0.011	1.829
16	930.803	0.931	0.286	0.011	1.747
17	878.364	0.878	0.271	0.010	1.656
18	821.265	0.821	0.255	0.010	1.555
19	761.875	0.762	0.237	0.009	1.449
20	0.000	0.000	0.114	0.004	0.697
TOTAL:				0.226	36.300

A curva de pesos total da embarcação pode então ser construída somando-se os pesos leves estrutural e dos equipamentos que foram seccionados para cada baliza, como pode ser visualizada abaixo.

Figura 35. Curva de peso leve total.



É importante ressaltar que a soma dos pesos leves resultou em 221 kg (Tabela 30), maior que o mínimo de 220 kg estipulado no Edital do Desafio Solar Brasil. Esse valor serve apenas como uma margem inicial, tendo em vista que ele ainda será incrementado com os componentes auxiliares, como os circuitos elétricos, estrutura de suporte do motor, assento do piloto etc.

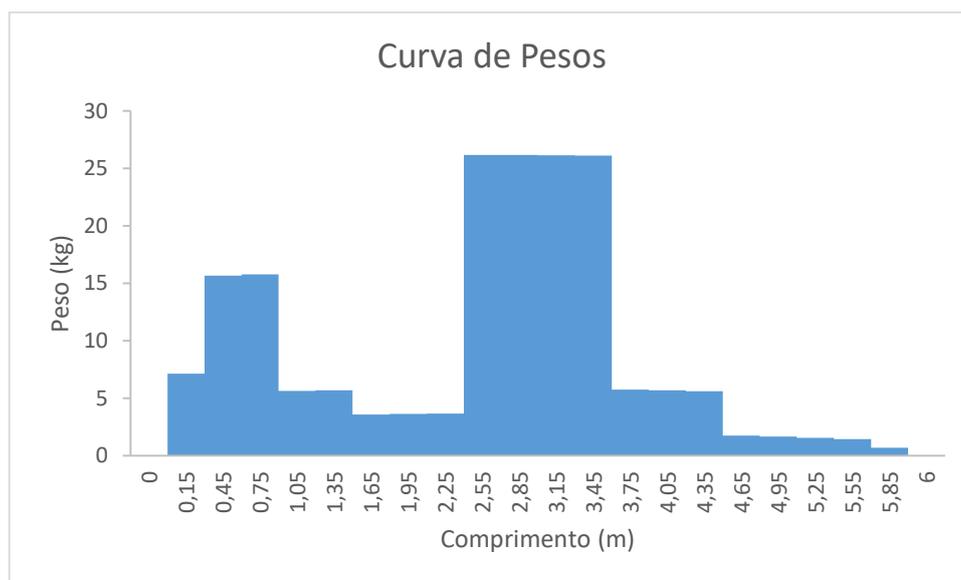
Tabela 30. Pesos considerados na soma de peso leve.

Item	Peso
Peso Leve	72.6 kg
Baterias BB	28 kg
Baterias BE	28 kg
Placa Solar 1	22.7 kg
Placa Solar 2	22.7 kg
Placa Solar 3	22.7 kg
Motor	10 kg
Reserva de Flutuação 01 BB/BE	2.7 kg
Reserva de Flutuação 02 BB/BE	4.86 kg
Reserva de Flutuação 03 BB/BE	0.6 kg
Reserva de Flutuação 04 BB/BE	3.6 kg
Reserva de Flutuação 05 BB/BE	1.8 kg
SOMA	221 kg

5.7. Resistência Estrutural

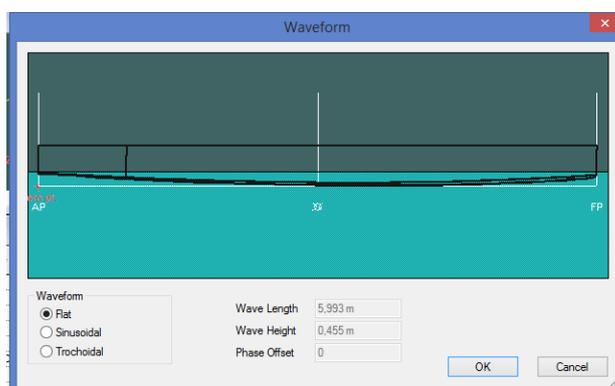
A análise de resistência estrutural foi realizada de acordo com a metodologia da viga navio, por meio do software Stability do Maxsurf. Para isso, foi utilizada apenas metade da curva de peso para cada casco. Para realizar esta análise foi inserida a curva de pesos de um dos cascos, considerando a presença do piloto, ver Figura 36.

Figura 36. Curva de pesos de um dos cascos considerando o piloto.



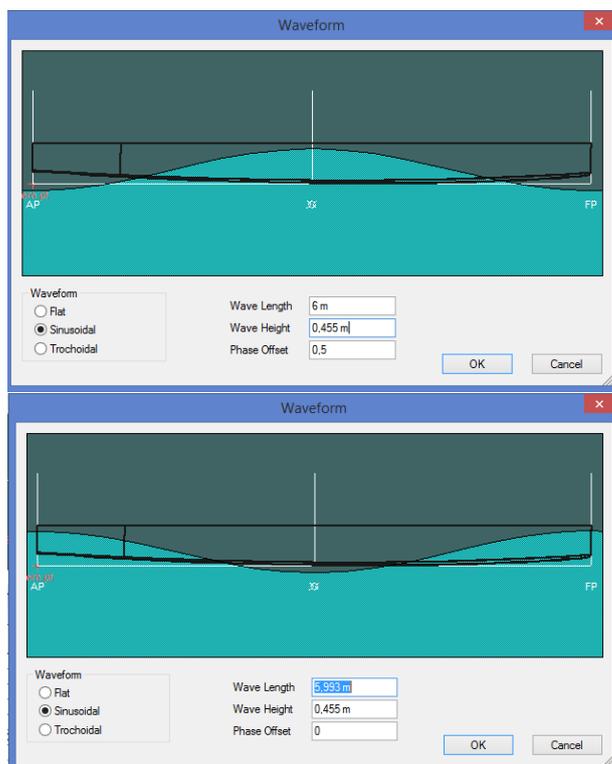
Foram consideradas três condições ambientais para avaliação por viga navio: águas calmas, alquebramento e tosamento, o valor da altura da onda a máxima considerada pelas regras do Desafio Solar Brasil (2018), e estão representadas abaixo.

Figura 37. Condições ambientais consideradas para avaliar a resistência estrutural, (a) em águas calmas, (b) condição de alquebramento e (c) condição de tosamento.



(a)

Figura 37. Condições ambientais consideradas para avaliar a resistência estrutural, (a) em águas calmas, (b) condição de alquebramento e (c) condição de tosamento.

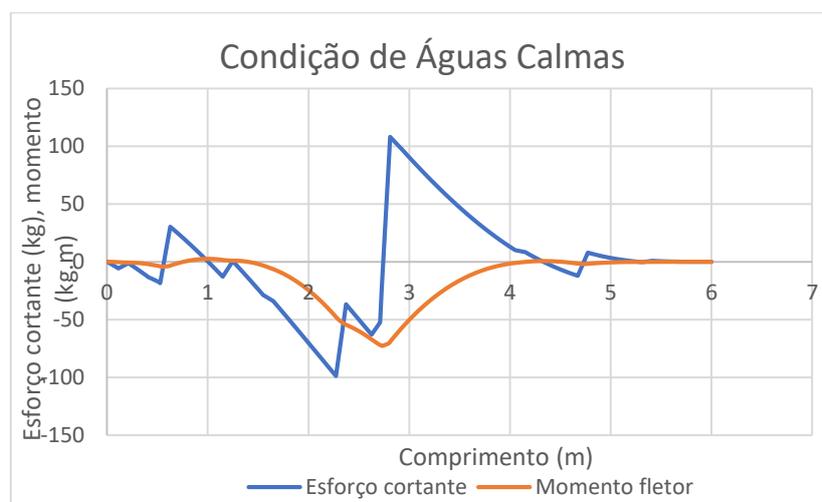


(b)

(c)

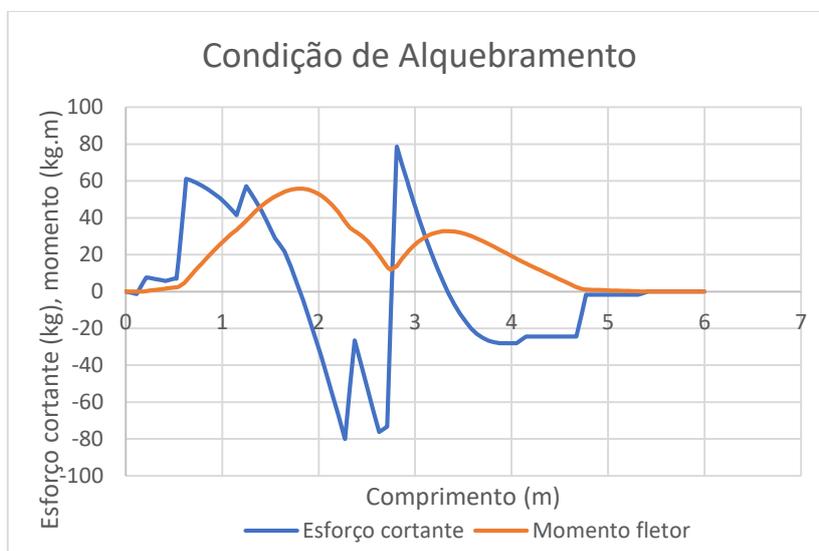
Os resultados para estas três condições ambientais são apresentados a seguir:

Figura 38. Resultados da análise da viga navio, nas condições de (a) águas calmas, (b) alquebramento e (c) tosamento.

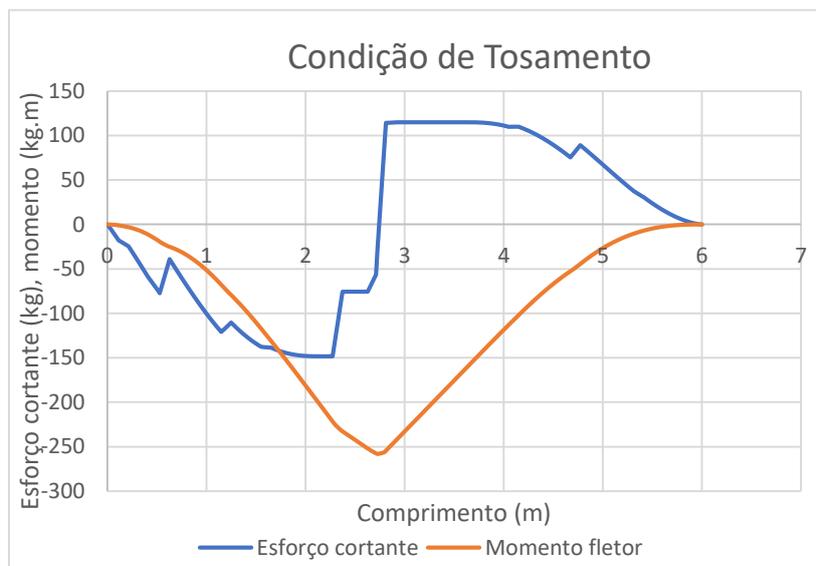


(a)

Figura 38. Resultados da análise da viga navio, nas condições de (a) águas calmas, (b) alquebramento e (c) tosamento.



(b)



(c)

Considerando o momento fletor na seção média, as tensões as quais o casco está submetido são apresentadas a seguir:

Tabela 31. Valores de momento fletor e tensão atuante nas diferentes condições de onda.

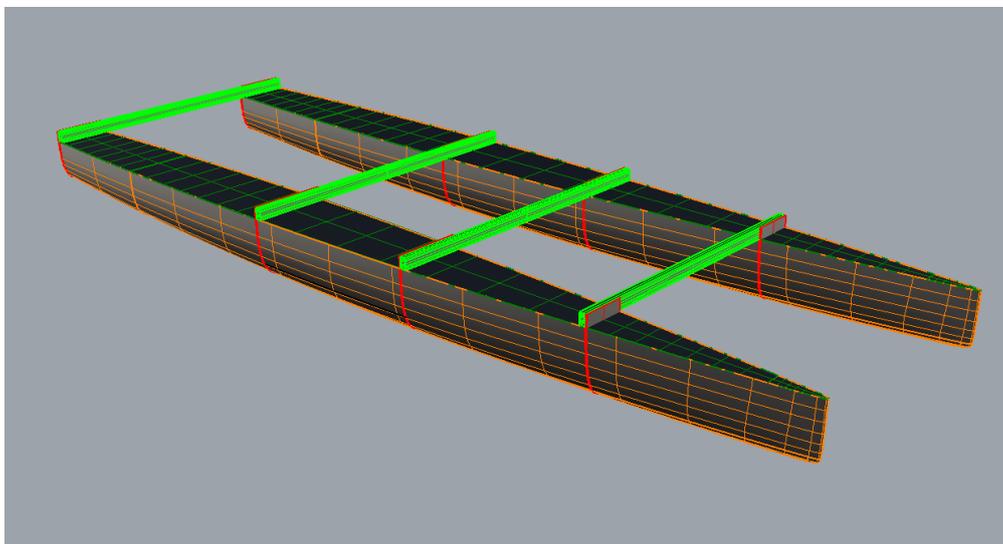
Condição	Parâmetro	Valor	Unidades
Águas Calmas	M	2.490	kg.m

Condição	Parâmetro	Valor	Unidades
	I	6.830e-05	m ⁴
	C	0.254	m
	Tensão	0.091	MPa
Alquebramento	M	56.000	kg.m
	I	6.830e-05	m ⁴
	C	0.254	m
	Tensão	2.036	MPa
Tosamento	M	-258.323	kg.m
	I	6.830e-05	m ⁴
	C	0.254	m
	Tensão	-9.424	MPa

5.8. Dimensionamento da estrutura de união transversal

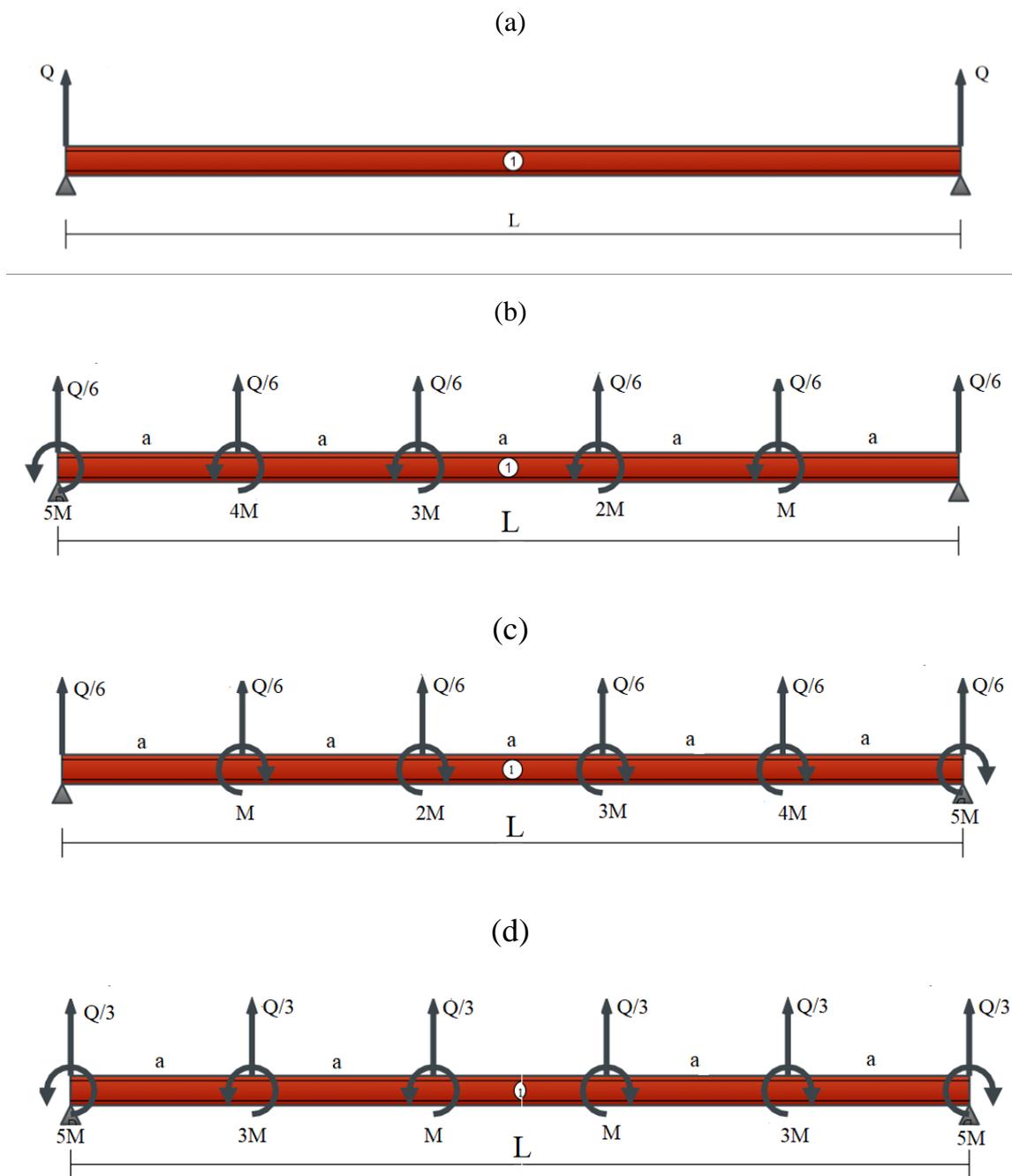
A estrutura de união transversal está formada por 4 vigas de alumínio fixas nas anteparas dos cascos, ver Figura 39.

Figura 39. Estrutura de união, destacada em verde.



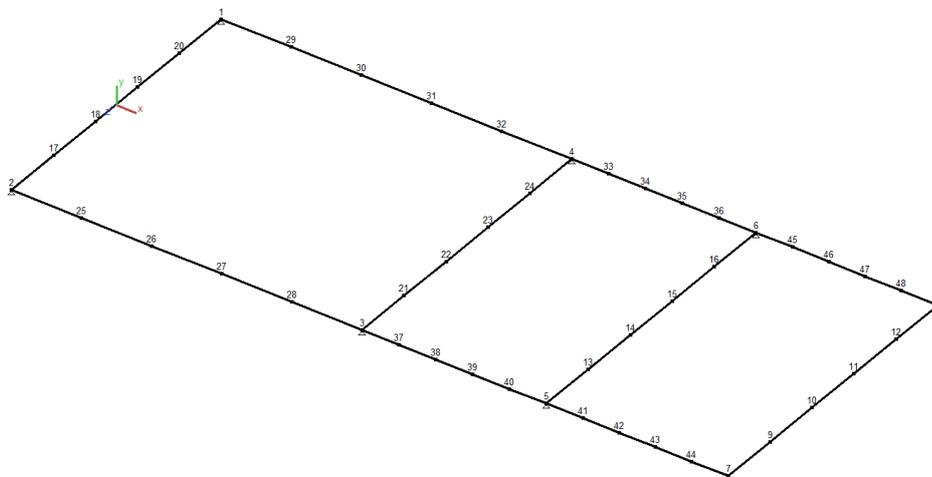
O dimensionamento da estrutura de união foi realizado utilizando os valores das forças cortantes, resultantes da metodologia da viga navio, de cada um dos cascos. Estas forças atuam na extremidade de cada viga, com o qual é possível avaliar os efeitos destas sobre cada uma das vigas. Essas forças são representadas na Figura 40.

Figura 40. Representação das forças de apoio (a) sendo decompostas em forças e momentos gerados ao longo da viga, (b) e (c), resultando na distribuição de forças e momentos mostrada na figura (d).



O modelo elementos finitos foi elaborado no software Bentley Multiframe. Cada elemento de viga que representa a estrutura transversal foi dividido em 5 partes, resultando em 6 nós para cada viga, como mostrado na Figura 41.

Figura 41. Pontos de análise para o dimensionamento da estrutura de união.



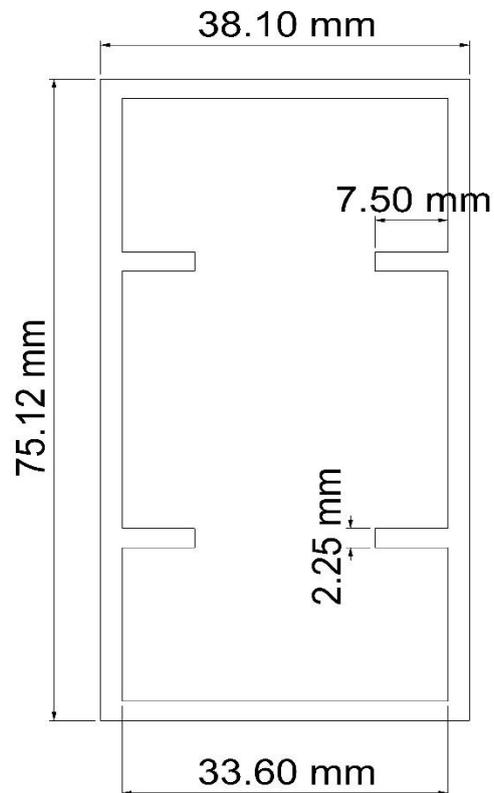
Desta forma, as forças e momentos a serem aplicados em cada viga considerando o pior cenário (neste caso, a condição de tosamento) são mostradas a seguir:

Tabela 32. Forças e momentos sobre cada viga transversal.

VIGA 1			VIGA 2			VIGA 3			VIGA 4		
Nó	M (N.m)	Q/3 (N)									
2	-3.47	-3.55	3	-242.20	-247.65	5	366.40	374.64	7	288.39	292.83
17	-2.08	-3.55	21	-145.32	-247.65	13	219.84	374.64	9	171.83	292.83
18	-0.69	-3.55	22	-48.44	-247.65	14	73.28	374.64	10	57.28	292.83
19	0.69	-3.55	23	4844	-247.65	15	-73.28	374.64	11	-57.28	292.83
20	2.08	-3.55	24	145.32	-247.65	16	-219.84	374.64	12	-171.83	292.83
1	3.47	-3.55	4	242.20	-247.65	6	-366.40	374.64	8	-288.39	292.83

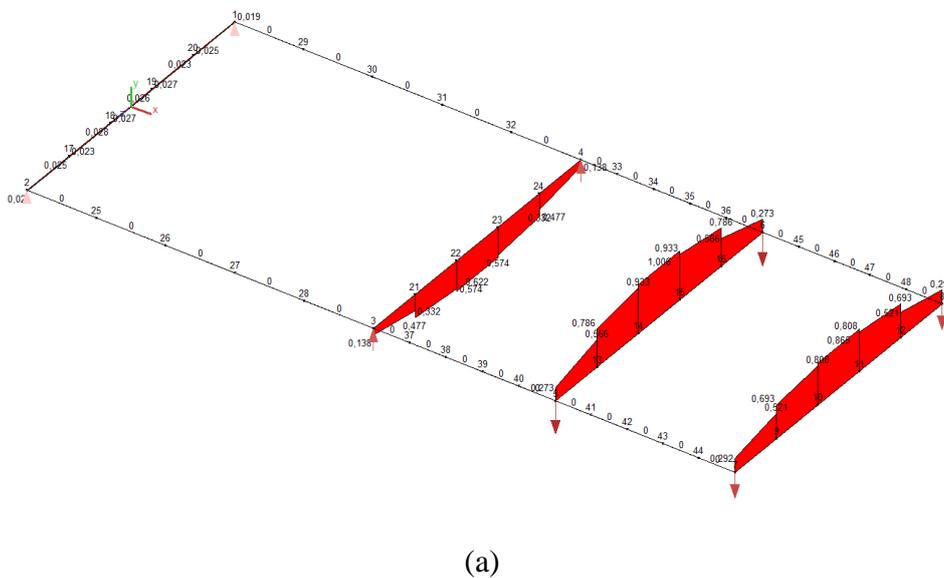
O perfil do reforço que atendeu a todas as cargas tem as dimensões da seção transversal mostradas na Figura 42.

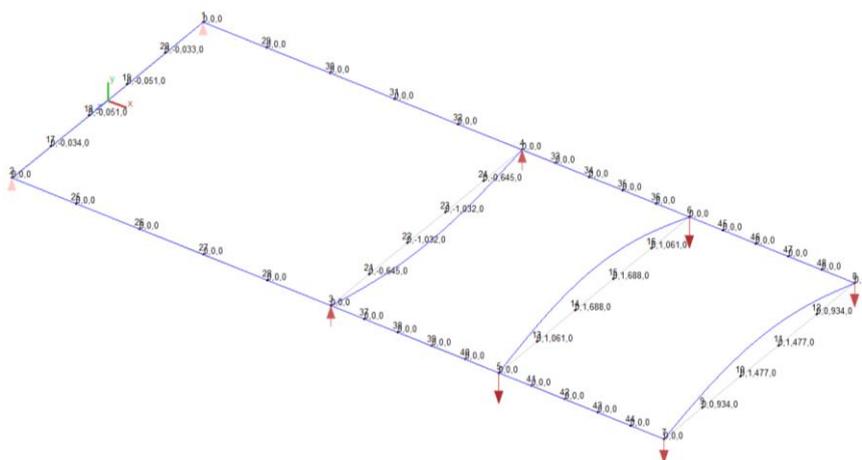
Figura 42. Dimensões da seção transversal da viga utilizada.



Calculando o momento de inércia da viga acima, obtemos o valor de $I = 1.21 \text{ E}+06 \text{ mm}^4$. Os resultados da análise de elementos finitos encontram-se na Figura 43.

Figura 43. Resultados da análise de elementos finitos, sendo (a) o momento fletor e (b) a deflexão total.





(b)

Considerando que a flecha máxima em vigas bi-apoiadas deve ser relacionada ao seu comprimento pela relação $\delta = L/350$, e neste caso, $\delta_{\text{máx}} = 5.589$ mm. De acordo com a análise de elementos finitos, a deflexão máxima observada em qualquer uma das vigas foi de 1.688mm e, portanto, apresenta um valor adequado. Quanto à tensão de flexão máxima sofrida pela estrutura, obtemos a partir do momento de inércia de $I = 1.21 \text{ E}+06 \text{ mm}^4$ um valor de tensão máxima de aproximadamente 31.4 MPa, bem abaixo do limite de escoamento de 250 MPa para o aço A-36, material utilizado na construção da estrutura de união (HIBBELER, 2010).

5.9. Dimensionamento Estrutural

Por meio das regras da classificadora ABS para embarcações de alta velocidade (*High Speed Craft*), foram dimensionados os componentes que oferecem a resistência estrutural necessária à embarcação. Este dimensionamento se baseia em diversas formulações, representadas na Seção 4.6, que por sua vez utilizam parâmetros definidos tanto no projeto, como o espaçamento entre reforçadores e anteparas, como coeficientes dados pela própria classificadora (ABS, 2020).

Como citado anteriormente, é preciso calcular inicialmente as pressões de projeto atuantes no fundo e no costado para que então possa ser dimensionado as espessuras do laminado e das anteparas e os módulos de seção dos reforços longitudinais nessas regiões. De acordo com as Equações (61), (62) e, obteve-se as seguintes pressões:

Tabela 33. Pressões hidrostáticas de projeto atuantes no fundo e costado.

Pressão hidrostática	Valores
P_d (fundo)	25.03 kN/m ²
P_s (costado)	14.65 kN/m ²

Pressão hidrostática	Valores
P_c (convés)	29.196 kN/m ²

5.9.1. Espessura do laminado do casco

De acordo com a Equação (64) dada pela ABS, a espessura mínima do laminado e os parâmetros necessários para o cálculo são dados na tabela a seguir. A tensão de escoamento do material foi obtida por meio de um ensaio de tração, representada no Anexo B.

Tabela 34. Espessura mínima do laminado do casco.

Parâmetro	Valores
S	109 mm
C	0.7
P_d	25.03 kN/m ²
K	0.5
σ_a	129.5 MPa
T	1.5 mm

No projeto, foi considerada uma combinação de duas camadas de mantas de vidro de 1mm cada e uma de tecido de fibra de vidro de 1.4mm; com isso, a espessura obtida foi de 3.4mm, o que obedece à espessura mínima encontrada na Tabela 34.

5.9.2. Espessura das anteparas

Como descrito na metodologia, a espessura mínima das anteparas também se dá pela Equação (64), utilizando os parâmetros relativos às anteparas. Abaixo, estão listados os valores encontrados que compõem o cálculo da espessura mínima.

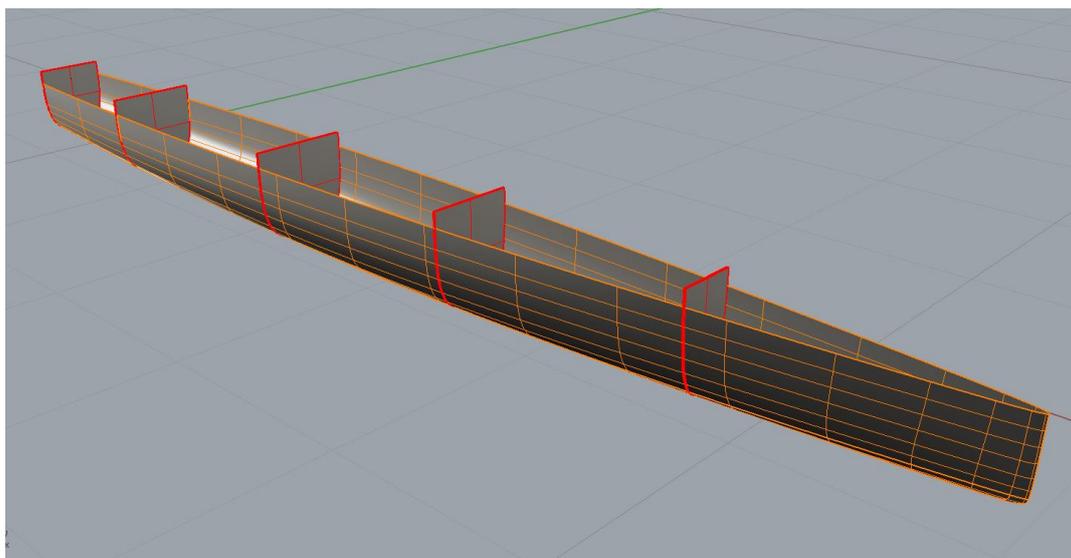
Tabela 35. Espessura mínima das anteparas.

Parâmetro	Valores
S	1300 mm
C	0.7
P_d	25.03 kN/m ²
K	0.5
σ_a	129.5 MPa

Parâmetro	Valores
T	8.9 mm

A espessura das anteparas aplicada ao projeto foi de 10mm, respeitando o valor mínimo da Tabela 35. Abaixo, temos uma representação da disposição das anteparas na embarcação.

Figura 44. Representação das anteparas, formando os compartimentos da embarcação.



5.9.3. Módulo de seção dos reforços

➤ Reforços longitudinais de fundo

Para definir o módulo de seção mínimo dos reforços longitudinais de fundo, utilizou-se a Equação (65) com os devidos parâmetros relacionados à região do fundo, como pressão de projeto e espaçamento dos reforços. É importante ressaltar que, de acordo com a ABS, a tensão aplicada nesse cálculo (*High Speed Craft*, 3-2-4/1.3.1 TABELA 1) é considerada como sendo 40% da tensão real de escoamento do material, tanto para o fundo quanto para o costado (ABS, 2020). A Tabela 36 resume os resultados desse cálculo.

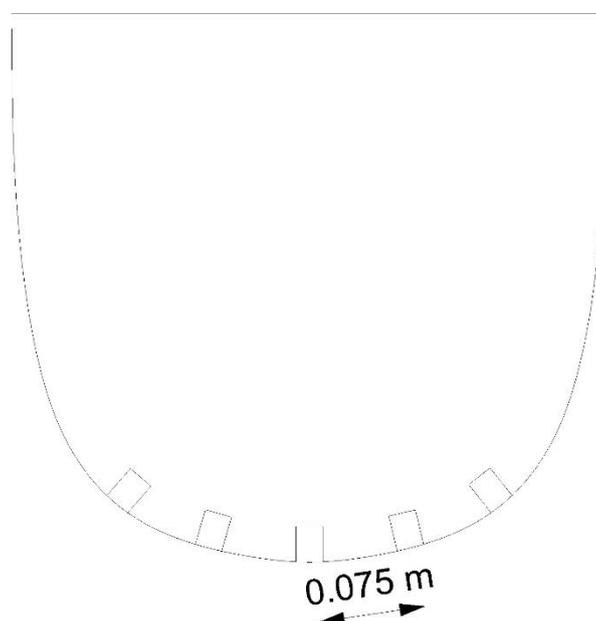
Tabela 36. Módulo de seção mínimo dos reforços longitudinais de fundo.

Parâmetro	Valores
P	25.03 kN/m ²
S	0.075 m
L	1 m

Parâmetro	Valores
σ_a	51.8 MPa
SM	3.019 cm ³

De acordo com o que foi dito na seção 4.6, serão necessários cinco reforços longitudinais de fundo com o módulo de seção mínimo obtido anteriormente, distribuídos da seguinte forma:

Figura 45. Reforços longitudinais de fundo, dispostos na seção mestra.



➤ Reforços longitudinais de costado

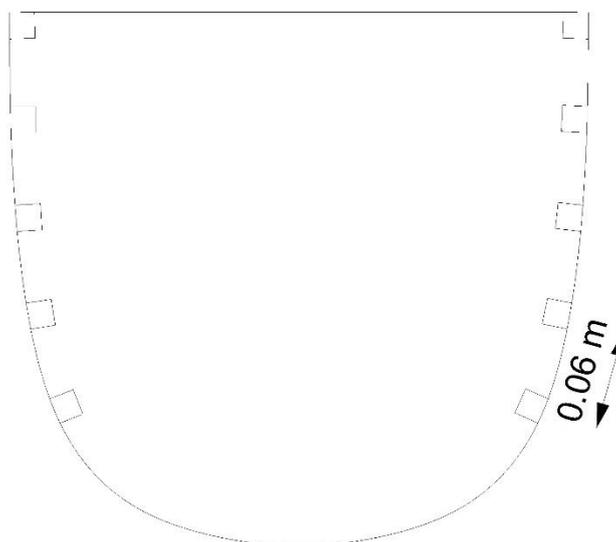
Similarmente aos reforços de fundo, foi calculado o módulo de seção mínimo para os reforços longitudinais de costado, por meio da Equação (65) e com os parâmetros referentes à região, obtendo-se os resultados apresentados a seguir:

Tabela 37. Módulo de seção mínimo dos reforços longitudinais de costado.

Parâmetro	Valores
P	14.65 kN/m ²
S	0.06 m
L	1 m
σ_a	51.8 MPa
SM	1.41 cm ³

De forma similar aos reforços de fundo, foi mencionado na metodologia que cada bordo do casco teria cinco reforços, totalizando então dez reforços longitudinais de costado (Figura 46):

Figura 46. Reforços longitudinais de costado, dispostos na seção mestra.



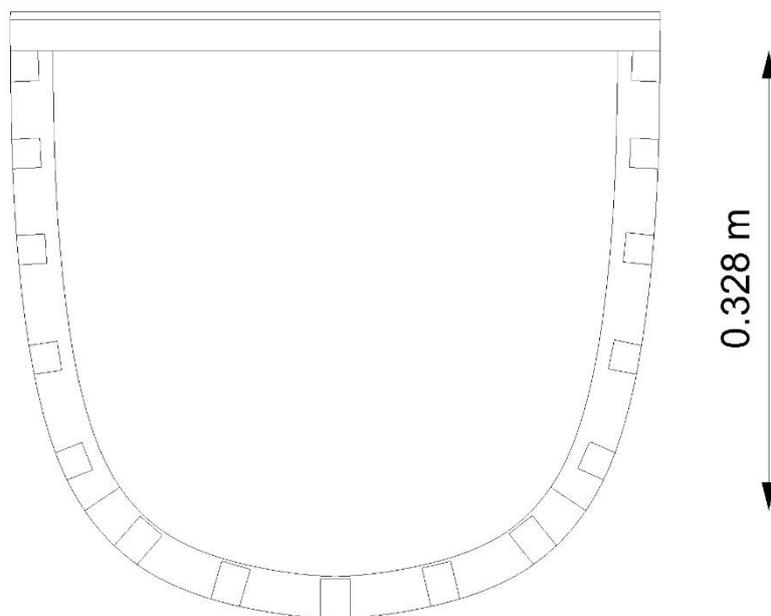
➤ Cavernas

As cavernas seguem a mesma lógica de cálculo que os reforços longitudinais, tendo como distinção o espaçamento entre as estruturas. O módulo de seção mínimo das cavernas resultou então nos seguintes termos:

Tabela 38. Módulo de seção das cavernas.

Parâmetro	Valores
P	25.03 kN/m ²
S	1 m
l	0.328 m
σ_a	51.8 MPa
SM	4.33 cm ³

Figura 47. Dimensão das cavernas, representada na seção mestra.



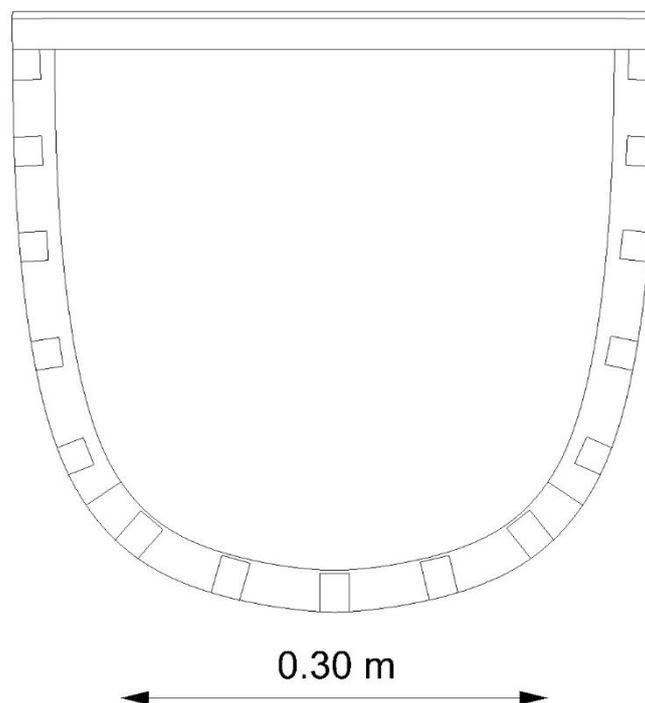
➤ **Hastilhas**

O cálculo do módulo de seção mínimo das hastilhas resultou nos seguintes parâmetros:

Tabela 39. Módulo de seção das hastilhas.

Parâmetro	Valores
P	25.03 kN/m ²
S	1 m
L	0.3 m
σ_a	51.8 MPa
SM	3.622 cm ³

Figura 48. Dimensão das hastilhas, representada na seção mestra.



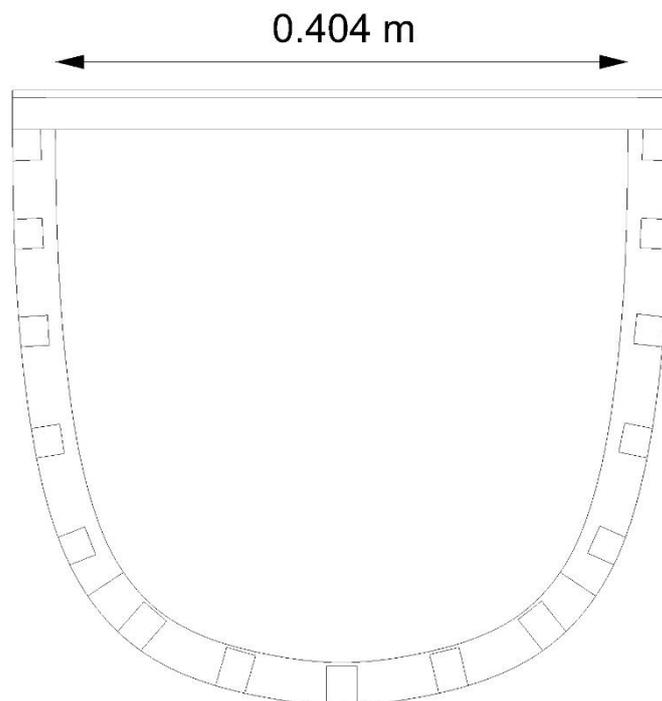
➤ **Vão**

Já o módulo de seção mínimo do vão utiliza a pressão do convés definida pela Equação (63) e como resultado, foram encontrados os parâmetros que são representados na tabela a seguir:

Tabela 40. Módulo de seção do vão.

Parâmetro	Valores
P	29.196 kN/m ²
S	1 m
L	0.404 m
σ_a	51.8 MPa
SM	7.663 cm ³

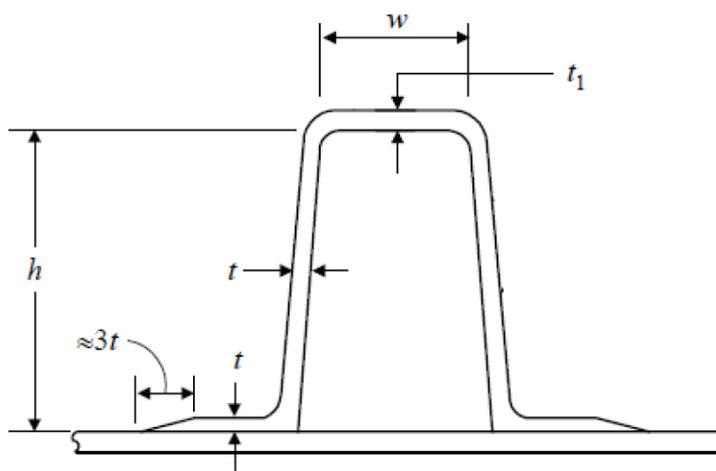
Figura 49. Dimensão do vão, representado na seção mestra.



➤ **Módulo de seção dos reforços utilizados**

Com os módulos de seção mínimos determinados, é possível definir as dimensões dos reforços de acordo com a ABS. A metodologia é a seguinte: partindo de uma espessura especificada, é calculado a altura e largura do reforço, permitindo encontrar o módulo de seção; caso seja menor que o valor mínimo obtido anteriormente ou o reforço fique superdimensionado, se faz necessária uma modificação para otimizar as suas dimensões (RORIZ, 2018).

Figura 50. Representação das dimensões do reforço.



Fonte: (RORIZ apud ABS, 2017).

Onde:

- $w = 20 t_1$, largura do reforço;
- $h = 30 t$, altura do reforço;
- t = espessura do laminado do reforço.

Os módulos de seção mínimos calculados para os reforços longitudinais de fundo e costado obtiveram valores bem próximos; por esse motivo, os reforços possuem dimensões igualmente aproximadas. Um ponto importante a ser ressaltado é que, por conta de a boca da embarcação ser relativamente pequena, as relações de largura e altura do reforço dadas pela classificadora foram modificadas, mas de forma que os reforços finais tenham um módulo de seção maior que os valores mínimos dados anteriormente.

Por ser um processo iterativo, foram testadas algumas espessuras e o valor mais adequado foi de 3 mm que, após o desenvolvimento dos cálculos, resultou em um módulo de seção de 3.140 cm^3 para os reforços de fundo e 1.835 cm^3 para os reforços de costado, de forma que ambos oferecem módulos de seção maiores que os encontrados nas seções anteriores. Nas Figura 51 e Figura 52, é possível ver as dimensões dos reforços aplicados na embarcação.

Figura 51. Dimensões do reforço longitudinal de fundo.

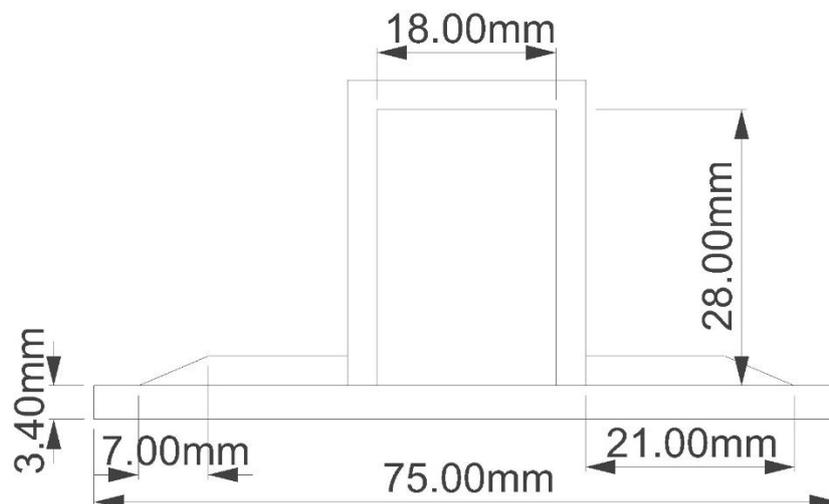
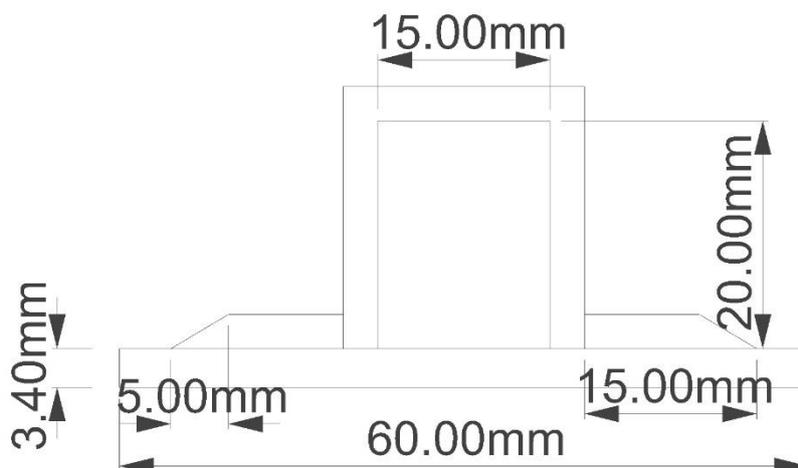


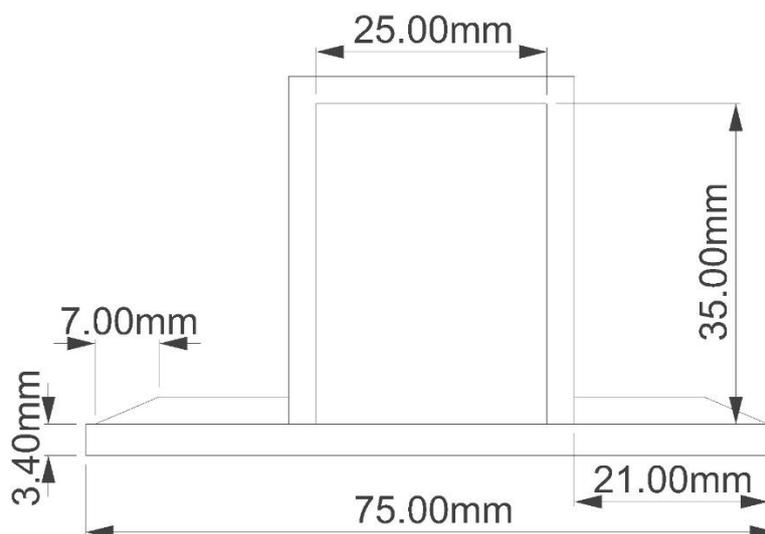
Figura 52. Dimensões do reforço longitudinal de costado.



➤ **Módulo de seção da caverna utilizada**

No caso das cavernas, o reforço utilizado apresenta a mesma configuração da Figura 50, porém a diferença entre esse e os reforços longitudinais está na altura que, no caso das cavernas, chega a ser até duas vezes maior. O módulo de seção então foi calculado, obtendo-se um valor de 4.676 cm^3 , respeitando com segurança o módulo mínimo encontrado. As dimensões da caverna são apresentadas na Figura 53.

Figura 53. Dimensões da caverna.



➤ **Módulo de seção da seção mestra**

Em posse dos dimensionamentos executados, faz-se necessário agora a verificação do módulo de seção mestra resultante que, quando comparado com o módulo

calculado pela Equação (66), precisa apresentar um valor superior, o que configura um dimensionamento estrutural adequado.

O módulo de seção da seção mestra é calculado pela Equação (66) e os valores adotados pelas variáveis e o módulo final estão apresentados na Tabela 41.

Tabela 41. Valores relacionados ao cálculo do módulo de seção da seção mestra, de acordo com a ABS.

Parâmetro	Valores
C_1	4.014
C_2	0.01
L	6 m
B	2.1 m
V	7.97 nós
C_b	0.423
K_3	1.1136
C	0.8
Q	4.12 mm ² /N
SM	1288 cm ³

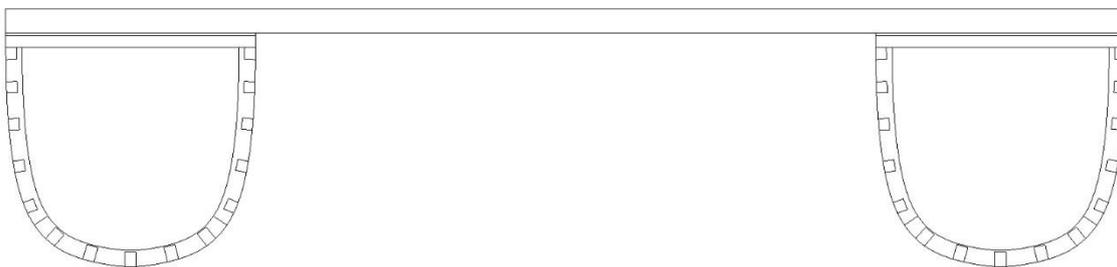
Realizando-se os cálculos com os reforços longitudinais dimensionados, foi possível encontrar os valores do módulo de seção da seção mestra final assim como os parâmetros necessários para a sua definição, como a altura da linha neutra e o momento de inércia total. Esses valores se encontram na Tabela 42.

Tabela 42. Valores relacionados ao cálculo do módulo de seção da seção mestra real.

Parâmetro	Valores
Altura Total	42.75 cm
Altura da Linha Neutra	23.36 cm
Momento de inércia I_z	1.178.764,2 cm ⁴
SM_{Real}	50460.8 cm ³

Tendo em vista que o módulo de seção encontrado é muito maior que o determinado pela norma da ABS, mostra-se que a embarcação está bem dimensionada.

Figura 54. Representação da seção mestra, com os reforços longitudinais e a estrutura de união dispostos.



5.10. Resistência ao Avanço

Para o cálculo da resistência ao avanço, foi feita a utilização da metodologia analítica do navio esbelto do módulo *Resistance* do software *Maxsurf* (Tuck et al (1999); Courser et al (1996)). Este método é preferível aos métodos empíricos na aplicação para multicascos, pois calcula analiticamente a resistência de onda para um casco simétrico bombordo/boreste, adicionando as componentes de resistência viscosa e friccional. O fator de esbeltez igual à 12 e um número de Froude de aproximadamente 0.5 permitem que esse método seja aplicado de maneira adequada ao catamarã em questão.

Com isso, foi possível calcular a resistência do casco para uma determinada velocidade de avanço, bem como a potência, representados na Tabela 43.

Tabela 43. Velocidade, Resistência ao Avanço e Potência.

Velocidade (m/s)	Resistência (N)	EHP (W)
0	0	0
0.75	6.93	5.2
1.5	24.25	36.38
2.25	53.06	119.38
3	110.38	331.13
3.75	180.37	676.38
4.5	235.97	1061.85
5.25	299.8	1573.92
6	374.44	2246.65
6.75	458.31	3093.61
7.5	550.45	4128.38
8.25	650.03	5362.77

Velocidade (m/s)	Resistência (N)	EHP (W)
9	756.25	6806.25
9.75	868.77	8470.49
10.5	989.12	10385.71
11.25	1114.67	12539.99
12	1248.58	14982.99

Com esses dados, foram construídos os gráficos de velocidade *versus* resistência (Figura 55) e velocidade *versus* potência (Figura 56).

Figura 55. Gráfico da velocidade vs. Resistência.

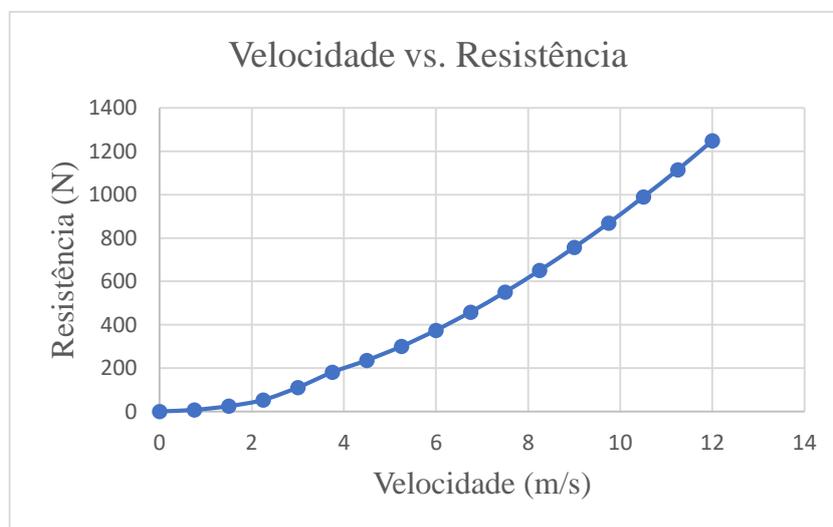
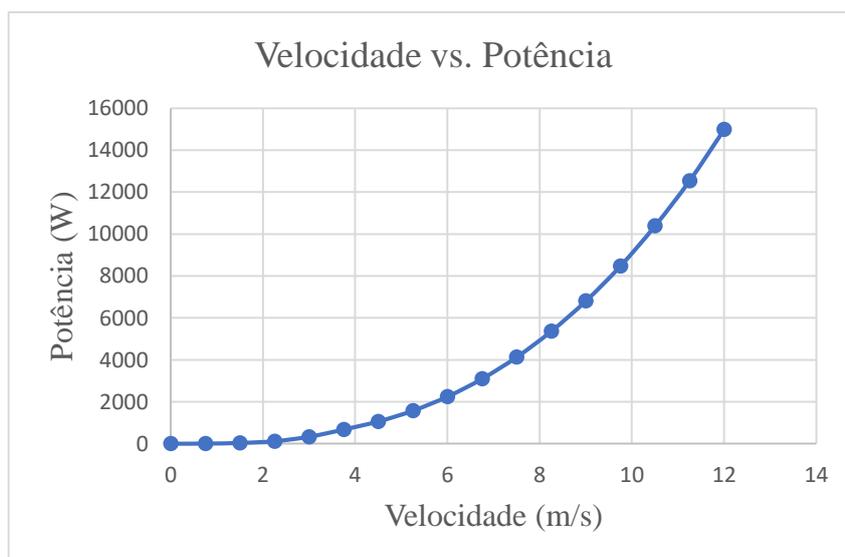


Figura 56. Gráfico da velocidade vs. Potência.



5.11. Sistema Propulsivo

Para a escolha do propulsor, foi utilizada a Série Wageningen através dos polinômios das Equações (58) e (59), que por sua vez fazem uso dos coeficientes descritos no Anexo A (MOLLAND, 2011). O propulsor é considerado ideal quando apresenta a maior eficiência propulsiva, dada pela Equação (70), e que fornece um empuxo maior que a resistência ao avanço. O diâmetro, passo/diâmetro, número de pás, razão de áreas e coeficiente de avanço foram variados de acordo com os limites da Tabela 10, buscando maximizar a eficiência do propulsor. Esse processo iterativo foi feito por meio da ferramenta Solver, do Libre Office.

$$\eta_o = \frac{K_T J}{2\pi K_Q} \quad (70)$$

É importante lembrar que nesse tipo de processo é preciso estabelecer algumas variáveis importantes, como a rotação nominal do motor e velocidade de avanço, bem como as eficiências rotativa relativa, do motor e do casco. A Tabela 44 mostra os dados do motor utilizado.

Tabela 44. Características do motor Watt&Sea 1.4kW.

Característica	Tipo/Valores
Tipo	BLDC
Voltagem Nominal DC	36V
Corrente Nominal DC	40A
KE	8.5 Vac/kRPM
KI	0.14 Nm/A
Torque Nominal	6 Nm
Velocidade Nominal	2000 RPM
RPM máximo (sem carga)	3000 RPM
BHP _{motor}	1256.6 W

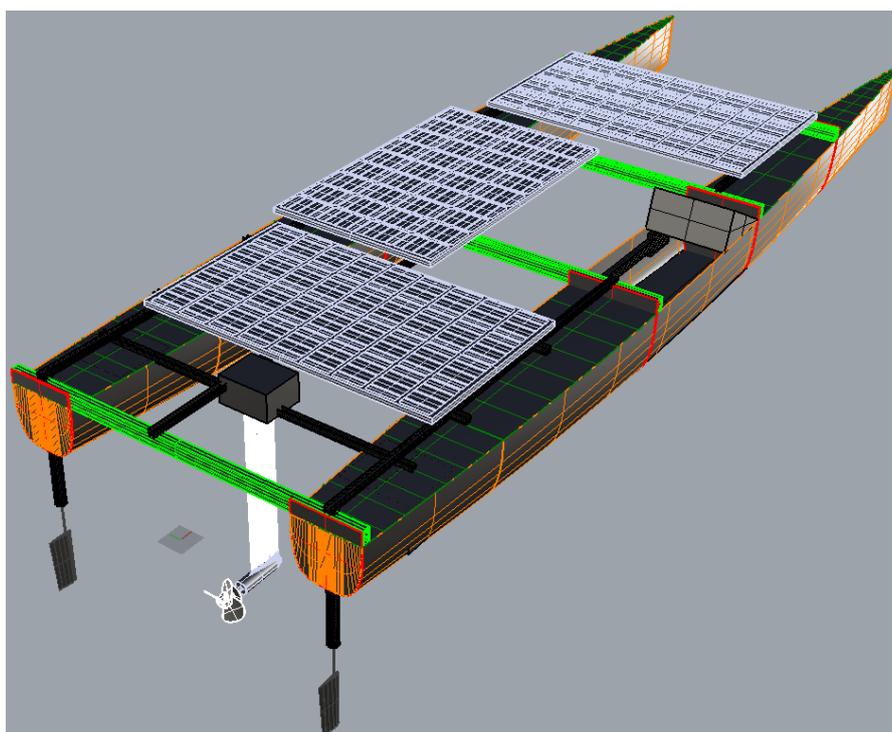
Na Tabela 45, estão listados todos os parâmetros aplicados nesse dimensionamento.

Tabela 45. Parâmetros de entrada no dimensionamento do propulsor.

Parâmetro	Valores
Velocidade de Avanço	4.1 m/s (7.97 nós)
Resistência da Embarcação	206.57 N
Coefficiente de Dedução de Empuxo	0.1803
Coefficiente de Esteira	0.2615
Eficiência rotativa relativa	1.1
Eficiência do motor	0.98
Eficiência do casco	1.11

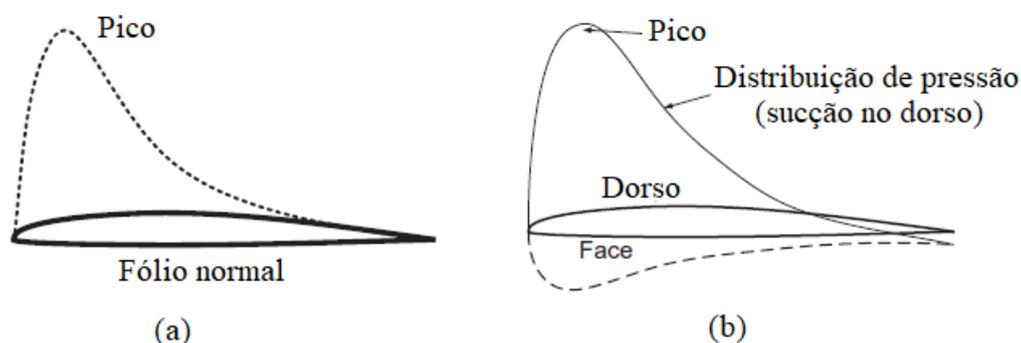
A posição aproximada do motor está apresentada na Figura 57.

Figura 57. Representação aproximada da posição do motor.



Outro fator importante a ser levado em conta é a cavitação. Esse fenômeno ocorre quando a pressão local do fluido diminui e se aproxima da pressão de vapor da água, que depende da temperatura e da composição. A cavitação pode trazer efeitos indesejados como por exemplo erosão das pás devido ao colapso de bolhas, ruídos e vibrações que podem levar à fratura (MOLLAND, 2011).

Figura 58. (a) Distribuição de pressão normal em um fólio e (b) distribuição de pressão com a ocorrência de cavitação.



Fonte: Adaptado de (MOLLAND, 2011).

$$\frac{A_E}{A_0} = \frac{(1.3+0.3*Z)T}{(p_0+P_V)D^2} + 0.2 \quad (71)$$

A equação (71) é conhecida como critério de Keller para cavitação. Ela fornece a razão de áreas mínima que um propulsor precisa ter para que não apresente cavitação. Os termos p_0 e P_V são a pressão estática no eixo e a pressão de vapor d'água, respectivamente. A razão de áreas encontrada pelo critério de Keller foi de aproximadamente 0.307, enquanto a calculada foi de 0.4, respeitando então o valor mínimo para cavitação.

Tabela 46. Características do propulsor dimensionado.

Parâmetro	Valores
D	0.2145 m
Ae/Ao	0,4
Z	2
P/D	0.6471
J	0.4238
K_T	0.1071
K_Q	0.012
η_o	0.608
BHP _{hélice}	1165.71 W
T	251.99 N
Q	6 N.m

5.12. Sistema de Geração de Energia

O sistema de geração de energia foi dimensionado de acordo com a metodologia de Tamunodukobipi et al. (2018), descrita na seção 1. Inicialmente, foi calculada a capacidade total do banco de baterias, definindo por quantas baterias vai estar composto o banco e qual a amperagem de cada uma delas. Em seguida, é calculado o número necessário de módulos fotovoltaicos para suprir o consumo de energia da embarcação.

5.12.1. Seleção do banco de baterias

O banco de baterias é mensurado de acordo com a potência do motor, tempo de autonomia do armazenamento e profundidade de descarga da bateria. A potência do motor, como mostrada na seção 5.11, é de aproximadamente 1250 W; o tempo de autonomia foi considerado como um dia, e o valor mais comum para a profundidade de descarga é de 80%. Estima-se que as baterias terão um tempo de uso de 2:45 horas por dia, com base nos maiores tempos de prova das equipes em edições passadas da competição. Portanto, a capacidade estimada do banco de baterias foi computada, de acordo com a Equação (47), como

$$E_{est} = 1.25 \text{ kW} * 2.666 * 1 = 3.35 \text{ kW.h}$$

Considerando a profundidade de descarga da bateria, essa capacidade passa a ser

$$E_{seg} = \frac{E_{est}}{PDD} = \frac{3.35 \text{ kW.h}}{0.8} = 4.2 \text{ kW.h}$$

Por fim, pôde ser calculada a capacidade total do banco de baterias, dividindo a capacidade segura E_{seg} pela voltagem CC nominal das baterias utilizadas. Como as baterias funcionam em uma voltagem de 12 V, temos que

$$C_{tb} = \frac{4.2 \text{ kW.h} * 1000}{12} = 348.8 \text{ A.h}$$

Desta forma, considerando a capacidade total em ampères-hora, o banco de baterias pode ser composto por 4 baterias em série de 90 Ah cada. A bateria escolhida foi a bateria estacionária Heliar Freedom DF1500, com capacidade de 93 Ah. As demais especificações técnicas encontram-se no Anexo D.

Figura 59. Bateria Estacionária Heliar Freedom DF1500.



Fonte: (NEOSOLAR, 2021).

É importante ressaltar que, com a utilização das quatro baterias no banco, a capacidade total é menor que 1.5 kWh, obedecendo o edital da competição.

5.12.2. Seleção dos módulos fotovoltaicos

Seguindo o dimensionamento das baterias, é possível calcular o número de módulos fotovoltaicos e qual a potência disponível de cada um deles, de tal forma que obedeça ao limite da competição de 1040 W de potência instalada. O primeiro passo foi calcular a demanda diária média de energia a partir da Equação (52), usando as eficiências do inversor e controlador de carga selecionados mais à frente. O resultado foi o seguinte:

$$E_{dr} = \frac{3.35 \text{ kW.h}}{0.9 * 0.9 * 0.9} = 4.59 \text{ kW.dia}$$

Para calcular a potência de pico média, foi preciso antes verificar o número médio de horas de sol no local. O Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB, 2020) fornece, a partir das coordenadas geográficas, os dados de irradiação solar média do local ao longo do ano (Figura 60). Como a competição ocorre entre os meses de setembro e fevereiro, foi feita uma média dos valores de irradiação indicados nesses meses, chegando a um tempo de sol de aproximadamente 6 horas.

Figura 60. Irradiação solar diária média no local da competição, ao longo do ano.

Irradiação solar diária média [kWh/m ² .dia]																
Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
22,701° S	41,849° O	6,1	6,50	6,76	5,37	4,75	3,80	3,50	3,57	4,49	4,73	5,37	5,48	6,31	5,05	3,26
22,801° S	41,849° O	6,9	6,50	6,78	5,38	4,74	3,79	3,45	3,54	4,46	4,74	5,44	5,57	6,39	5,06	3,33
22,701° S	41,949° O	8,6	6,40	6,62	5,23	4,61	3,73	3,45	3,49	4,38	4,63	5,25	5,31	6,15	4,94	3,18

Fonte: (CRESESB, 2020).

Portanto, a potência de pico média diária pôde ser obtida da seguinte maneira:

$$P_{méd,pico} = \frac{4.59}{6} * 1000 = 765.54 \text{ W/dia}$$

A corrente total do sistema foi o próximo parâmetro calculado de modo a definir o número total de módulos fotovoltaicos. Para tanto, utilizou-se a Equação (54), cujas variáveis são a potência de pico média anteriormente encontrada e a voltagem total do sistema, que é de 36 V, voltagem essa definida pelo motor utilizado:

$$I_{CC} = \frac{765.54}{36} = 21.27 \text{ A}$$

Abaixo, encontram-se algumas características importantes do painel solar selecionado para o projeto.

Tabela 47. Dados do módulo fotovoltaico.

Parâmetro	Valores
Potência máxima	335 W
Voltagem em Aberto	45.6 V
Voltagem operacional ótima	37.3 V
Corrente de Curto Circuito	9.33 A
Corrente operacional ótima	8.85 A
Dimensões do Painel	1956 x 992 x 40 mm

Fonte: (NEOSOLAR, 2020).

Finalmente, o número de módulos totais pôde ser mensurado, de acordo com o número de módulos em série (N_{ms}) e em paralelo (N_{mp}), dados pelas Equações (55) e (56), que fazem uso de alguns dados da Tabela 47, como a voltagem e corrente operacional ótima:

$$N_{ms} = \frac{36}{37.3} = 0.97$$

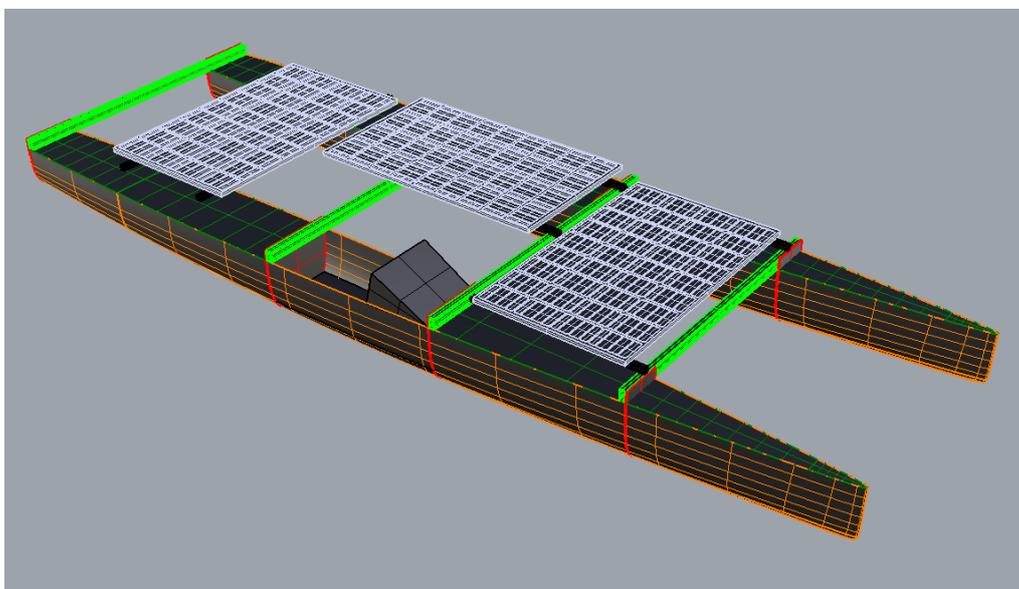
$$N_{mp} = \frac{19.05}{8.85} = 2.40$$

Portanto, o número de módulos fotovoltaicos totais é dado pela multiplicação dos módulos em paralelo e em série, resultando em

$$N_m = 0.97 * 2.40 = 2.32$$

Como esse número não pode ser decimal, o próximo valor inteiro seria 3; logo, neste projeto, faz-se necessária a utilização de 3 módulos fotovoltaicos de 335 W, fornecendo uma potência instalada total de 1005 W, ou seja, dentro dos limites do Desafio Solar Brasil. A distribuição dos painéis é mostrada na figura a seguir.

Figura 61. Arranjo dos painéis fotovoltaicos.



5.12.3. Seleção do inversor e controlador de carga

Além das baterias e dos painéis fotovoltaicos, o controlador de carga e o inversor são componentes essenciais para o funcionamento correto do sistema de geração de energia.

Para o controlador de carga, foi escolhido o modelo MPPT 20A XTRA 2010N, da marca Epever (Figura 62). Esse equipamento funciona como um regulador de tensão para o sistema de energia solar fotovoltaico, reduzindo a tensão do arranjo de painel solar para o mesmo nível de tensão de operação da bateria estacionária (12Vcc ou 24Vcc com detecção automática). Ele ainda possui a função de compensação da temperatura,

garantindo o carregamento seguro da bateria solar, prolongando sua vida útil e otimizando o desempenho (NEOSOLAR, 2020).

Figura 62. Controlador de carga MPPT 20A XTRA 2010N, da Epever.



Fonte: (NEOSOLAR, 2021).

Já como inversor, o modelo selecionado foi o inversor senoidal 350W 12/220V Ipower IP350-12, da marca Epever (Figura 63). Ele é equipado com proteções eletrônicas e ventoinha interna para evitar superaquecimento e permite limitar a potência de saída garantindo segurança ao sistema fotovoltaico. O inversor consegue converter 12Vcc de tensão de entrada em 220/230Vca, fornecendo uma potência contínua de 280W e suportando até 750W de surto (NEOSOLAR, 2020).

Seu formato de onda é o senoidal pura, ou seja, a conversão da corrente contínua para corrente alternada produz um formato de onda idêntico ao da concessionária. Este formato de onda permite completo funcionamento do equipamento elétrico sem falhas (NEOSOLAR, 2020).

Figura 63. Inversor Senoidal 350W 12/220V Ipower IP350-12, da Epever.



Fonte: (NEOSOLAR, 2021).

5.13. Sistema de Governo

A área do leme deve ser calculada e verificada durante o estudo inicial do arranjo da embarcação. De acordo com Lewis (1989), uma boa estimativa é usar o valor mínimo de área dada pela classificadora Det norske Veritas (DnV), em suas regras

$$A_R = \frac{T * LBP}{100} \left[1 + 25 \left(\frac{B}{LBP} \right)^2 \right] \quad (72)$$

Onde:

A_R = área do leme;

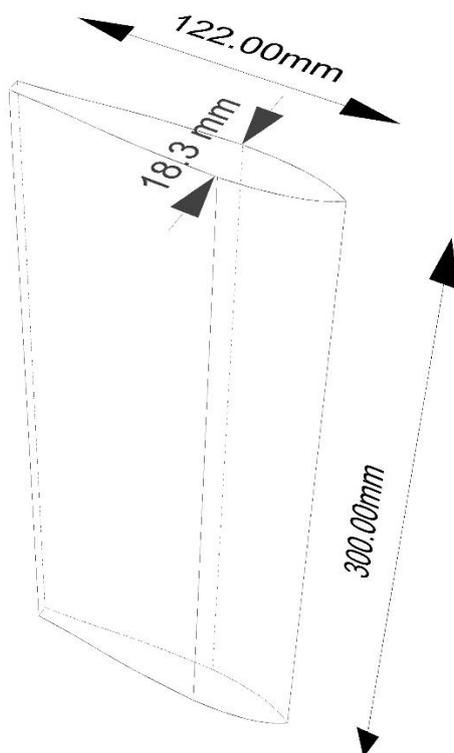
T = calado da embarcação;

LBP = comprimento entre perpendiculares;

B = boca máxima da embarcação.

Portanto, de acordo com a equação acima, a área encontrada foi de 0.03656 m²; assim, essa área foi distribuída de tal forma que o leme tenha como dimensões uma altura de 0.3 m e comprimento de 0.122m.

Figura 64. Representação do leme modelado.



Para determinar a força e torque que serão necessários ao mecanismo de governo, precisamos usar uma formulação presente em Putra (2018, apud Germanischer Lloyd), onde é calculada a força normal que age no leme (CR):

$$CR = 132 * Av^2 * k_1 * k_2 * k_3 * k_t \quad (73)$$

Onde:

A: área do leme;

V: Velocidade da embarcação (nós), quando for menor que 10 nós, tomar como $(V + 20) / 3$;

K_1 : Coeficiente dependente da razão de aspecto da forma da proa do navio;

K_2 : Coeficiente dependente do tipo e perfil de leme;

K_3 : Coeficiente dependente da localização do leme;

K_t : 1.0

Para o presente projeto, tem-se os valores apresentados na Tabela 48:

Tabela 48. Parâmetros utilizados no cálculo da força normal que age no leme.

Parâmetro	Valor
A	0.0366 m ²
Razão de Aspecto	0,615
V _{mín}	9.32 nós
K ₁	1.281
K ₂	1,1
K ₃	1

Com isso, obtemos as forças CR para vante e ré:

Tabela 49. Forças normais ao leme, vante e ré.

Parâmetro	Valor
CR (vante)	591.94 N
CR (ré)	108.14 N

A distância do centro de pressão até o eixo de rotação é dada por:

$$r = b(\alpha - k_b) \quad (74)$$

Onde:

b: corda média do leme;

α : 0.33 (para condição de vante) e 0.66 (para condição de ré);

K_b: fator de equilíbrio = 0.25.

Logo, as distâncias dos centros de pressão são obtidas, sendo 0.00976 m na condição de vante e 0.05002 m na condição de ré.

O torque no leme é determinado usando a seguinte fórmula:

$$QR = CR * r \quad (75)$$

Para ambas as condições de ré e vante, o torque no leme resulta em 5.77 N.m e 5.41 N.m, respectivamente.

5.14. Estabilidade Direcional

A avaliação da estabilidade direcional do catamarã é realizada utilizando a metodologia do navio com velocidade moderada em águas profundas a um número de Froude moderado, descrita em Faltinsen (2005), que permite utilizar os coeficientes de amortecimento potencial e massa adicional para determinar as forças e momentos hidrodinâmicos de deriva. Na tabela abaixo, estão descritas essas relações.

Tabela 50. Relações entre forças e momentos hidrodinâmicos e os coeficientes de amortecimento e massa adicional.

Relações hidrodinâmicas	
$Y_{\dot{v}} = -A_{22}$	$Y_v = -B_{22}$
$N_{\dot{v}} = A_{62}$	$N_v = B_{62}$
$Y_{\dot{r}} = A_{26}$	$Y_r = B_{26}$
$N_{\dot{r}} = -A_{66}$	$N_r = -B_{66}$

Fonte: Adaptado de (FALTINSEN, 2005).

Com a análise realizada no Ansys descrita na seção 5.5, são obtidos os coeficientes de amortecimento potencial e massa adicional para um intervalo de frequências. Para que seja analisada a manobrabilidade, são usados os coeficientes para frequências próximas a zero, ou seja, $\omega \rightarrow 0$. Os valores correspondentes estão representados na Tabela 51.

Tabela 51. Coeficientes hidrodinâmicos dimensionalizados da embarcação.

Coeficiente Hidrodinâmico	Valor
$Y_{\dot{v}0}$	-248.95 kg
$Y_{\dot{r}0}$	236.49 kg.m ²
$N_{\dot{v}0}$	236.40 kg
$N_{\dot{r}0}$	-644.41 kg.m ²
Y_{v0}	-7.93 E-09 kg.s
Y_{r0}	2.56 E-08 kg.m ² /s

Coefficiente Hidrodinâmico	Valor
N_{v0}	2.77 E-08 kg.s
N_{r0}	1.90 E-08 kg.m ² /s

Com isso, é possível calcular o coeficiente final de estabilidade direcional, quando da presença do leme. Neste contexto, são utilizadas as Equações (36) a (41), fornecendo assim os coeficientes referentes ao leme, que serão somados aos coeficientes do casco nu, obtidos anteriormente.

O perfil de leme utilizado foi o IfS 58 TR 15, e apresenta os seguintes parâmetros:

Tabela 52. Parâmetros dimensionais do leme.

Parâmetro	Valor
Espessura t	0.0183 m
Corda c	0.122 m
Razão espessura/corda	0.150
Centro de Pressões do Leme	0.0713 m
$\frac{\partial C_L}{\partial \alpha}$	0.032

Logo, podemos aplicar o que está descrito nas Equações (42) a (45), e abaixo são demonstrados as derivadas finais, que resultam da soma das derivadas do casco e do leme:

Tabela 53. Derivadas hidrodinâmicas adimensionais da embarcação mais leme.

Derivada Hidrodinâmica	Valor
Y'_v	-1.86 E-03
Y'_r	6.95 E-04
N'_v	6.95 E-04
N'_r	-2.59 E-04

O coeficiente \bar{C} também é conhecido com índice de estabilidade direcional e, para que tal seja garantida, esse valor deve ser maior que zero. Por fim, podemos comparar os coeficientes iniciais, da embarcação nua, e os coeficientes finais, que abrangem tanto a influência do casco quanto o leme, e são apresentados na Tabela 54.

Tabela 54. Coeficientes da equação característica do sistema, descrita pela Equação (30), sem e com a influência do leme,.

Parâmetro	Valor sem Leme	Valor com Leme
\bar{A}	8.70 E+05	3.15e+05
\bar{B}	3.63 E+05	1,67
\bar{C}	4.25 E-05	2.41 E-06

Portanto, como está sendo observado, coeficiente \bar{C} continua sendo positivo, o que significa que, mesmo após a adição do leme, a embarcação continua apresentando estabilidade direcional.

5.15. Equipamentos de Navegação e Auxiliares

De acordo com o edital do DSB, todas as embarcações devem estar equipadas com um cabo de reboque flutuante de comprimento mínimo igual a 10 m e um diâmetro mínimo de 8 mm. As embarcações multicascos devem ser equipadas com cabo de reboque presa em cada um dos cascos.

Outra exigência é de que todas as embarcações devem estar equipadas com uma boia de marcação, permanentemente presa à embarcação por um cabo com comprimento mínimo de 10 m e diâmetro mínimo de 1 mm; equipadas com pelo menos 01 (um) remo, de comprimento mínimo de 60 (sessenta) centímetros, que possua uma pá de comprimento mínimo de 20 (vinte) centímetros e largura mínima de 13 (treze) centímetros.

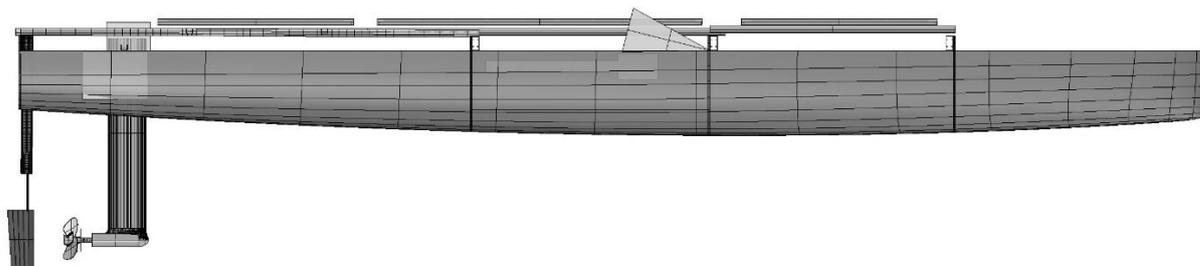
As embarcações devem possuir também:

- Rádio VHF portátil de 5W com antena fixa ao convés, de 3 dB de ganho e 1.5 m de comprimento, e também portar uma antena portátil de emergência para uso em caso da perda da principal.
- Bandeira vermelha ou laranja de perigo/socorro, uniformemente colorida, com tamanho mínimo de 33 x 47 cm.
- Sistema sonoro, como uma buzina, audível a distâncias razoáveis, equivalente a uma buzina do tipo *spray* e que emita sinal contínuo de no mínimo 5 segundos.
- Âncora de 1.5 kg com 20 (vinte) metros de cabo.
- GPS portátil.

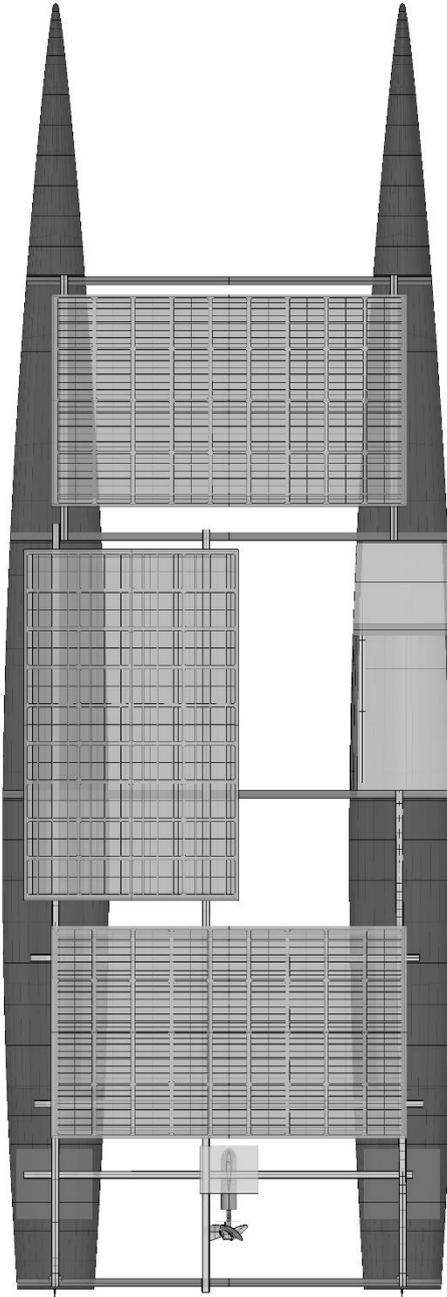
- Extintor de incêndio com uma capacidade mínima de 1 kg (categoria E).

Figura 65. Arranjo geral da embarcação, (a) Vista Longitudinal, (b) Vista de Planta e (c) Vista Transversal.

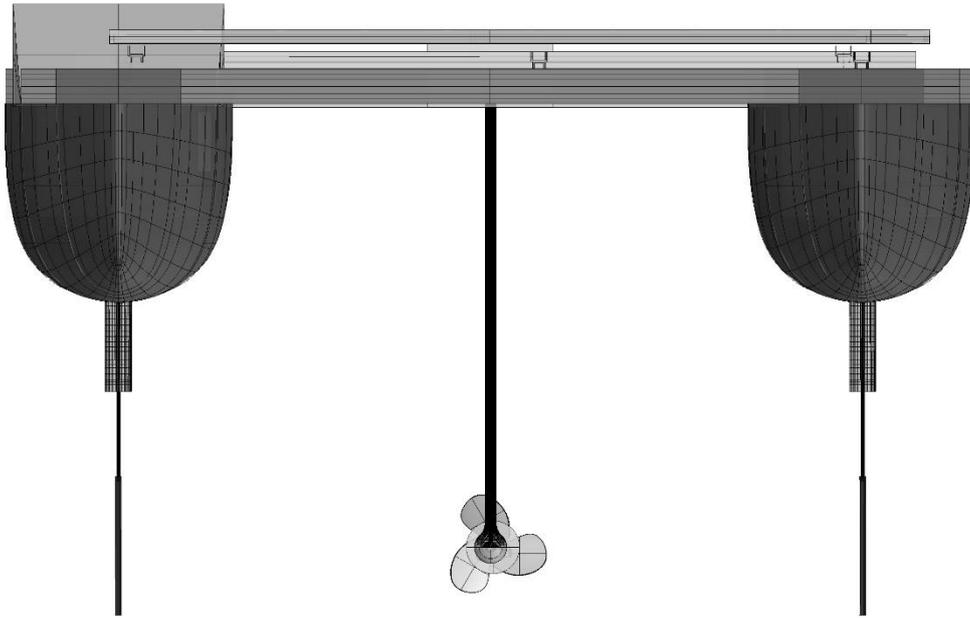
(a)



(b)



(c)



6. CONCLUSÕES

Com o objetivo principal de desenvolver o projeto preliminar de uma embarcação movida a energia solar com o intuito de participar na competição Desafio Solar Brasil, este trabalho serviu para desenvolver a literatura sobre tecnologia de fontes alternativas de energia limpa e suas abordagens e aplicações no âmbito marítimo.

Ao longo do presente trabalho, foram descritas as principais características para o desenvolvimento do projeto de uma embarcação, tendo como ponto de partida metodologias de projeto de embarcações, neste caso a *Quality Function Deployment* (QFD). A partir dela, foi montado o fluxograma de projeto, que estabelece o sequenciamento de etapas e quais são os resultados esperados ao fim de cada. Por ser um tema pouco explorado na literatura, enfrentamos certas dificuldades a respeito de quais sistemas precisariam ser priorizados em relação a outros; porém, ao longo do desenvolvimento do projeto, o sequenciamento definido foi sendo validado e concluiu-se que o fluxograma está adequado.

Na análise de seakeeping, obteve-se o número de ocorrências de fenômenos como emersão de propulsor e imersão de proa considerando o pior caso de altura de ondas de 0.25m; caso haja a presença de ondas maiores que essas, é recomendável que a embarcação retorne ao píer. É importante reiterar que esta análise considera que a competição ocorra em águas abertas; em caso de mudanças no local, é preciso avaliar se ainda há a necessidade desta análise mais criteriosa e, assim sendo, como a embarcação responderá aos fenômenos de seakeeping considerados.

No dimensionamento estrutural, obteve-se um valor para o módulo de seção mestra muito maior que o módulo mínimo definido pela classificadora (que este para este tipo de embarcação não se faz obrigatório) o que teoricamente mostra que a embarcação resistirá aos esforços aplicados. Porém, essa grande margem diz que a estrutura está superdimensionada, apresentando uma rigidez desnecessária. Por isso, existem grandes possibilidades de reduzir o peso leve estrutural mediante a utilização de escantilhões menores e a verificação destes através de análises mais especializadas de elementos finitos que permitam representar o comportamento estrutural de materiais compósitos.

Outro ponto que surge do dimensionamento estrutural é a necessidade da utilização de mais de uma norma classificadora ao longo do projeto. No cálculo preliminar da área do leme por exemplo, por se tratar de uma embarcação relativamente

pequena e artesanal e devido à insuficiência de informações técnicas para este tipo de embarcação, utilizou-se a norma da DnV como ponto de partida. Em etapas futuras do projeto, faz-se necessário um cálculo mais analítico tanto do tipo do leme quanto das suas dimensões ótimas.

Com o cálculo da resistência ao avanço, foram encontrados os valores ótimos para o propulsor selecionado, com diâmetro de 21.5 cm e eficiência propulsiva máxima de 61%, aproximadamente. Entretanto, algumas considerações para trabalhos futuros podem ser feitas: a aplicação de um tubulão, dando maior direcionamento ao escoamento do propulsor; a adoção de um tipo de propulsor diferente, como um azimutal; devido à limitação do motor, avaliar se um outro propulsor consegue atingir aos requisitos com menor consumo e maior velocidade.

Na análise de manobrabilidade, concluiu-se que a embarcação é direccionalmente estável, de acordo com os coeficientes de estabilidade direcional. O valor encontrado pode ser obtido com mais exatidão quando consideradas algumas estruturas adicionais, como as estruturas de sustentação do hélice (e possivelmente um tubulão) e dos lemes.

Com este trabalho, foi possível realizar uma análise minuciosa de um projeto de catamarã bem como ressaltar a importância do estudo e da aplicação de energias renováveis, em específico a solar, no âmbito marítimo. Em relação aos objetivos definidos na seção 2, todos foram realizados em concordância com às necessidades, requisitos e critérios da competição e da autoridade marítima competente. O presente projeto também traz como sugestão de trabalhos futuros: a possibilidade de aplicação da embarcação em outras competições mais rigorosas, considerando as adaptações necessárias; análise da influência de outros efeitos hidrodinâmicos, como por exemplo pressão de slamming. Outro possível trabalho futuro é o estudo sobre a influência da separação dos cascos e como isso impactaria nos efeitos hidrodinâmicos e na navegabilidade do catamarã.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING. **Rules for Building and Classing – High Speed Craft, Part 3: Hull Construction and Equipment**. Spring, Texas, American Bureau of Shipping, 2020.

BRAGA, R. **Energia Solar Fotovoltaica : Fundamentos E Aplicações**. Rio de Janeiro: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

CARLTON, J. **Marine Propellers and Propulsion**. 2 ed. Burlington, Massachusetts, Elsevier Ltd, 2007.

CHANASHETTY, V. B.; PATIL, B. M. Electric Boat Using Solar Energy. **Indian Journal of Scientific Research**, v. 12, n. 1, p. 324–331, 2015.

COSTA, M. M. **Estudo do Dano por Fadiga em Tubulações do Topside de um FPSO devido à Ação de Ondas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica), Universidade Federal Fluminense, 2019.

COUSER, P.; WELLICOME J.F; MOLLAND, A.F. An improved method for the theoretical prediction of the wave resistance of transom-stern hulls using a slender body approach. **International Shipbuilding Progress**, vol. 45, No. 444, 1998.

Potencial Solar – Sun Data v 3.0. **CRESESB**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acessado em 20 nov. 2020.

DNV GL. **Environmental Conditions and Environmental Loads**. Det Norske Veritas, 2017.

FALTINSEN, O. M. **Hydrodynamics of high-speed marine vehicles**. New York, New York, Cambridge University Press, 2005.

GORTER, T. Design considerations of a solar racing boat: propeller design parameter as a result of PV system power. **Energy Procedia**, v.75, p. 1901-1906, 2015.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7 ed. São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2010.

HSC CODE. **International Code of Safety for High Speed Craft**. The Maritime Safety Committee, 2000.

GORTER, T. **Performance Evaluation of Photovoltaic Boats in an Early Design Stage**. Twente, Holanda: Tese (Doutorado em Engenharia Naval), Universidade de Twente, Holanda, 2014.

CPTEC – Previsão Oceânica. **Instituto Nacional de Pesquisas Especiais - INPE**. Disponível em: <http://ondas.cptec.inpe.br/mapas.php?regiao=brasil>. Acessado em 02 ago. 2021.

KOS, S.; BRČIĆ, D; FRANČIĆ, V. **Comparative Analysis of Conventional and SWATH Passenger Catamaran**. Universidade de Rijeka, Croácia, 2010.

KURNIAWAN, A. A Review of Solar-Powered Boat Development. **The Journal for Technology and Science**, v. 27, n. 1, p.1-8, 2016.

LEWIS, E. V. **Principles of Naval Architecture, 2nd Revision, Vol. III: Motions in waves and controllability**. Jersey City, The Society of Naval Architects and Marine Engineers. v. 3, 1989.

LLOYD, A. R. J. M. **Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Weather**. Sussex, United Kingdom: Ellis Horwood, 1989.

Fibra de Vidro – Fiber Glass. **MaCamp**. Disponível em: <https://campismo.com.br/variedades/fiberglass.htm>. Acessado em 13 de jan. 2021.

MAHMUD, K.; MORSALIN, S.; KHAN, M. I. Design and Fabrication of an Automated Solar Boat. **International Journal of Advanced Science and Technology**, v. 64, n. 1, p. 31–42, 2014.

MELO, S. **Apostila de Metodologia de Projeto Naval**. Recife, Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

MOLLAND, A. F; TURNOCK, S.R; HUDSON, D.A. **Ship Resistance and Propulsion**. NewYork, Cambridge University Press, 2011.

Painel Solar Fotovoltaico 335W - Upsolar UP-M335P. **NeoSolar**. Disponível em:<https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-335wp-upsolar-up-m335p.html>. Acessado em 20 nov. 2020.

Bateria Estacionária Heliar Freedom DF1500 (93Ah / 80Ah). **NeoSolar**. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/bateria-estacionaria-freedom-df1500-93ah-80ah.html>. Acessado em 27 de jan. 2021.

Controlador de Carga MPPT 20A 12/24V - Epever XTRA 2210N. **NeoSolar**. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/controlador-carga-mppt-20a-12-24v-epever-xtra-2210n.html>. Acessado em 27 jan. 2021.

Inversor Senoidal Epever IPower IP350-11 - 350W 12/120V. **NeoSolar**. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/inversor-senoidal-epever-ipower-ip350-12vcc-120vca.html>. Acessado em 27 jan. 2021.

NORMAM-01/DPC. **Normas da Autoridade Marítima para Embarcações Empregadas na Navegação em Mar Aberto**. Marinha do Brasil, Diretoria de Portos e Costas, 2005.

NORMAM-03/DPC. **Normas da Autoridade Marítima para Amadores, Embarcações de Esporte e/ou Recreio e para Recadastramento e Funcionamento das Marinas, Clubes e Entidades Desportivas Náuticas**. Marinha do Brasil, Diretoria de Portos e Costas, 2003.

PANPRAYUN, G.; PITAKSINTORN, S. Development and evaluation of solar powered catamaran for sustainable tourism in southeast of the gulf of Thailand. **International Journal of Renewable Energy Research**, v. 8, n. 2, p. 1124–1129, 2018.

PAULLING, J. R. **Principles of Naval Architecture, 3rd Revision, Vol. I: Strength of Ships and Ocean Structures**. Jersey City, The Society of Naval Architects and Marine Engineers. v. 1, 2008.

PUTRA, B. S. S. **Auxiliary Machinery – Rudder Design Calculation**. Department of Marine Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Indonésia, 2018.

REIS, M. C. DOS. **Projeto Conceitual de uma Embarcação Solar para o Transporte Público de Passageiros**. Joinville: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval), Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

RORIZ, E. L. **Projeto Conceitual de uma Embarcação de Passageiros para a Navegação no Rio Capibaribe**. Recife: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval), Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

SIMOS, A. N. **Especialização em Engenharia Naval, Módulo 3: Hidrodinâmica**. Recife, Universidade de Pernambuco, 2007.

SPAGNOLO, G. S. et al. Solar-Electric Boat. **Journal of Transportation Technologies**, v. 02, n. 02, p. 144–149, 2012.

SUNARYO, S.; RAMADHANI, A. W. Hull design of solar powered electrical recreational boat for Indonesian waters. **E3S Web of Conferences**, v. 67, n.1, p. 4-11, 2018.

TAMUNODUKOBIPI, D.; SAMSON, N.; SIDUM, A. Design Analysis of a Lightweight Solar Powered System for Recreational Marine Craft. **World Journal of Engineering and Technology**, 6, 441-456, 2018.

Processos de Fabricação. **TG FIBERGLASS**. Disponível em: <https://www.tgfiberglass.com.br/processos-de-fabricacao>. Acessado em 13 de jan. 2021.

TUCK, E.O. Computation and Minimisation of Ship Waves. ICIAM03, Sydney, 7-11 July 2003. **SIAM Proceedings in Applied Mathematics** 116, 2004.

Módulo Fotovoltaico DMEGC Solar, 330W, 72 células. **ZYRONGEO**. Disponível em: <http://zyrongeo.com/produto/modulo-fotovoltaico-dmegc-solar-330w-72-celulas/>. Acessado em 03 de agosto de 2020.

ANEXO A – COEFICIENTES DE EMPUXO E TORQUE DA SÉRIE POLINOMIAL WAGENINGEN

Figura 66. Coeficientes K_t e K_q da Série Wageningen.

Thrust K_T					Torque K_Q						
n	C_n	s	t	u	v	n	C_n	s	t	u	v
1	0.00880496	0	0	0	0	1	0.00379368	0	0	0	0
2	-0.20455400	1	0	0	0	2	0.00886523	2	0	0	0
3	0.16635100	0	1	0	0	3	-0.032241	1	1	0	0
4	0.15811400	0	2	0	0	4	0.00344778	0	2	0	0
5	-0.14758100	2	0	1	0	5	-0.0408811	0	1	1	0
6	-0.48149700	1	1	1	0	6	-0.108009	1	1	1	0
7	0.41543700	0	2	1	0	7	-0.0885381	2	1	1	0
8	0.01440430	0	0	0	1	8	0.188561	0	2	1	0
9	-0.05300540	2	0	0	1	9	-0.00370871	1	0	0	1
10	0.01434810	0	1	0	1	10	0.00513696	0	1	0	1
11	0.06068260	1	1	0	1	11	0.0209449	1	1	0	1
12	-0.01258940	0	0	1	1	12	0.00474319	2	1	0	1
13	0.01096890	1	0	1	1	13	-0.00723408	2	0	1	1
14	-0.13369800	0	3	0	0	14	0.00438388	1	1	1	1
15	0.00638407	0	6	0	0	15	-0.0269403	0	2	1	1
16	-0.00132718	2	6	0	0	16	0.0558082	3	0	1	0
17	0.16849600	3	0	1	0	17	0.0161886	0	3	1	0
18	-0.05072140	0	0	2	0	18	0.00318086	1	3	1	0
19	0.08545590	2	0	2	0	19	0.015896	0	0	2	0
20	-0.05044750	3	0	2	0	20	0.0471729	1	0	2	0
21	0.01046500	1	6	2	0	21	0.0196283	3	0	2	0
22	-0.00648272	2	6	2	0	22	-0.0502782	0	1	2	0
23	-0.00841728	0	3	0	1	23	-0.030055	3	1	2	0
24	0.01684240	1	3	0	1	24	0.0417122	2	2	2	0
25	-0.00102296	3	3	0	1	25	-0.0397722	0	3	2	0
26	-0.03177910	0	3	1	1	26	-0.00350024	0	6	2	0
27	0.01860400	1	0	2	1	27	-0.0106854	3	0	0	1
28	-0.00410798	0	2	2	1	28	0.00110903	3	3	0	1
29	-0.000606848	0	0	0	2	29	-0.000313912	0	6	0	1
30	-0.004981900	1	0	0	2	30	0.0035985	3	0	1	1
31	0.002598300	2	0	0	2	31	-0.00142121	0	6	1	1
32	-0.000560528	3	0	0	2	32	-0.00383637	1	0	2	1
33	-0.001636520	1	2	0	2	33	0.0126803	0	2	2	1
34	-0.000328787	1	6	0	2	34	-0.00318278	2	3	2	1
35	0.000116502	2	6	0	2	35	0.00334268	0	6	2	1
36	0.000690904	0	0	1	2	36	-0.00183491	1	1	0	2
37	0.004217490	0	3	1	2	37	0.000112451	3	2	0	2
38	0.0000565229	3	6	1	2	38	-0.0000297228	3	6	0	2
39	-0.001465640	0	3	2	2	39	0.000269551	1	0	1	2
						40	0.00083265	2	0	1	2
						41	0.00155334	0	2	1	2
						42	0.000302683	0	6	1	2
						43	-0.0001843	0	0	2	2
						44	-0.000425399	0	3	2	2
						45	0.0000869243	3	3	2	2
						46	-0.0004659	0	6	2	2
						47	0.0000554194	1	6	2	2

Fonte: (MOLLAND, 2011).

Figura 67. Influência do número de Reynolds nos coeficientes de empuxo e torque.

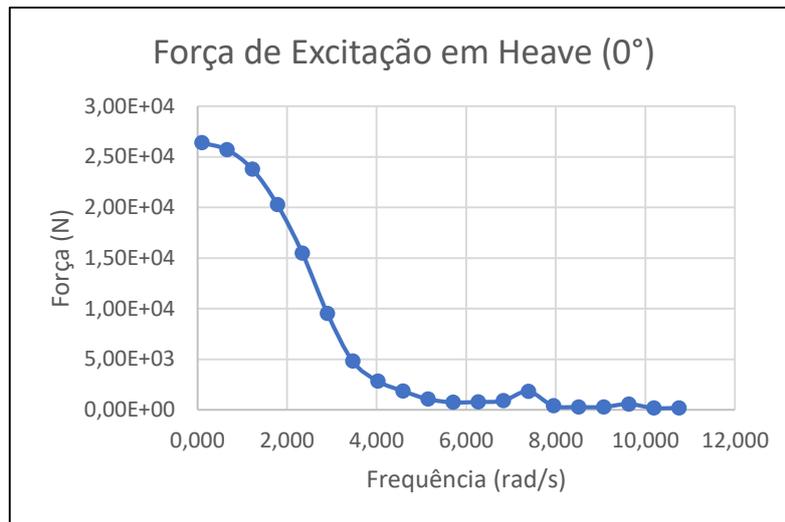
$\Delta K_T = \sum ai \cdot Pi$		$\Delta K_Q = \sum bi Pi$	
<i>Pi</i>	<i>ai</i>	<i>Pi</i>	<i>bi</i>
1	0.0003534850	1	-0.00059141200
$(A_E/A_0)J^2$	-0.0033375800	(P/D)	0.00696898000
$(A_E/A_0)(P/D)J$	-0.0047812500	$Z \cdot (P/D)^6$	-0.00006666540
$(\log Re - 0.301)^2 \cdot (A_E/A_0) \cdot J^2$	0.0002577920	$(A_E/A_0)^2$	0.01608180000
$(\log Re - 0.301) (P/D)^6 J^2$	0.0000643192	$(\log Re - 0.301) \cdot (P/D)$	-0.00093809000
$(\log Re - 0.301)^2 \cdot (P/D)^6 \cdot J^2$	-0.0000110636	$(\log Re - 0.301) \cdot (P/D)^2$	-0.00059593000
$(\log Re - 0.301)^2 \cdot Z \cdot (A_E/A_0) \cdot J^2$	-0.0000276305	$(\log Re - 0.301)^2 \cdot (P/D)^2$	0.00007820990
$(\log Re - 0.301) \cdot Z \cdot (A_E/A_0) \cdot (P/D) \cdot J$	0.0000954000	$(\log Re - 0.301) \cdot Z \cdot (A_E/A_0) \cdot J^2$	0.00000521990
$(\log Re - 0.301) \cdot Z^2 \cdot (A_E/A_0) (P/D)^3 \cdot J$	0.0000032049	$(\log Re - 0.301)^2 \cdot Z \cdot (A_E/A_0) \cdot (P/D) \cdot J$	-0.00000088528
		$(\log Re - 0.301) \cdot Z \cdot (P/D)^6$	0.00002301710
		$(\log Re - 0.301)^2 \cdot Z \cdot (P/D)^6$	-0.00000184341
		$(\log Re - 0.301) (A_E/A_0)^2$	-0.00400252000
		$(\log Re - 0.301)^2 (A_E/A_0)^2$	0.00022091500

Fonte: (MOLLAND, 2011).

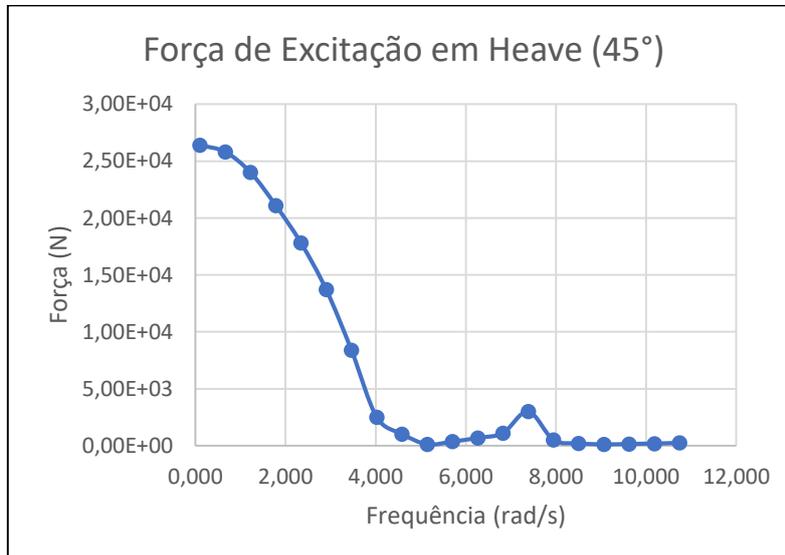
ANEXO C – FORÇAS DE EXCITAÇÃO NOS DIFERENTES MOVIMENTOS E SEUS VALORES E FASES NAS FREQUÊNCIAS NATURAIS

Figura 68. Forças de Excitação em Heave, para as direções de (a) 0° , (b) 45° , (c) 90° , (d) 135° e (e) 180° .

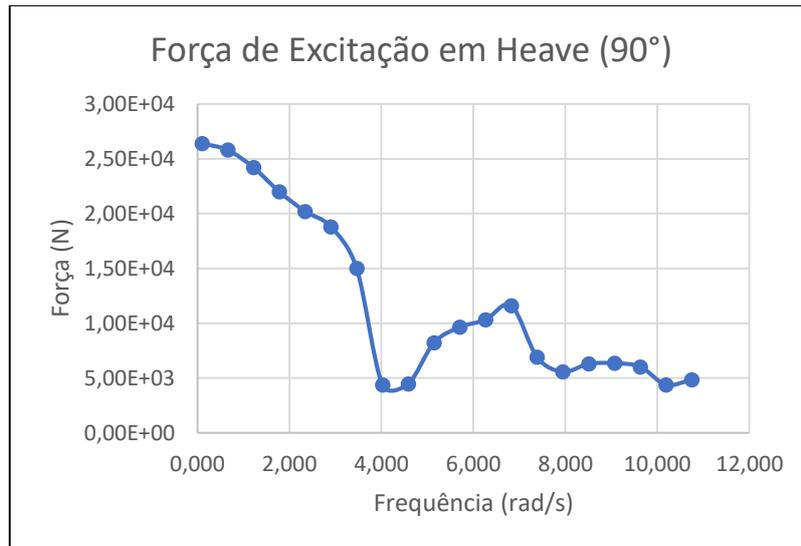
(a)



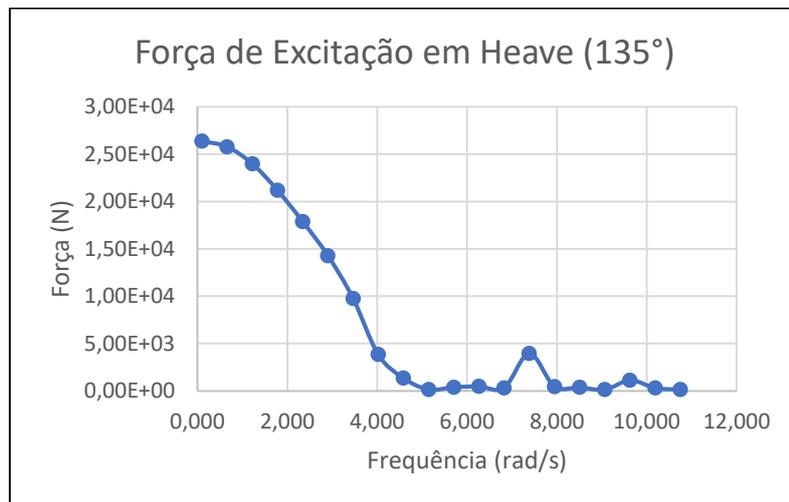
(b)



(c)



(d)



(e)

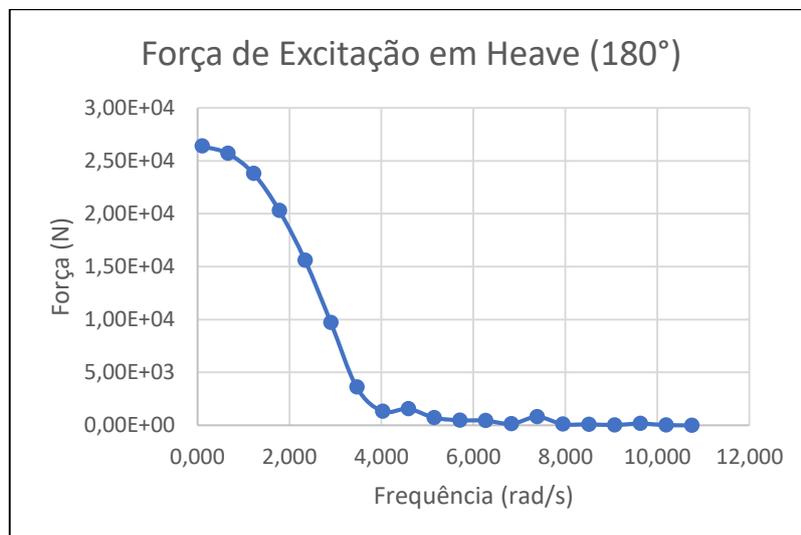
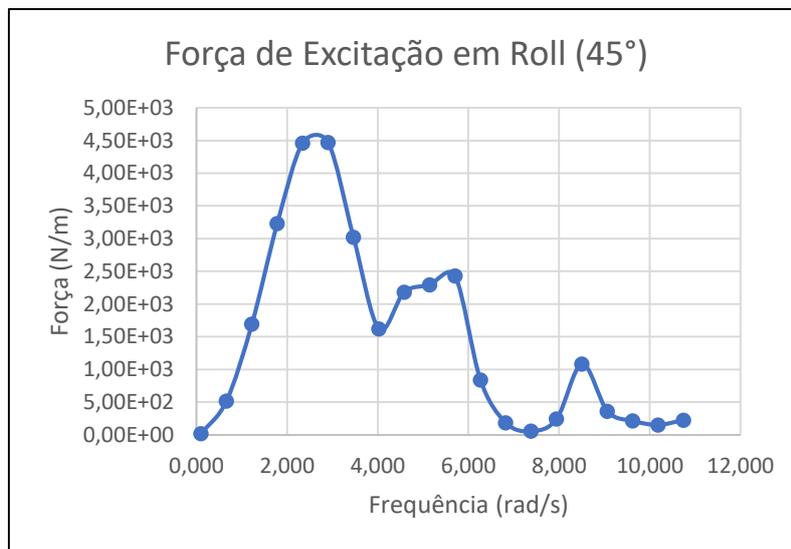
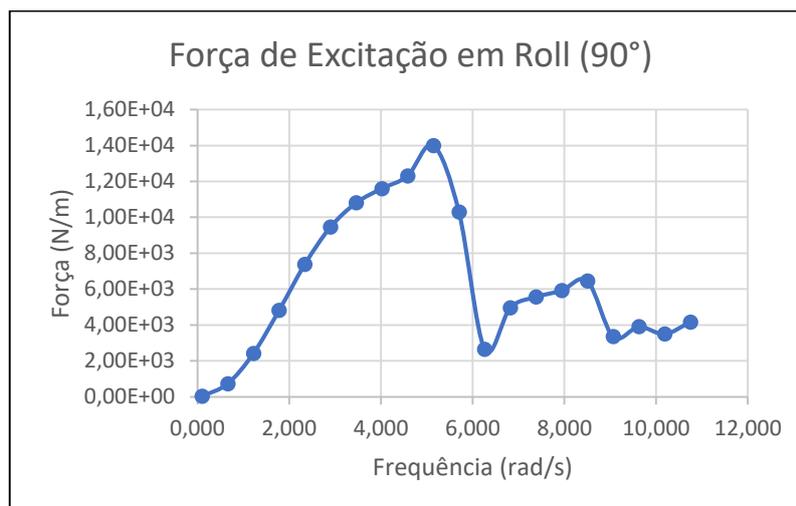


Figura 69. Forças de Excitação em Roll, para as direções de (a) 45°, (b) 90° e (c) 135°.

(a)



(b)



(c)

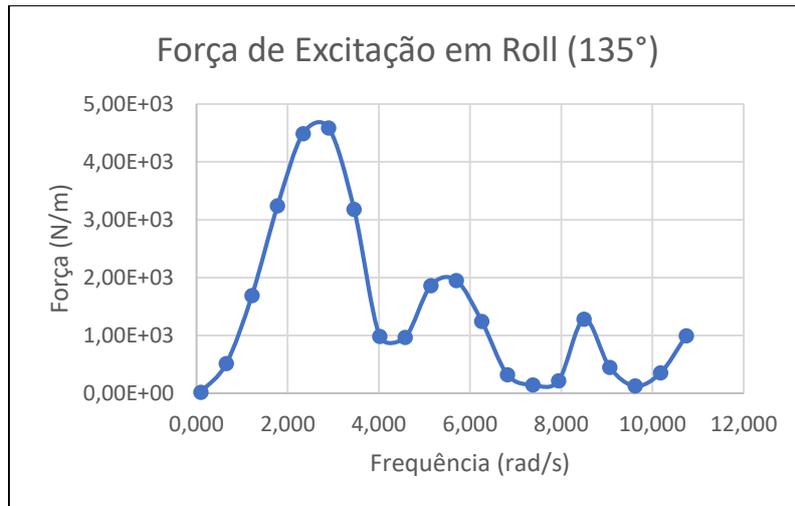
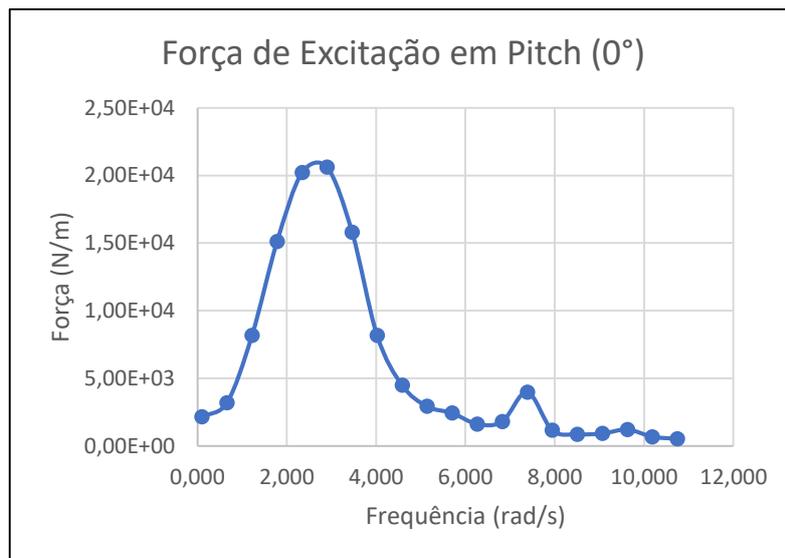
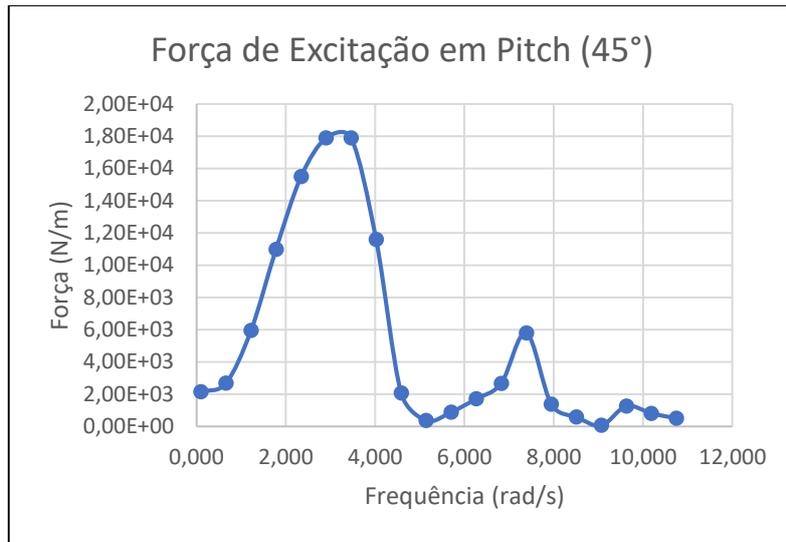


Figura 70. Forças de Excitação em Pitch, para as direções de (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°, (d) 135° e (e) 180°.

(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

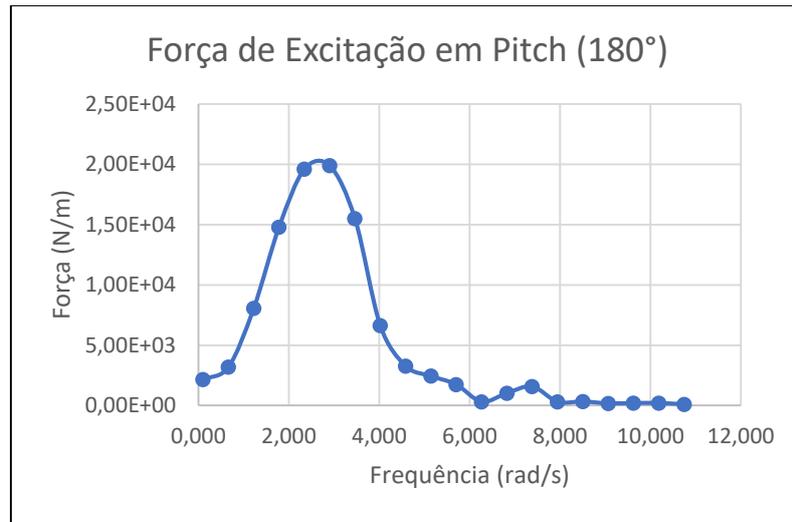


Tabela 55. Forças de Excitação e respectivas fases em Heave, Roll e Pitch, nas diferentes direções.

Direção 0°		Direção 45°		Direção 90°		Direção 135°		Direção 180°	
ω_{33}	6,767549 rad/s								
F33	893,3157 N/m	F33	1057,224 N/m	F33	11471,28 N/m	F33	341,447 N/m	F33	180,696 N/m
ϵ_{33}	0,724708 rad	ϵ_{33}	0,972882 rad	ϵ_{33}	1,794324 rad	ϵ_{33}	0,584189 rad	ϵ_{33}	-2,54637 rad
ω_{44}	0,120334 rad/s								
F44	0,086257 N/m	F44	36,46806 N/m	F44	51,59884 N/m	F44	36,46806 N/m	F44	0,086279 N/m
ϵ_{44}	-3,13498 rad	ϵ_{44}	1,574881 rad	ϵ_{44}	0 rad	ϵ_{44}	1,575807 rad	ϵ_{44}	3,134759 rad
ω_{55}	0,116599 rad/s								
F55	2190,531 N/m	F55	2175,71 N/m	F55	2157,332 N/m	F55	2175,71 N/m	F55	2190,234 N/m
ϵ_{55}	-0,88585 rad	ϵ_{55}	-0,04774 rad	ϵ_{55}	-8,8E-05 rad	ϵ_{55}	0,047645 rad	ϵ_{55}	0,064083 rad

ANEXO D – ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DO BANCO DE BATERIAS

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

Principais Características Elétricas

Modelos		DF300	DF500	DF700	DF1000	DF1500	DF2000	DF2500	DF3000	DF4000/ DF4001	DF4100
Capacidade @25°C (Ah)	10 h	24	30	41	54	76	94	130	156	200	200
	20 h	26	36	45	60	80	105	150	170	225	220
	100 h	30	40	50	70	93	115	165	185	240	240
Dimensões (mm)	Comprimento	175	175	210	244	330	330	511	511	518	525
	Largura	175	175	175	175	172	172	213	213	274	275
	Altura	175	175	175	175	240	240	230	230	242	250
Peso (Kg)		8,8	9,7	12,5	14,7	23,9	27,1	44,6	48,3	60	60,3
Torque	Mínimo	9 N.m	9 N.m	9 N.m	9 N.m	13,6 N.m	13,6 N.m	9 N.m	9 N.m	9 N.m	9 N.m
	Máximo	11 N.m	11 N.m	11 N.m	11 N.m	20,3 N.m	20,3 N.m	11 N.m	11 N.m	11 N.m	11 N.m
Tensão de Flutuação		de 13,2 a 13,8V @ 25°C									
Tensão de carga / equalização		de 14,4 a 15,5V @ 25°C									
Compensação de temperatura		Para cada 1°C acima de 25°C, subtrair 0,033V Para cada 1°C acima de 25°C, adicionar 0,033V									

Correntes de descarga (A) em diferentes regimes a 25°C (tensão final 10,5V)

Modelo	HORAS															MINUTOS			
	100hs	20hs	10hs	9hs	8hs	7hs	6hs	5hs	4,5hs	4hs	3,5hs	3hs	2,5hs	2hs	1,5hs	1h	45'	30'	15'
Bateria	0,3	1,3	2,4	2,6	2,9	3,3	3,8	4,4	4,9	5,4	6	7	8,2	10	12,8	18	21	25	40
DF300	0,4	1,8	3	3,3	3,7	4,2	4,9	5,8	6,2	6,8	7,6	8,6	9,9	12	15	20	25,3	33	52
DF500	0,5	2,3	4,1	4,5	5	5,6	6,5	7,5	8,2	9,2	10	11,5	13,6	16,3	21	27	32	43	65
DF700	0,7	3	5,4	5,8	6,4	7,3	8,2	9,8	10,5	11,5	12,5	14,5	17	19	25,2	35	42,5	55	84
DF1000	0,93	4	7,6	8,2	9	10	11,5	13,2	14,5	16	18,2	21	25	29,5	38	54	69	90	130
DF1500	1,2	5,3	9,4	10,2	11,5	13	14,5	17	18,4	20,3	22,6	25	29,5	34,5	44	60	75	96	150
DF2000	1,7	7,5	13	14,4	16,2	18	20	23	25	28	31	34	40	47	58	81	99	130	200
DF2500	1,9	8,5	15,6	17	19	21,4	24,7	28	30	33	36	41	48	57	72	95	112	152	231
DF3000	2,4	11	20	21,5	24	26,5	30	35	38	41,5	46	52	60	72	90	120	145	191	290
DF4000																			
DF4001																			
DF4100																			

Capacidade em ampère-hora (Ah) a 25°C em diferentes regimes de descarga (tensão final 10,5V)

Modelo	HORAS															MINUTOS			
	100hs	20hs	10hs	9hs	8hs	7hs	6hs	5hs	4,5hs	4hs	3,5hs	3hs	2,5hs	2hs	1,5hs	1h	45'	30'	15'
Bateria	30	26	24	23,8	23,5	23,1	22,8	22	21,9	21,6	21	21	20,5	20	19,2	18	15,8	12,5	10
DF300	40	36	30	29,9	29,8	29,7	29,4	28,8	27,7	27	26,6	25,8	24,8	24	22,5	20	19	16,5	13
DF500	50	45	41	40,5	40	39,5	39,2	37,5	37,1	36,8	35	34,5	34	32,5	31,5	27	24	21,5	16,3
DF700	70	60	54	51,8	51,6	51,1	49,2	49	47,3	46	43,8	43,5	42,5	38	37,8	35	31,9	27,5	21
DF1000	93	80	76	73,8	72	70	69	66	65,3	64	63,7	63	62,5	59	57	54	51,8	45	32,5
DF1500	115	105	94	92	91,8	91	87	85	82,8	81,2	79,1	75	73,8	69	66	60	56,3	48	37,5
DF2000	165	150	130	129,8	129,6	126	120	115	112,5	112	108,5	102	100	94	87	81	74,3	65	50
DF2500	185	170	156	153	152	150	148,2	140	135	132	126	123	120	114	108	95	84	76	57,8
DF3000	240	220	200	193,5	192	185,5	180	175	171	166	161	156	150	144	135	120	108,8	95,5	72
DF4000																			
DF4001																			
DF4100																			

Watts (W) a 25°C (tensão final 10,5V)

Modelo	HORAS															MINUTOS			
	100hs	20hs	10hs	9hs	8hs	7hs	6hs	5hs	4,5hs	4hs	3,5hs	3hs	2,5hs	2hs	1,5hs	1h	45'	30'	15'
Bateria	4	16	29	32	35	40	46	53	58	65	72	84	98	120	154	216	253	300	480
DF300	5	22	36	40	45	51	59	69	74	81	91	103	119	144	180	240	304	396	576
DF500	6	27	49	54	60	68	78	90	99	110	120	138	163	195	252	324	384	502	750
DF700	8	36	65	69	77	88	98	118	126	138	150	174	204	228	302	420	459	594	907
DF1000	11	48	91	98	108	120	138	158	174	192	218	252	300	354	456	648	746	972	1404
DF1500	14	63	113	123	138	156	174	204	221	244	271	300	354	414	528	720	811	1037	1620
DF2000	20	90	156	173	194	216	240	276	300	336	372	408	480	564	696	972	1070	1404	2160
DF2500	22	102	187	204	228	257	296	336	360	396	432	492	576	684	864	1140	1210	1642	2497
DF3000	29	132	240	258	288	318	360	420	456	498	552	624	720	864	1080	1440	1567	2063	3110
DF4000																			
DF4001																			
DF4100																			

Fonte: (NEOSOLAR, 2020).