

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

MATEUS D'AVILA DUTRA

PROJETO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO DE UM VELEIRO  
AUTOSSUSTENTÁVEL

Joinville

2022

MATEUS D'AVILA DUTRA

PROJETO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO DE UM VELEIRO  
AUTOSSUSTENTÁVEL

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Naval do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto

Coorientador: Dr. Giuliano Arns Rampinelli

Joinville

2022

MATEUS D'AVILA DUTRA

PROJETO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO DE UM VELEIRO  
AUTOSSUSTENTÁVEL

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 26 de maio de 2022.

**Banca Examinadora:**

Dr. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto  
Orientador(a)/Presidente

Dr. Lucas Weihmann  
Membro(a)  
Universidade UFSC

Dr. Thiago Pontin Tancredi  
Membro(a)  
Universidade UFSC

## RESUMO

As energias renováveis tem se tornado cada vez mais fundamentais para a sustentabilidade da vida e a utilização dessas energias vem crescendo significativamente nos últimos anos. Por isso o desenvolvimento de tecnologias que utilizam energias renováveis e a propagação dos conceitos de um modo de vida sustentável são de fundamental importância. Dentro desse contexto este trabalho apresenta a ideia de um veleiro autossustentável e busca realizar o dimensionamento do sistema fotovoltaico híbrido do mesmo, onde integra diversas fontes renováveis de captação energética, como energia solar, eólica e hídrica. O dimensionamento do sistema fotovoltaico híbrido inicia-se com a definição das diversas cargas elétricas do sistema, dessa forma é apresentado o processo para a seleção do motor elétrico da embarcação, que é a principal fonte de consumo elétrico do sistema, e também são definidas as demais cargas e seus consumos. Posteriormente foi realizado um levantamento dos recursos energéticos, como a radiação solar e a energia dos ventos disponíveis. Depois foram definidos os componentes de produção de eletricidade através de energias renováveis que farão parte do sistema, como os painéis fotovoltaicos e geradores eólicos. Por fim foi realizado uma análise com o auxílio do software HOMER Pro, onde foi feito um balanço energético do sistema, buscando as soluções viáveis e mais eficientes, dimensionando a unidade de geração, de controle de potência e de armazenamento, além de efetuar uma análise dos custos. Após as análises foram encontradas soluções viáveis que supriram a demanda energética do sistema, sendo necessário a utilização de toda área disponível para instalação dos componentes de geração. Na análise de custo verificou-se a grande influência do banco de baterias, que devido a necessidade de utilização de baterias com alta eficiência, encareceram muito o projeto. Dessa forma verificou-se que é possível realizar o projeto de um veleiro autossustentável, com uma boa autonomia energética, selecionando as tecnologias de captação de energias renováveis mais eficientes, além de baterias de alto desempenho. Por outro lado, percebe-se a necessidade de aumentar ainda mais a eficiência dos componentes de geração e encontrar tecnologias de armazenamento energético com melhores custo-benefício afim de se reduzir o tamanho do banco de baterias, diminuindo assim o custo total do projeto.

**Palavras-chave:** Energias renováveis. Veleiro autossustentável. Sistema fotovoltaico híbrido. Sustentabilidade. Balanço energético.

## ABSTRACT

Renewable energies have become increasingly fundamental for the sustainability of life and the use of these energies has grown significantly in recent years. Therefore, the development of technologies that use renewable energies and the propagation of the concepts of a sustainable way of life is of fundamental importance. Within this context, this work presents the idea of a self-sustaining sailboat and seeks to carry out the design of the hybrid photovoltaic system of the same, which integrates several renewable sources of energy capture, such as solar, wind, and water energy. The sizing of the hybrid photovoltaic system begins with the definition of the various electrical loads of the system, in this way the process for the selection of the vessel's electric motor, which is the main source of electrical consumption of the system, is presented, and the other loads and their consumption. Subsequently, a survey of energy resources was carried out, such as solar radiation and available wind energy. Then the components of electricity production through renewable energies that will be part of the system were defined, such as photovoltaic panels and wind generators. Finally, an analysis was carried out with the help of the HOMER Pro software, where an energy balance of the system was made, seeking viable and more efficient solutions, sizing the generation unit, power control, and storage, in addition to performing an analysis of costs. After the analysis, viable solutions were found that met the energy demand of the system, requiring the use of the entire available area for the installation of the generation components. In the cost analysis, the great influence of the battery bank was verified, which, due to the need to use batteries with high efficiency, made the project very expensive. In this way, it was verified that it is possible to carry out the project of a self-sustaining sailboat, with good energy autonomy, selecting the most efficient technologies for capturing renewable energy, in addition to high-performance batteries. On the other hand, there is a need to further increase the efficiency of the generation components and find more cost-effective energy storage technologies to reduce the size of the battery bank, thus reducing the total cost of the project.

**Keywords:** Renewable energy. Self-sustaining sailboat. Hybrid photovoltaic system. Sustainability. Energetic balance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Veleiro. ....	18
Figura 2 – Principais parâmetros do veleiro.....	19
Figura 3 – Continuação principais parâmetros do veleiro. ....	19
Figura 4 – Células de silício cristalino.....	22
Figura 5 – Densidade energética das baterias de diferentes tecnologias. ....	27
Figura 6 – Sistema fotovoltaico isolado.....	28
Figura 7 – Sistema fotovoltaico Híbrido.....	29
Figura 8 – Espiral de Evans veleiro.....	31
Figura 9 – Sistema de ondas.....	33
Figura 10 – Métodos para estimar a resistência ao avanço.....	34
Figura 11 – Planos de balizas modelos base. ....	35
Figura 12 – Gráfico para estimar a resistência de ondas em mar agitado. ...	38
Figura 13 – Curvas $K_q$ , $K_t$ , $J$ e $n_0$ .....	42
Figura 14 – Diagrama de Burril. ....	43
Figura 15 – Estimativa resistência ao avanço por meio da série Delft.....	46
Figura 16 – Arranjo do sistema de propulsão elétrica Twin ServoProp. ....	51
Figura 17 – Curva de potência motorização segundo fabricante.....	52
Figura 18 – Variação HSP em diferentes condições climáticas. ....	56
Figura 19 – Mapa da fome.....	57
Figura 20 – Local selecionado para obtenção dos dados de radiação. ....	58
Figura 21 – Paineis fotovoltaicos instalados na região de popa.....	63
Figura 22 – Filmes fotovoltaicos instalados no coachroof.....	64
Figura 23 – Veleiro com painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas. ....	65
Figura 24 – Curva de potência gerador eólico.....	67
Figura 25 – Curva de geração dos hidrogenadores. ....	67
Figura 26 – Configuração do sistema fotovoltaico híbrido.....	69
Figura 27 – Produção elétrica mensal das diferentes fontes.....	74
Figura 28 – Coeficientes para gerar as curvas de série B.....	81
Figura 29 – Gráficos do hélice de duas pás.....	83
Figura 30 – Gráficos dos hélices de 3 pás.....	84
Figura 31 – Gráficos dos hélices de 4 pás.....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de veleiros e fatores de projeto. ....	30
Tabela 2 – Intervalos de variação dos parâmetros na série Delft. ....	35
Tabela 3 – Intervalos de variação dos parâmetros na série B. ....	41
Tabela 4 – Resistência do vento no casco, mastro, estaiamento e total. ....	47
Tabela 5 – Parcelas de resistência e resistência total. ....	48
Tabela 6 – Coeficientes, velocidade de avanço e força propulsiva. ....	48
Tabela 7 – Dados hélice propulsor selecionado. ....	49
Tabela 8 – Torque necessário para mover o hélice e potência requerida. ....	49
Tabela 9 – Embarcações semelhantes que utilizam a mesma motorização. ....	51
Tabela 10 – Comparação potência estimada e a fornecida pelo fabricante. ....	53
Tabela 11 – Cargas elétricas veleiro. ....	54
Tabela 12 – Média mensal de radiação diária no local selecionado. ....	58
Tabela 13 – Média mensal da velocidade do vento no local selecionado. ....	59
Tabela 14 – Média mensal da velocidade da água. ....	59
Tabela 15 – Demanda energética diária. ....	60
Tabela 16 – Dados painéis e filmes fotovoltaicos. ....	66
Tabela 17 – Relação potência gerada e velocidade do vento. ....	66
Tabela 18 – Dados técnicos bateria e do inversor selecionados. ....	68
Tabela 19 – Demanda energética diária. ....	71
Tabela 20 – Melhores soluções encontradas pelo software. ....	72
Tabela 21 – Média da produção anual de eletricidade. ....	73
Tabela 22 – Consumo médio anual das cargas. ....	73
Tabela 23 – Dados do banco de baterias. ....	74
Tabela 24 – Custos do projeto. ....	75
Tabela 25 – Constantes $a_n$ série Delft. ....	80
Tabela 26 – Constantes $a_n$ série Delft. ....	80
Tabela 27 – Dados seleção hélice. ....	82

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

BEN – Balanço Energético Nacional

CFD – Computational Fluid Dynamics

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

IEA – International Energy Agency

ITTC – International Towing Tank Conference



## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_e$	Área expandida	[m <sup>2</sup> ]
$A_0$	Área do disco	[m <sup>2</sup> ]
$A_p$	Área projetada	[m <sup>2</sup> ]
$A_W$	Área Molhada	[m <sup>2</sup> ]
$A_{WL}$	Área de linha d'água	[m <sup>2</sup> ]
$B$	Boca	[m]
$B_{MAX}$	Boca máxima	[m]
$B_{WL}$	Boca na linha d'água	[m]
$C_{AH}$	Coefficiente de resistência do vento no casco	[adm]
$C_{AM}$	Coefficiente de resistência do vento no mastro	[adm]
$C_{AR}$	Coefficiente de resistência do vento no estaiamento	[adm]
$C_B$	Coefficiente de bloco	[adm]
$C_F$	Coefficiente de atrito	[adm]
$C_p$	Coefficiente prismático	[adm]
$F_F$	Borda livre região de proa	[adm]
$Fr$	Número de Froude	[adm]
$LCB$	posição do centro de empuxo longitudinal	[m]
$L_{cc}$	Quantidade de energia consumida diariamente em corrente contínua	[Wh]
$L_{ca}$	Quantidade de energia consumida diariamente em corrente alternada	[Wh]
$D$	Diâmetro do hélice	[m]
$g$	Aceleração da gravidade	[m <sup>2</sup> /s]
$J$	Coefficiente de avanço	[adm]
$K_Q$	Coefficiente de torque do hélice	[adm]
$K_T$	Coefficiente de empuxo do hélice	[adm]
$L_M$	comprimento do mastro	[m]
$LOA$	comprimento total da embarcação	[m]
$L_R$	comprimento dos estais	[m]
$L_{WL}$	comprimento na linha d'água	[m]
$\nabla$	Volume deslocado	[m]
$mc$	Massa da embarcação	[t]

$n$	Rotação do hélice	[rps]
$\eta_{bat}$	Eficiência da bateria	[%]
$\eta_H$	Eficiência do casco	[%]
$\eta_{inv}$	Eficiência do inversor	[%]
$\eta_0$	Eficiência do hélice em águas abertas	[%]
$\eta_p$	Eficiência total do propulsor	[%]
$\eta_R$	Eficiência relativa rotativa	[%]
$\eta_T$	Eficiência de transmissão	[%]
$\eta_{bat}$	Eficiência da bateria	[%]
$n$	Rotação do hélice	[rps]
$R_A$	Resistência total do vento	[N]
$R_{AH}$	Resistência do vento no casco	[N]
$R_{AM}$	Resistência do vento no mastro	[N]
$R_{AR}$	Resistência do vento no estaiamento	[N]
$R_{AW}$	Resistência adicional de ondas em mar agitado	[N]
$R_F$	Resistência friccional	[N]
$R_n$	Número de Reynolds	[adm]
$R_R$	Resistência residual	[N]
$R_T$	Resistência total	[N]
$P$	Passo do hélice	[und]
$P_D$	Potência requerida	[w]
$P_E$	Potência efetiva	[w]
$T$	Força propulsiva	[N]
$t$	Coefficiente de redução de força propulsiva	[adm]
$t_M$	Espessura média do mastro	[m]
$t_R$	Espessura média dos estais	[m]
$T_c$	Calado de projeto	[m]
$V$	Velocidade de serviço	[m/s]
$V_a$	Velocidade de avanço	[m/s]
$V_{ap}$	Velocidade aparente do vento	[m/s]
$\rho_A$	Densidade do ar	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau_c$	Coefficiente de Burril	[adm]
$\sigma_{0,7}$	Número de cavitação	[adm]

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1. OBJETIVOS .....	15
1.1.1. Objetivo Geral .....	15
1.1.2. Objetivos Específicos .....	16
<b>2. O VELEIRO E SUA MISSÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>21</b>
3.1. ENERGIAS RENOVÁVEIS .....	21
3.1.1. Energia solar fotovoltaica .....	21
3.1.2. Outras fontes de energias renováveis .....	23
3.2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS .....	24
3.2.1. Controladores de carga .....	25
3.2.2. Inversores .....	25
3.2.3. Baterias .....	25
3.2.4. Sistemas fotovoltaicos autônomos .....	27
3.2.5. Sistemas fotovoltaicos isolados .....	28
3.2.6. Sistemas fotovoltaicos híbridos .....	28
3.3. PROJETO DE VELEIROS .....	30
3.3.1. Tipos de veleiros .....	30
3.3.2. Metodologia de projeto .....	31
3.3.3. Resistência ao avanço .....	32
3.3.4. Formas de estimar a resistência ao avanço .....	33
3.3.5. Cálculo da potência requerida, seleção do hélice e do motor .....	39
<b>4. INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE E COMPONENTES ELÉTRICOS</b> .....	<b>46</b>
4.1. INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE .....	46
4.2. COMPONENTES ELETRO/ELETRÔNICOS DO VELEIRO .....	53
<b>5. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO</b> .....	<b>55</b>
5.1. AVALIAÇÃO DOS RECURSOS DE GERAÇÃO .....	55
5.1.2 Avaliação do recurso solar .....	55
5.1.3 Avaliação do recurso eólico .....	58
5.1.4 Avaliação do recurso hídrico .....	59

5.2. LEVANTAMENTO DA DEMANDA E DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA .....	59
5.3. DIMENSIONAMENTO DA GERAÇÃO .....	60
5.4. DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE BATERIAS .....	61
5.5. DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR.....	62
5.6. FONTES DE GERAÇÃO .....	62
<b>5.6.1 Espaços disponíveis nos veleiros para alocação dos geradores.....</b>	<b>63</b>
<b>5.6.2 Painéis/filmes fotovoltaicos, gerador eólico e hidrogerador selecionados .....</b>	<b>65</b>
5.7. BATERIA E INVERSOR SELECIONADOS.....	68
5.8. ANÁLISE SOFTWARE HOMER PRO .....	68
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>72</b>
6.1. BALANÇO ENERGÉTICO.....	72
6.2. AUTONOMIA ENERGÉTICA DO BANCO DE BATERIAS.....	74
6.3. ANÁLISE FINANCEIRA.....	74
<b>7. CONCLUSÃO .....</b>	<b>76</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>80</b>
<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>82</b>

## 1. INTRODUÇÃO

As energias renováveis apesar de estarem em contínua evolução representam hoje apenas 14% do consumo mundial de energia, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2019). Apesar de terem sido a base energética do desenvolvimento tecnológico do século XX, combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás criaram grandes problemas geopolíticos e de poluição, enquanto as energias renováveis não geram esses problemas e vem crescendo mais rapidamente do que o consumo de combustíveis fósseis, o que mostra a importância do estudo e uso potencial das energias renováveis (GOLDEMBERG; PALETTA, 2012).

Além dos problemas já existentes causados pelos combustíveis fósseis, existe um constante aumento da demanda energética. De acordo com a International Energy Agency (IEA, 2019), de 1990 à 2018 houve um aumento de mais de 60% no consumo de energia elétrica por pessoa no mundo. Dessa forma para acompanhar o crescimento do consumo energético, principalmente em países em desenvolvimento, é necessário um uso eficiente da energia e a criação de fontes de energias sustentáveis.

Dentro desse contexto a importância da sustentabilidade energética fica evidente, logo a busca por formas de implementar soluções tecnológicas com emprego de energias renováveis e a disseminação dos conceitos de energias limpas e formas de vida sustentável ao redor do mundo, principalmente em regiões pouco desenvolvidas, se torna fundamental. Na área da mobilidade, uma solução antiga que utiliza por natureza uma fonte de energia renovável são os veleiros, que podem se mover apenas com a força dos ventos.

Os veleiros são um exemplo de como a vida pode ser mais sustentável, no entanto existem a bordo da maioria dos veleiros muitos equipamentos elétricos e eletrônicos, que são alimentados por energia elétrica, além de bombas e um motor a diesel para condições de ventos desfavoráveis e para manobras como atracação. A energia dos componentes eletro/eletrônicos muitas vezes provém de geradores a diesel e é armazenada em baterias, o mesmo acontece no caso de veleiros com motores elétricos que também são alimentados por esse tipo de geradores.

Esse tipo de solução acontece, pois, a captação de energias renováveis como solar e eólica em um veleiro é insuficiente para fornecer a energia necessária para alimentar o motor e os componentes eletrônicos simultaneamente por um longo período. Porém novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas, e as possibilidades de captação energética aumentam com elas, como por exemplo integrar células fotovoltaicas de terceira geração nas velas e no laminado das obras mortas do veleiro, gerando uma área de captação energética muito significativa.

Desta forma, realizando o projeto de um veleiro moderno, pensando na sua capacidade de consumir pouca energia, como ter baixo peso afim de utilizar uma motorização menos potente e ter componentes eletro/eletrônicos de baixo consumo de energia, além de agregar as tecnologias de captação de energias renováveis mais eficientes, será possível aumentar o fornecimento energético de fontes renováveis e possibilitar assim o desenvolvimento de uma embarcação movida por energias renováveis com uma boa autonomia.

Por isso o presente trabalho busca realizar o projeto do sistema fotovoltaico híbrido de um veleiro autossustentável, capaz de se locomover apenas através de energias renováveis, sem utilização de combustíveis fósseis, tendo como propósito divulgar a mensagem da sustentabilidade ao redor do mundo, principalmente nas regiões mais carentes, ensinando os principais conceitos de modo de vida sustentável e auxiliando na orientação e implementação de fontes de energias renováveis nessas localidades.

## 1.1. OBJETIVOS

Para resolver a problemática da necessidade de desenvolver novas tecnologias com energias renováveis e a disseminação de um modo de vida sustentável, propõe-se os seguintes objetivos.

### 1.1.1. Objetivo Geral

Realizar o projeto do sistema fotovoltaico híbrido de um veleiro autossustentável, ou seja, capaz de se locomover apenas utilizando energias renováveis.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Apresentar o veleiro autossustentável.
- Realizar a integração casco-hélice da embarcação.
- Selecionar o motor da embarcação.
- Identificar os componentes eletro/eletrônicos a bordo e seu consumo energético.
- Realizar o projeto do sistema fotovoltaico híbrido da embarcação.
- Efetuar a análise da autonomia do veleiro.
- Efetuar a análise dos custos do sistema.

## 2. O VELEIRO E SUA MISSÃO

O veleiro a ser analisado neste trabalho, foi projetado pelo autor na disciplina EMB5751 Projeto de Veleiros. O projeto do veleiro sustentável tem como objetivo desenvolver uma embarcação cuja principal fonte de energia para locomoção seja a força dos ventos, e todos outros sistemas também sejam alimentados por energias renováveis. A missão da embarcação será promover a sustentabilidade ao redor do mundo, onde uma tripulação formada por especialistas irá navegar os locais mais carentes do mundo, identificando formas de melhorar a qualidade de vida da população da região.

A equipe contará com um agrônomo, que através dos ensinamentos sobre agricultura sustentável poderá nortear os habitantes dessas localidades em como cultivar o próprio alimento. Além dos ensinamentos, serão disponibilizadas sementes e outras ferramentas necessárias para que o processo possa ser iniciado. Também estará presente na equipe um engenheiro, responsável por ensinar conceitos sobre energias renováveis nessas localidades, além de efetuar instalações de painéis solares, geradores eólicos e outras formas de captação de energias limpas.

O autor identifica como principais aspectos que geram uma qualidade de vida desumana em certa parte da população a fome/sede e a ausência de energia elétrica. Desta forma desenvolveu este projeto buscando identificar uma forma de passar a mensagem da sustentabilidade tanto para os países mais desenvolvidos do mundo e as grandes empresas, que produzem uma quantidade enorme de lixo e utilizam de recursos naturais de maneira não sustentável, até as populações mais carentes, que podem encontrar na sustentabilidade uma forma para garantir uma qualidade de vida melhor e uma maior autonomia na vida, não ficando à mercê de governos corruptos e diversos outros fatores que geram uma imensa pobreza ao redor do mundo.

A embarcação foi projetada para ser autossustentável energeticamente e todas as suas características, como as linhas do casco, mastreação e velas, quilha, arranjo, motorização e outras, foram pensadas para satisfazer esse requisito. A Figura 1 apresenta uma imagem do veleiro e as Figuras 2 e 3 os principais parâmetros da embarcação quando totalmente carregada.



Figura 1 – Veleiro.



Fonte: Autor (2022).

Figura 2 – Principais parâmetros do veleiro.

Overall Dimensions			
Length Overall, LOA	18,862 m	Loa / Boa	3,493
Beam Overall, Boa	5,400 m	Boa / D	2,160
Depth Overall, D	2,500 m		
Waterline Dimensions			
Waterline Length, Lwl	17,986 m	Lwl / Bwl	4,316
Waterline Beam, Bwl	4,168 m	Bwl / T	6,547
Navigational Draft, T	0,637 m	D / T	3,927
Volumetric Values			
Displacement	18000,000 kgf	Displ-Length Ratio	86,213
Volume	17,546 m <sup>3</sup>		
LCB	10,255 m	FB/Lwl	0,527
TCB	0,000 m	AB/Lwl	0,473
VCB	0,126 m	TCB / Bwl	0,000
Wetted Surface Area	56,910 m <sup>2</sup>		
Moment To Trim	541,093 kgf-m/cm		

Fonte: Autor (2022).

Figura 1 – Continuação principais parâmetros do veleiro.

Waterplane Values			
Waterplane Area, Awp	53,159 m <sup>2</sup>		
LCF	10,961 m	FF/Lwl	0,567
TCF	0,000 m	AF/Lwl	0,433
Weight To Immerse	545,361 kgf/cm	TCF / Lwl	0,000
Sectional Parameters			
Ax	1,737 m <sup>2</sup>		
Ax Location	10,489 m	Ax Location / Lwl	0,540
Hull Form Coefficients			
Cb	0,368	Cx	0,655
Cp	0,562	Cwp	0,709
Cvp	0,518	Cws	3,204
Static Stability Parameters			
I(transverse)	55,446 m <sup>4</sup>	I(longitudinal)	946,443 m <sup>4</sup>
BMt	3,160 m	BMI	53,942 m
GMt	3,29 m	GMI	54,07 m
Mt	2,950 m	MI	53,732 m

Fonte: Autor (2022).

Como o objetivo do trabalho é realizar a análise da autonomia energética da embarcação, apenas os fatores do projeto relacionados ao dimensionamento do sistema fotovoltaico híbrido serão tratados neste trabalho devido à grande extensão do conteúdo de um projeto de um veleiro.

### **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo serão apresentadas as principais fontes de energias renováveis e a metodologia para desenvolver sistemas com a utilização dessas fontes energéticas. Além disso serão apresentados conceitos de projeto de veleiros, e os aspectos relacionados ao projeto que possibilitam desenvolver uma embarcação mais eficiente energeticamente.

#### **3.1. ENERGIAS RENOVÁVEIS**

##### **3.1.1. Energia solar fotovoltaica**

Um das formas mais promissoras de captação de energia renovável é através da energia gerada pelo sol, que vem crescendo constantemente devido a sua fonte ilimitada e a necessidade por um modo de vida mais sustentável. De acordo com o Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional (BEN) do ano de 2020 (BRASIL, 2020 apud RAMPINELLI; MACHADO, 2021), essa fonte de energia cresceu 92,2% na geração de energia elétrica de 2018 para 2019 no Brasil.

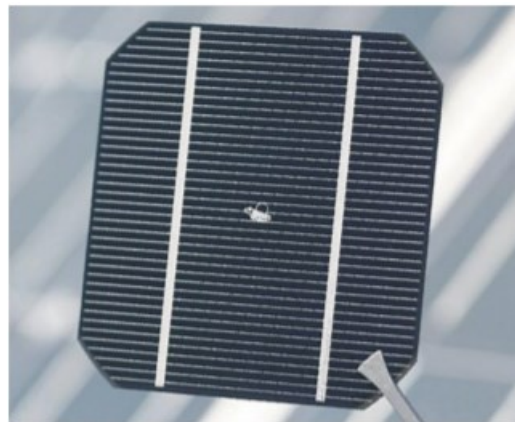
Essa energia é conhecida como solar fotovoltaica, sendo obtida pela conversão direta da luz em eletricidade através do efeito fotovoltaico, por meio de uma célula fotovoltaica, um dispositivo fabricado com material semicondutor, que constitui a unidade fundamental desse processo de conversão (PINHO; GALDINO, 2014). Visto que apenas uma célula produz pouca energia e potência, é gerado o módulo fotovoltaico, através da junção de várias células e sua encapsulação, aumentando assim a sua capacidade energética (SOUZA, 2017 apud RAMPINELLI; MACHADO, 2021).

As principais tecnologias que compõe os sistemas fotovoltaicos podem ser divididas de diferentes formas, dentre elas pela sua maturidade, essa forma de divisão classifica as células em três gerações. A primeira geração é formada por material inorgânico, através de células de silício cristalino, e representam mais de 85% do mercado, possuindo a maior eficiência dentre as três gerações. As células dessa geração podem ser formadas por silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si) (MATSUMOTO, 2013).

Para sua fabricação, a matéria prima utilizada é o silício ultrapuro, podendo ser o silício grau eletrônico (Si-gE) ou o silício grau solar (Si-gS), ambos com nível de pureza acima de 99,99%, sendo obtido através do silício impuro, que é o silício grau metalúrgico (Si-gM), com pureza de ~99%. Já o Si metalúrgico (Si-gM) é obtido através da sílica ( $\text{SiO}_2$ ) em fornos a arco elétrico numa temperatura que pode atingir 1780 °C, utilizando como matéria prima quartzo ou areia e carvão (PINHO; GALDINO, 2014).

Das células fotovoltaicas de silício, as monocristalinas são as que possuem maiores eficiências, enquanto as células de silício policristalino são mais baratas por exigirem um processo de preparação das células menos rigoroso, porém apresentam menor eficiência. As principais características das células de primeira geração são cristal único, wafers ligados, alta eficiência, multicristalina, alto custo e rígidas (MATSUMOTO, 2013). A Figura 4 apresenta uma imagem de uma célula de silício cristalino.

Figura 4 – Células de silício cristalino.



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

Na segunda geração de células fotovoltaicas é aplicado a tecnologia de filmes finos, aproximadamente 12% da produção mundial correspondem a dispositivos com essa tecnologia. Os materiais utilizados na fabricação desses filmes possuem uma alta absorção óptica se comparados com o c-Si, o que permite fabricar células fotovoltaicas bastante finas, nas quais camadas de poucos micrômetros de diferentes materiais semicondutores são depositados sucessivamente, por técnicas de produção em larga escala sobre superfícies rígidas ou flexíveis (PINHO; GALDINO, 2014).

Além disso, as células de filmes finos não ficam restritas aos formatos das células de silício (quadriláteros), o que gera a possibilidade de serem usadas em superfícies amplas e até flexíveis, aumentando as possibilidades de aplicação. Ao contrário das células de silício onde primeiramente são produzidas as lâminas de silício, depois as células e posteriormente os módulos, nos dispositivos de filmes finos esse processo é feito de maneira integrada, sendo os materiais mais utilizados silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), o disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e o telureto de cádmio (CdTe) (PINHO; GALDINO, 2014).

Como desvantagem em comparação com as células de silício, as células de filmes finos apresentam menor eficiência e se degradam mais facilmente, tendo seu tempo de vida reduzido. Já como vantagens apresentam maior facilidade de incorporação dos átomos de diferentes tamanhos e números de coordenação na rede, tendo um processo de fabricação mais simples e de menor custo, além de possuir possibilidade de aplicação em grandes áreas e de ser flexível (CHITTICK; ALEXANDER; STERLING, 1969).

A terceira geração de células fotovoltaicas é composta por materiais orgânicos, onde através da nanotecnologia são formadas finas películas sobre substratos flexíveis (células orgânicas OPV) de múltipla junção. As OPV ainda estão em fase de desenvolvimento, não tendo grande aplicações no mercado devido as suas baixas eficiências de conversão, em torno de 7%. Elas apresentam vantagens como, flexibilidade, transparência, baixo custo de produção devido a tecnologia utilizada e matéria prima barata, grandes áreas de camada fina, entre outros (MATSUMOTO, 2013).

### **3.1.2. Outras fontes de energias renováveis**

A radiação solar é a fonte primária de quase todas energias renováveis, uma vez que essas formas de energias são provenientes de ciclos naturais gerados pela energia solar, sendo, portanto, formas indiretas dessa energia. Por isso são praticamente inesgotáveis e não alteram o balanço térmico do planeta, diferente das energias provenientes de combustíveis fósseis e das grandes hidrelétricas (PACHECO, 2006). As principais fontes de energias renováveis secundárias são energia eólica, hídrica, dos oceanos e biomassa.

A energia eólica é proveniente da energia cinética provocada pelas diferenças de temperaturas na superfície da terra, sendo que cerca de 2% da energia solar incidente na terra é convertida em energia eólica através desse processo. Embora pareça pouco, esse percentual representa centenas de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo (DWIA, 2007, apud CANEPPELE 2007).

Sendo uma fonte de energia limpa e abundante na maior parte do globo, a energia eólica tem aumentado significativamente sua aplicação ao longo dos anos. Segundo (Raimundo et al., 2018), no Brasil por exemplo, o Plano Decenal Brasileiro de Expansão de Energia prevê uma capacidade eólica instalada de 22,4 GW em 2023, dessa forma reduzindo em 5,8% as emissões de dióxido de carbono. Com esse aumento da demanda essa fonte de energia vem atraindo muitos investidores, movimentando a economia do país e aumentando a sua sustentabilidade.

A energia hídrica é proveniente da energia cinética das massas de água de rios e mares, que se movimentam em decorrência de diferenças de temperaturas e/ou de diferenças de altitudes. Para se caracterizarem como energias realmente renováveis, a captação deve ser realizada sem grandes impactos ambientais, o que não ocorre nas grandes hidrelétricas, que acabam gerando um grande desequilíbrio ambiental. Formas de captação de energia hídrica sem gerar tanto desequilíbrio são através de pequenas centrais hidrelétricas que aproveitam a energia de quedas d'água ou por meio de hidrogeradores que aproveitam a energia de correntes naturais ou forçadas.

Da mesma forma que podemos movimentar um barco através da aplicação de um torque no hélice da embarcação, pode-se deixar a embarcação parada na incidência de alguma corrente, que irá produzir certo torque no hélice. Gerando assim energia mecânica que pode ser convertida em energia elétrica (AZEVEDO, 2000). A partir desse princípio, é utilizado em veleiros hidrogeradores que captam a energia do movimento da embarcação enquanto o mesmo utiliza a força dos ventos como propulsão.

### 3.2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Para a captação das energias renováveis com eficiência é necessário o dimensionamento de um sistema fotovoltaico. O mesmo é constituído por um bloco gerador, um bloco de condicionamento de potência e, em algumas situações um bloco de armazenamento. O bloco gerador possui os componentes responsáveis pela

geração da energia, como módulos fotovoltaicos, além dos cabeamentos. O bloco de condicionamento pode contar com inversores, controladores de carga, conversores c.c.-c.c., além de outros dispositivos de proteção, supervisão e controle. Já o bloco de armazenamento contém acumuladores de carga, como as baterias (PINHO; GALDINO, 2014).

### **3.2.1. Controladores de carga**

Controladores de carga são componentes de extrema importância nos sistemas fotovoltaicos, tendo como objetivo principal proteger as baterias contra cargas e descargas excessivas, aumentando assim a sua vida útil. Apesar de certos sistemas poderem operar sem um controlador de carga, na situação onde as cargas elétricas apresentassem pouca variação em seu consumo, os controladores de carga são indispensáveis na maioria dos casos, pois além de proteger a bateria, sua utilização permite a otimização do banco de baterias e seu carregamento (PINHO; GALDINO, 2014).

### **3.2.2. Inversores**

Inversores são equipamentos eletrônicos capazes de transferir energia elétrica de uma fonte que fornece energia de forma contínua, para uma carga que opera em corrente alternada. A corrente contínua pode ser proveniente de fontes como os módulos fotovoltaicos ou baterias. A tensão de saída em corrente alternada, deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequados às cargas a serem alimentadas (PINHO; GALDINO, 2014).

### **3.2.3. Baterias**

Nos sistemas fotovoltaicos desconectados da rede, as baterias são necessárias para armazenar energia, afim de suprir a demanda em situações de captação energética desfavoráveis, como em dias nublados e à noite. No caso dos sistemas conectados à rede, as baterias podem ser utilizadas como uma fonte de armazenamento para suprir a demanda energética em eventuais falhas da rede elétrica (PINHO; GALDINO, 2014). As baterias além de executarem a função de



armazenagem, também possibilitam realizar a descarga energética de acordo com as cargas, que muitas vezes demandam mais energia do que é gerado no sistema.

Existem diversos tipos de sistemas de armazenamento de energia, sendo a bateria eletroquímica a mais utilizada em sistemas fotovoltaicos isolados devido a sua conveniência e eficiência se comparada a outras formas como supercapacitores, indutores com supercondutores e volantes de inércia (PINHO; GALDINO, 2014).

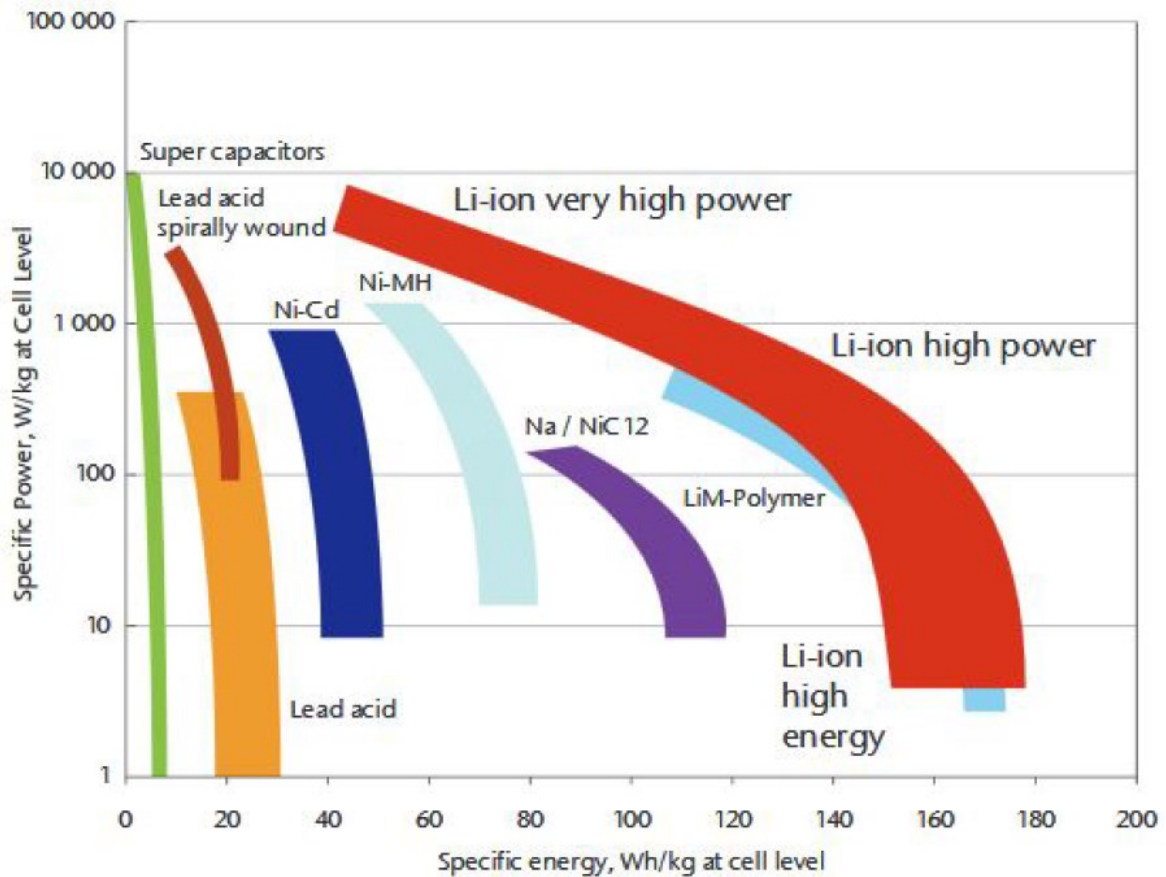
A bateria eletroquímica é formada por um conjunto de células ou vasos eletroquímicos conectados em série ou paralelo, que são capazes de transformar energia elétrica em energia química através de uma reação de oxirredução e armazenar essa energia. Com a bateria carregada, a descarga ocorre por meio de um processo inverso ao descrito, onde a energia química armazenada é então transformada em energia elétrica e uma corrente elétrica é produzida (PINHO; GALDINO, 2014).

O tipo de bateria mais utilizado atualmente é a de Chumbo-ácido (Pb-ácido), devido ao seu melhor custo benefício, se comparada com outras tecnologias mais modernas como Níquel-Cádmio (NiCd), Níquel-hidreto metálico (NiMH), íon de Lítio (Li-ion), que apesar de apresentarem algumas vantagens como maior eficiência, maior vida útil e maior profundidade de carga, não são economicamente viáveis em muitos sistemas fotovoltaicos (PINHO; GALDINO, 2014).

Porém segundo Wang e Zhang (2014 apud TRUDES; MONTEIRO, 2019, p. 40) se tratando de veículos elétricos, as baterias utilizadas devem ser projetadas afim de garantir uma capacidade de armazenamento otimizada, possibilitando uma maior eficiência energética, visto que esses projetos estão diretamente relacionados a sua densidade energética, buscando sempre entregar e armazenar a maior quantidade de energia em um menor peso possível da unidade de armazenamento.

Dessa forma optou-se por utilizar as baterias de lítio no projeto, visto que essas apresentam as maiores densidades energéticas (ou energia específica), armazenando mais energia por peso em comparação aos outros tipos de baterias. A Figura 5 mostra a densidade energética das baterias de diferentes tecnologias, nela pode-se observar que as baterias de lítio, em vermelho do gráfico, possuem uma maior capacidade de armazenamento de energia por kg de bateria.

Figura 5 – Densidade energética das baterias de diferentes tecnologias.



Fonte: Johnson Controls (2007).

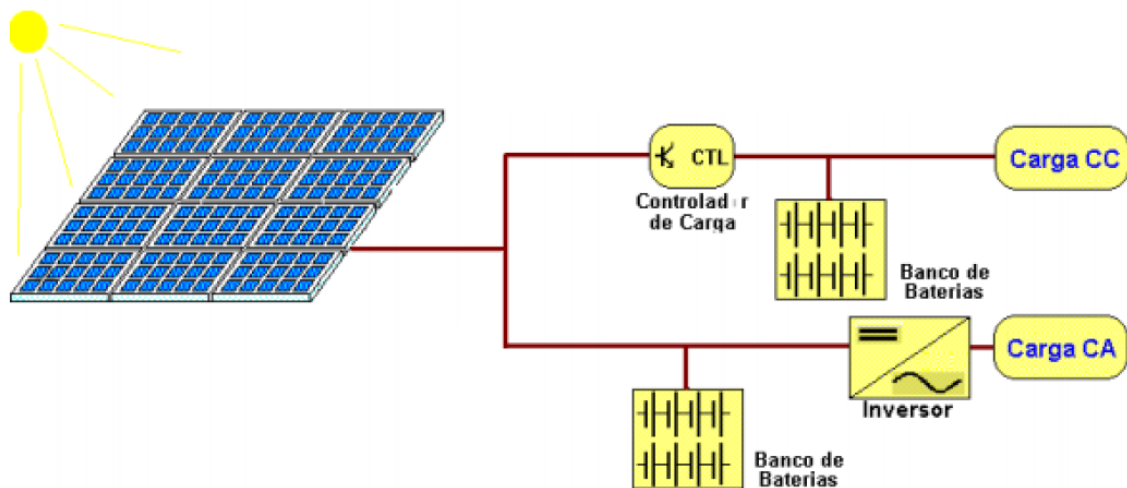
### 3.2.4. Sistemas fotovoltaicos autônomos

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em duas categorias principais: conectados à rede e autônomos. Nos sistemas fotovoltaicos autônomos, não existe conexão com a rede elétrica, dessa forma necessitando de um banco de baterias para armazenamento da energia. Os sistemas autônomos podem ser isolados ou híbridos, onde os sistemas isolados funcionam unicamente a partir de geração fotovoltaica e os híbridos podem contar com outras fontes de geração como uma turbina eólica ou um gerador a diesel (GTES, 2004, apud PARANHOS, 2013). Este trabalho será focado em sistemas fotovoltaicos autônomos, uma vez que o sistema será implementado em um veleiro, que se encontra desconectado da rede elétrica.

### 3.2.5. Sistemas fotovoltaicos isolados

Como já mencionado, os sistemas autônomos funcionam através da geração de energia exclusiva dos painéis fotovoltaicos ou outra fonte de geração de energia solar. Além de uma unidade de geração, este tipo de sistema conta com um controlador de carga, um inversor para cargas que operem em corrente alternada e uma unidade de armazenamento (SEGUEL, 2009, apud PARANHOS, 2013). A Figura 6 apresenta a imagem de um sistema fotovoltaico isolado simplificado.

Figura 6 – Sistema fotovoltaico isolado.

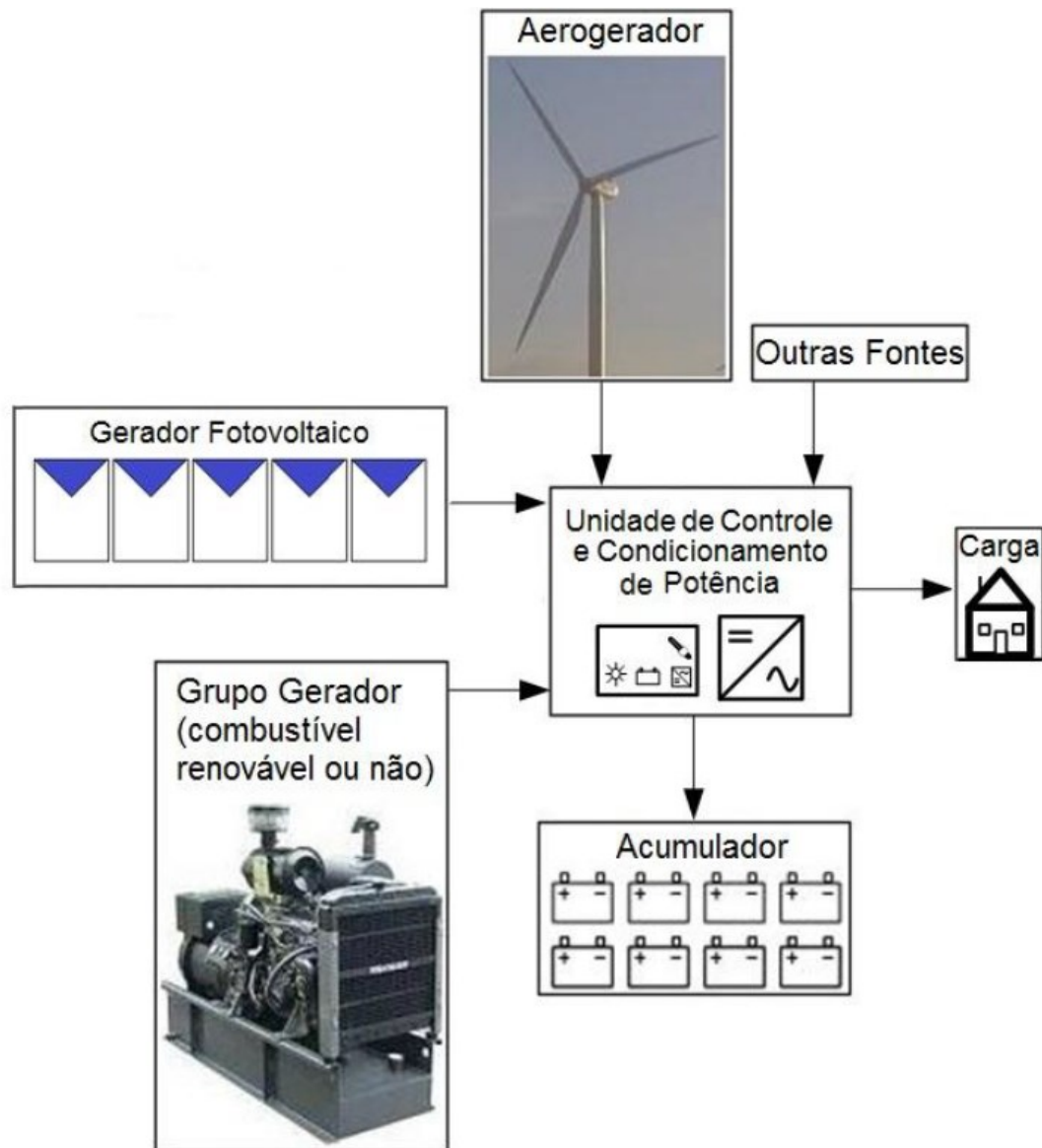


Fonte: GTES (2006).

### 3.2.6. Sistemas fotovoltaicos híbridos

Os sistemas híbridos como já mencionado, possuem outras fontes de captação de energia, além da fonte de captação fotovoltaica, como por exemplo geradores diesel e aerogeradores. Este tipo de sistema apresenta um maior grau de complexidade, devido a necessidade de mais componentes para realizar a integração desses sistemas de captação, sendo possível várias formas de configurações e estratégia de uso de cada fonte de captação (PINHO; GALDINO, 2014). A Figura 7 apresenta um exemplo de um sistema fotovoltaico híbrido.

Figura 7 – Sistema fotovoltaico Híbrido.



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

Este trabalho terá como foco os sistemas fotovoltaicos híbridos, constituídos exclusivamente por energias renováveis: fotovoltaica, eólica e hídrica. Unindo essas fontes de captação, busca-se aumentar a autonomia da embarcação, possibilitando utilizar o motor por um maior período de tempo em condições desfavoráveis de vento, assim como possibilitar um arranjo do sistema de armazenamento com o menor peso possível.

### 3.3. PROJETO DE VELEIROS

#### 3.3.1. Tipos de veleiros

Existem vários tipos de veleiros, cada um deles com atributos característicos, afim de desempenhar requisitos próprios. Os veleiros podem ser divididos em veleiros de cruzeiro, veleiros de regata e veleiros de cruzeiro/regata. Segundo Larsson e Eliasson (2000), o uso pretendido para o veleiro é a primeira consideração a ser feita para se definir o tipo de veleiro a ser projetado. Cada projeto possui um maior nível de compromisso com alguns fatores de projetos, e menor em outros, sendo os principais fatores: navegabilidade, conforto, desempenho e custo (BREWER,1985). A Tabela 1 apresenta a relação de diferentes tipos de veleiros com esses fatores de projeto.

Tabela 1 – Tipos de veleiros e fatores de projeto.

TIPO DE VELEIRO	Navegabilidade	Conforto	Desempenho	Custo
<b>America's cup racer</b>	5%	1%	92%	2%
<b>IOR racer</b>	25%	10%	60%	5%
<b>Club cruiser-racer</b>	25%	20%	35%	20%
<b>Ocean cruiser</b>	30%	30%	20%	20%
<b>Coastal cruiser</b>	25%	25%	25%	25%
<b>Weekender</b>	20%	20%	25%	35%
<b>Daysailer</b>	15%	15%	30%	40%

Fonte: Adaptado de Brewer (1995).

Pela imagem percebe-se que é impossível priorizar certos fatores, sem por consequência sacrificar outros. Os veleiros de regata (racer) buscam mais velocidade, priorizando assim o fator desempenho, sacrificando então fatores como custo e conforto. Já os veleiros de cruzeiro buscam maior conforto e navegabilidade, sacrificando um pouco seu desempenho, enquanto os veleiros de cruzeiro/regata (cruiser-racer) possuem os fatores mais equilibrados.

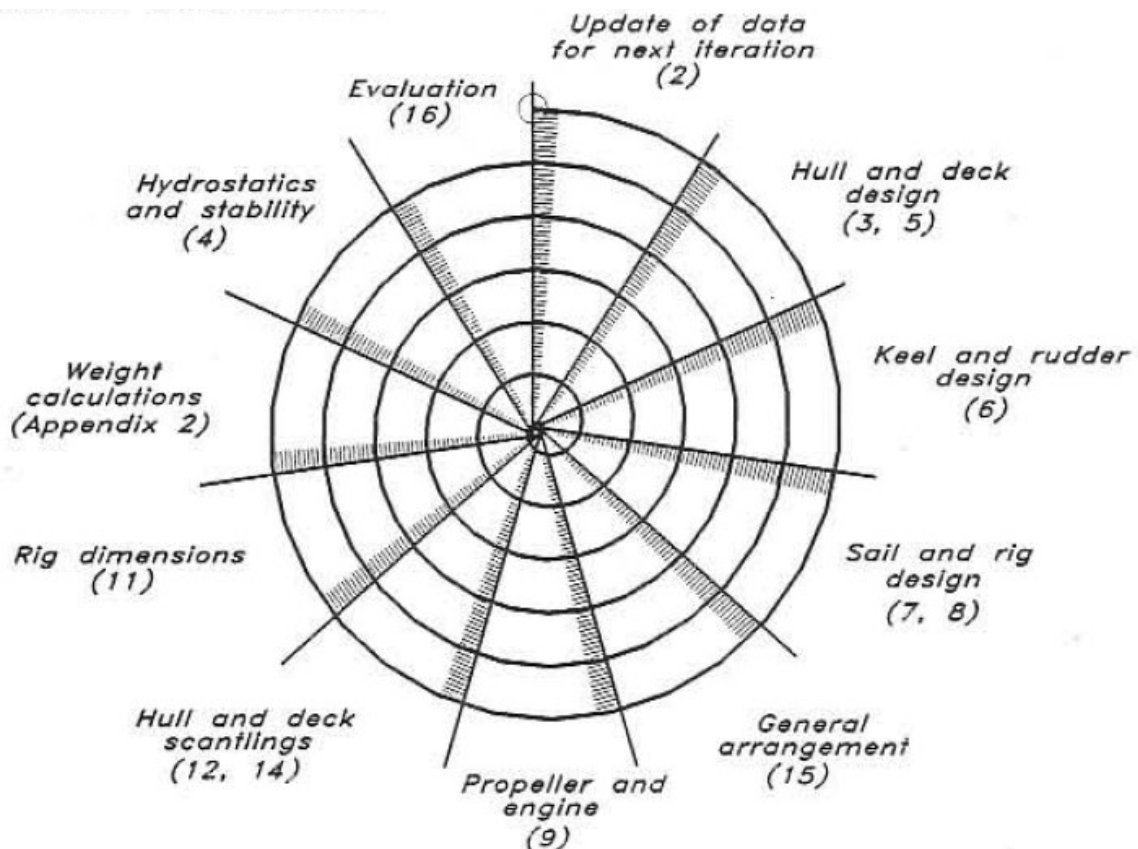
O veleiro desenvolvido neste trabalho possui características de um veleiro de cruzeiro/regata, uma vez que necessita de um bom desempenho, gerando baixa resistência ao avanço e possibilitando assim a utilização de uma motorização com a menor potência possível, uma vez que isso implica diretamente no consumo energético e na capacidade de armazenamento do sistema fotovoltaico, que devem

ser otimizados. Por outro lado, é necessário um nível de conforto para a tripulação, navegabilidade e preço razoáveis.

### 3.3.2. Metodologia de projeto

De acordo com Larsson e Eliasson (2000), o projeto de embarcações é um processo iterativo de tentativa e erro, onde o resultado final tem de satisfazer determinados requisitos estabelecidos no início do projeto. Uma das melhores formas de se representar o processo iterativo do projeto de uma embarcação é através do Espiral de Evans, proposto por Evans (1959), onde as diferentes etapas do projeto são descritas no espiral de forma sequencial e ao final de cada volta do espiral deve ser verificado se os requisitos do projeto foram atendidos. A Figura 8 mostra o Espiral de Evans característico de um projeto de um veleiro.

Figura 8 – Espiral de Evans veleiro.



Fonte: Larsson e Eliasson (2000).

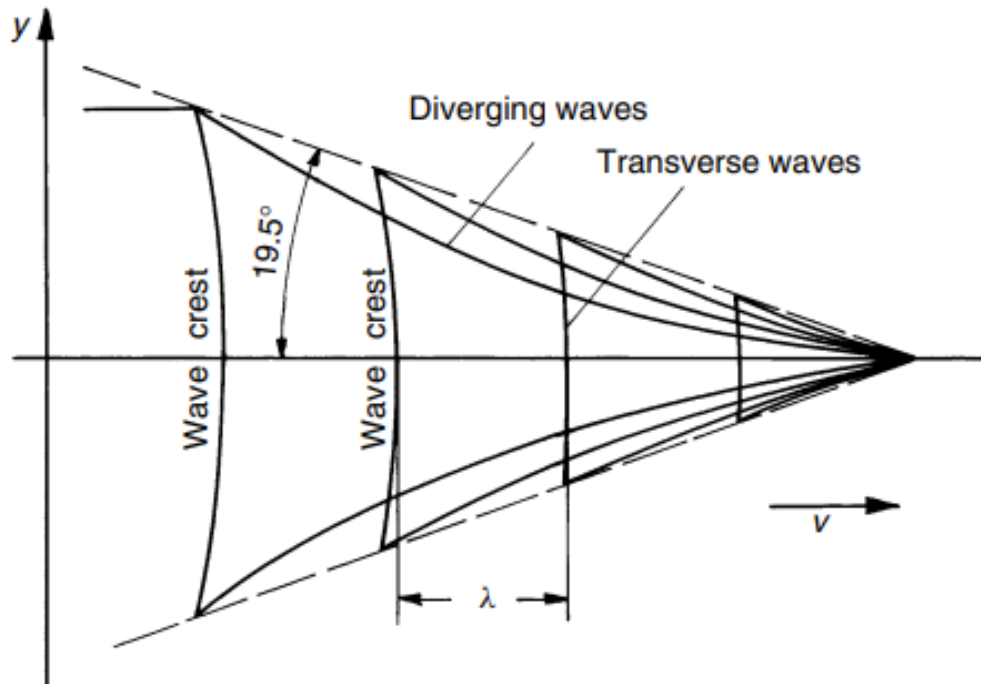
No caso de um veleiro com motorização elétrica autossustentável, algumas outras etapas precisam ser incluídas no espiral, como o dimensionamento do sistema fotovoltaico. Esta etapa depende principalmente da integração casco hélice, representada pela etapa Propeller and engine (9) do espiral apresentado na Figura 5. Nesta etapa, é calculado a força necessária para mover a embarcação na água, chamada de resistência ao avanço, além de selecionar o hélice e o motor capazes de superar essa resistência.

### **3.3.3. Resistência ao avanço**

O projeto de uma embarcação sustentável busca sempre a eficiência, de forma a possibilitar seu deslocamento com o menor gasto energético possível. Por isso deve-se projetar o casco e o propulsor de forma a gerar a menor resistência possível, atendendo os requisitos de projeto (SMIRDELE, 2016, apud MARTINS, 2017). Para se avaliar melhor a resistência, é interessante analisar suas componentes individualmente. Segundo Bertram (2000), a resistência ao avanço total em águas calmas de uma embarcação pode ser dividida em 3 componentes:

- Resistência de fricção (atrito): Devido à viscosidade da água, as partículas de água tendem a acompanhar o movimento da embarcação na região mais próxima ao casco. Com o aumento da distância entre o fluido e o casco, essa influência diminui até o ponto onde o fluido apresenta velocidade nula. Esse processo gera tensões cisalhantes em torno da área submersa do casco da embarcação, tensões essas responsáveis pela resistência de fricção.
- Resistência de pressão viscosa: A forma da embarcação gera um campo de fluxo local com variação da velocidade e das pressões nas diferentes regiões do casco. Esse gradiente de pressões geram a resistência de pressão viscosa.
- Resistência de onda: O movimento da embarcação cria um sistema de ondas, que dificulta a movimentação da mesma e contribui para a resistência total da embarcação. A Figura 9 apresenta uma representação de um sistema de ondas gerados por uma embarcação.

Figura 9 – Sistema de ondas.



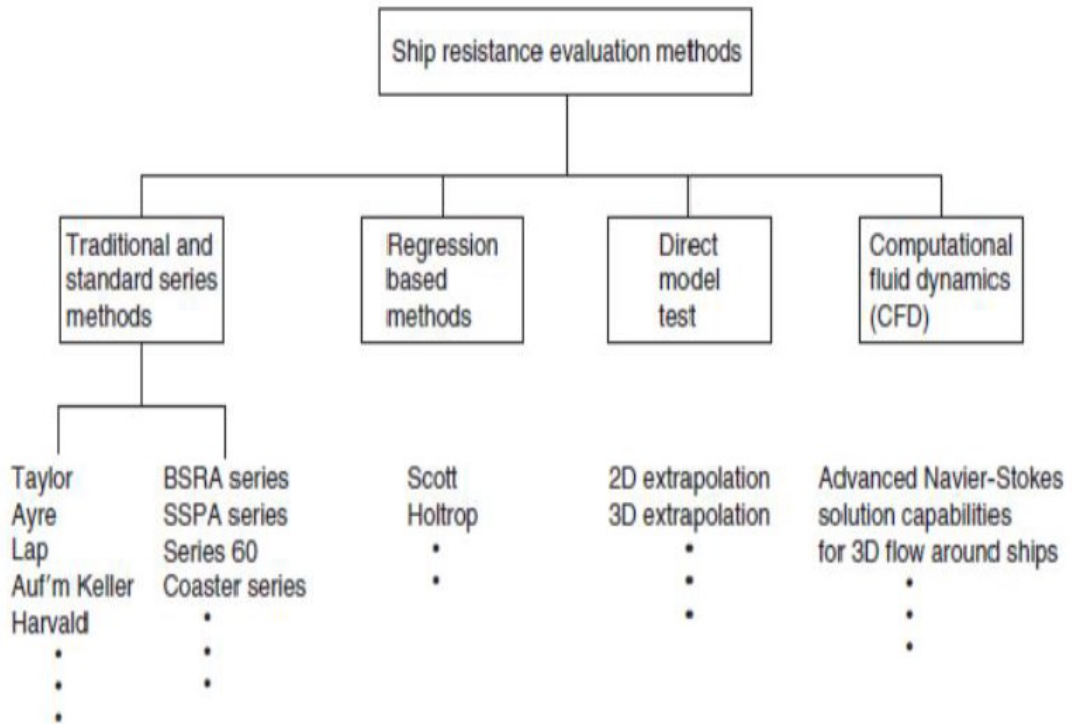
Fonte: Bertram (2000).

### 3.3.4. Formas de estimar a resistência ao avanço

Existem várias formas de estimar a resistência ao avanço de uma embarcação. Fatores como a confiabilidade do resultado, tempo e custo são importantes para tomar a decisão de qual método utilizar. Alguns métodos que podem ser utilizados para essa estimativa são: métodos tradicionais, métodos empíricos, extrapolação a partir de modelos físicos e fluidodinâmica computacional (CFD) (MOLLAND, 2011). A Figura 10 apresenta os possíveis métodos para avaliação da resistência ao avanço.



Figura 10 – Métodos para estimar a resistência ao avanço.

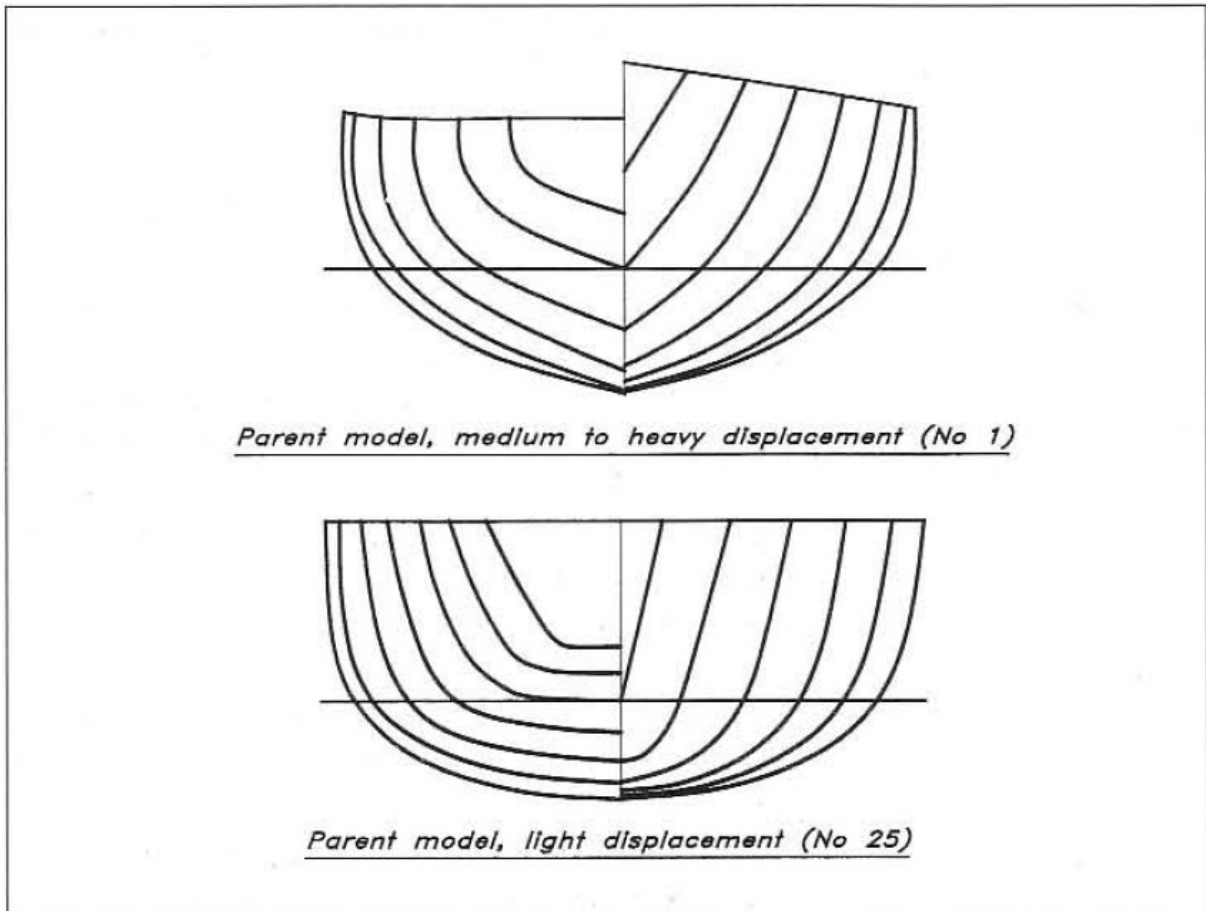


Fonte: Molland (2011).

Visto que métodos como CFD e teste com modelos demandam muito tempo e geram um alto custo, o método utilizado no presente trabalho foi através das séries Delft, que apresenta bons resultados para embarcações do tipo veleiro, com as características semelhantes aos modelos utilizados nas séries. Essas séries foram desenvolvidas pelo Professor J. Gerritsma e colaboradores na Delft University of Technology, através de testes com modelos de veleiros. A primeira série ocorreu durante os anos 70, com 22 modelos e realizando uma variação sistemática de 5 parâmetros que geram grande influência na resistência ao avanço:  $L_{WL}/B_{WL}$ ,  $B_{WL}/T_c$ ,  $C_p$ ,  $LCB$  e  $L_{WL}/\nabla_c^{1/3}$  (LARSSON; ELIASSO, 2000).

Essa primeira série foi desenvolvida para veleiros de regata oceânicos, de médio deslocamento ( $\Delta$ ). Posteriormente observou-se a necessidade de expandir a série para veleiros de baixo deslocamento, então nos anos 80 outra série foi desenvolvida (LARSSON; ELIASSO, 2000). A Figura 11 apresenta os planos de balizas dos modelos base utilizado para as duas séries.

Figura 11 – Planos de balizas modelos base.



Fonte: Larsson e Eliasson (2000).

Desta forma, a partir dos dois cascos base, foram gerados outros 37 modelos, totalizando 39 ao total. Esses modelos foram então testados variando os 5 parâmetros citados anteriormente. A Tabela 2 apresenta os intervalos de variação dos parâmetros.

Tabela 2 – Intervalos de variação dos parâmetros na série Delft.

Parâmetro	Mínimo	Máximo
$L_{WL}/B_{WL}$	2,76	5
$B_{WL}/T_c$	2,46	19,32
$C_p$	0,52	0,6
LCB	0	6
$L_{WL}/\nabla_c^{1/3}$	4,34	8,5

Fonte: Larsson e Eliasson (2000).

Através das séries Delft, várias relações empíricas foram estabelecidas. A partir destas é possível obter a soma da resistência de pressão viscosa e resistência de ondas, que pode ser chamada de resistência residual. Essa soma é efetuada e a resistência residual é encontrada pois as duas parcelas que as compõe são dependentes da geometria 3D do casco, ou seja, de sua forma geométrica. Com essa parcela encontrada, basta calcular a resistência friccional para então se obter a resistência total da embarcação (LARSSON; ELIASSO, 2000).

As fórmulas para se obter a resistência residual foram divididas em duas categorias, relacionadas ao número de Froude ( $Fr$ ), que pode ser calculado pela Equação 1. Para embarcações tipicamente deslocantes, o número de Froude é de até aproximadamente 0,45, que é o caso da grande maioria dos veleiros. Para essa faixa de número de Froude, a fórmula encontrada para se estimar a resistência friccional é apresentada na Equação 2.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (1)$$

$$R_R \cdot \frac{10^3}{(g \cdot m_c)} = a0 + a1 \cdot C_p + a2 \cdot LCB + a3 \cdot \frac{B_{WL}}{T_c} + a4 \cdot \frac{L_{WL}}{\nabla^{\frac{1}{3}}} + a5 \cdot C_p^2 + a6 \cdot C_p \cdot \frac{L_{WL}}{\nabla^{\frac{1}{3}}} + a7 \cdot LCB^2 + a8 \cdot \left(\frac{L_{WL}}{\nabla^{\frac{1}{3}}}\right)^2 + a9 \cdot \left(\frac{L_{WL}}{\nabla^{\frac{1}{3}}}\right)^3 \quad (2)$$

Em que:

- $g$ : aceleração da gravidade, considerada 9,81 [m/s<sup>2</sup>];
- $L$ : Comprimento da embarcação [m];
- $V$ : velocidade da embarcação [m/s];
- $m_c$ : massa da embarcação [t];
- $C_p$ : coeficiente prismático [adm];
- $LCB$ : posição do centro de empuxo longitudinal [m];
- $B_{WL}$ : boca na linha d'água [m];
- $T_c$ : calado [m];
- $L_{WL}$ : comprimento na linha d'água [m];
- $\nabla$ : volume deslocado [m<sup>3</sup>];

- Os coeficientes  $a_n$  variam de acordo com o número de Froude e podem ser verificados no Apêndice A

Após a realização do cálculo da Resistência residual, basta calcular e somar a resistência friccional da embarcação para se obter a resistência total. Essa parcela pode ser calculada pelo modelo de placa plana desenvolvido pela International Towing Tank Conference (ITTC, 1957), encontrando primeiramente o coeficiente de atrito  $C_F$ , dependente do número de Reynolds  $R_n$ , por meio da Equação 3, para então calcular a resistência friccional através da Equação 4.

$$C_F = \frac{0,075}{\log_{10}(R_n - 2)^2} \quad (3)$$

$$R_F = \frac{1}{2} C_F \rho A_W V^2 \quad (4)$$

Onde  $A_W$  representa a área molhada da embarcação e  $\rho$  a densidade e  $V$  a velocidade da embarcação.

De acordo com Larsson e Eliasson (2000), para fazer a seleção do hélice é interessante adicionar na resistência uma parcela referente a resistência do vento e de ondas em mar agitado. A parcela de resistência do vento pode ser representada pela soma da resistência gerada pelo vento que incide no casco, no mastro e no estaiamento, conforme a Equação 5.

$$R_A = R_{AH} + R_{AM} + R_{AR} \quad (5)$$

Onde  $R_{AH}$  é a parcela de resistência do vento no casco e pode ser obtida através da Equação 6.  $R_{AM}$  é a resistência do vento no mastro e pode ser obtida pela Equação 7.  $R_{AR}$  é a resistência do vento no estaiamento e pode ser obtida pela equação 8

$$R_{AH} = \frac{1}{2} \rho_A V_{ap}^2 C_{AH} B_{MAX} F_F \quad (6)$$

Onde:  $\rho_A$ : densidade do ar ( $\sim 1,29 \text{ kg/m}^3$ );  $V_{ap}$ : velocidade aparente do vento;  $C_{AH}$ : coeficiente de resistência do vento no casco;  $B_{MAX}$ : boca máxima;  $F_F$ : Bordalivre região de proa.

$$R_{AM} = \frac{1}{2} \rho_A V_{ap}^2 C_{AM} t_M L_M \quad (7)$$

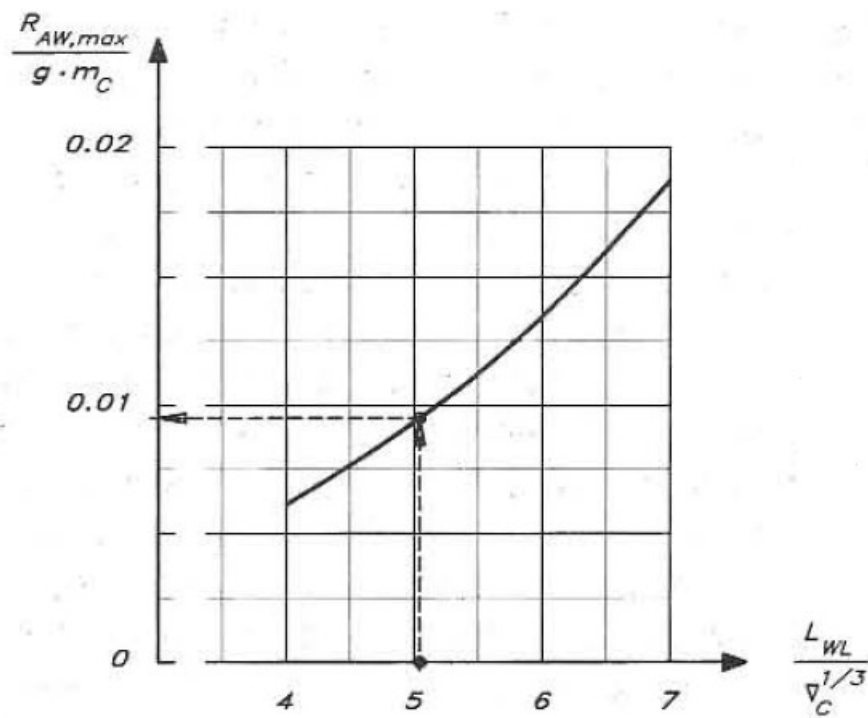
Onde:  $C_{AM}$ : coeficiente de resistência do vento no mastro;  $t_M$ : espessura média do mastro;  $L_M$ : comprimento do mastro.

$$R_{AR} = \frac{1}{2} \rho_A V_{ap}^2 C_{AR} t_R L_R \quad (8)$$

Onde:  $C_{AR}$ : coeficiente de resistência do vento no estaiamento;  $t_R$ : espessura média dos estais;  $L_{MR}$ : comprimento dos estais.

A parcela de ondas em mar agitado  $R_{AW}$  pode ser obtida através de uma análise gráfica segundo Larsson e Eliasson (2000). A Figura 12 apresenta o gráfico para realizar essa estimativa.

Figura 12 – Gráfico para estimar a resistência de ondas em mar agitado.



Fonte: Larsson e Eliasson (2000).

Para obter o valor basta entrar no gráfico com o valor da razão  $\frac{L_{WL}}{\sqrt[3]{\Delta_C}}$  no eixo das abscissas e traçar uma linha vertical até cruzar a curva, encontrando assim a sua

posição no eixo das ordenadas. Isolando  $R_{AW}$  da razão é obtido o valor da resistência adicional de ondas em mar agitado. Somando as parcelas de resistência do vento e de ondas em mar agitado à resistência total obtida em mar calmo, encontra-se a resistência total na condição de mar agitado.

### 3.3.5. Cálculo da potência requerida, seleção do hélice e do motor

Após a obtenção da resistência ao avanço da embarcação, é possível encontrar a potência requerida para mover a embarcação, multiplicando a resistência por sua velocidade, como mostra a Equação 9. No entanto existem muitas perdas entre o motor e o hélice, que precisam ser levadas em consideração para se selecionar a potência necessária da instalação propulsora, sendo contabilizadas por meio dos coeficientes de propulsão. Os coeficientes de propulsão formam o elo entre a potência efetiva requerida para mover o navio e a potência entregue pelo motor ao hélice (MOLLAND, 2011).

$$P_E = V \cdot R_T \quad (9)$$

Segundo Trindade (2012) ocorre um aumento da resistência da embarcação devido a presença do hélice, que gera atrito e uma diminuição da pressão na região onde o hélice está localizado. O aumento dessa resistência é representado como uma redução da força propulsiva. Dessa maneira a força propulsiva  $T$  é maior que a resistência  $R_T$  e pode ser estimada pela Equação 10. Nesta,  $t$  corresponde ao coeficiente de redução da força propulsora e pode ser estimado pela Equação 11 para embarcações genéricas de hélice único.

$$T = \frac{R_T}{(1 + t)} \quad (10)$$

$$t = 0,5\omega \quad (11)$$

Onde  $\omega$  representa o coeficiente de esteira, que contabiliza outra perda de potência, relacionando a velocidade do navio com a velocidade em que o fluxo de água é entregue ao propulsor. Essa velocidade relativa entre hélice e água, é

chamada de velocidade de avanço Brinati (2010). A mesma se forma devido a viscosidade do fluido, que gera uma esteira na popa da embarcação. A relação entre a velocidade de operação da embarcação e a velocidade de avanço é dada pela Equação 12.

$$V_a = V(1 - \omega) \quad (12)$$

Onde  $V$  é a velocidade da embarcação,  $V_a$  a velocidade de avanço e  $\omega$  o coeficiente de esteira. Para se estimar o coeficiente de esteira, pode-se utilizar formulações empíricas, como a proposta por Taylor apud Molland (2011), em que o coeficiente de esteira varia com o coeficiente de bloco  $C_B$ , como mostrado na Equação 13.

$$\omega = 0,5C_B - 0,05 \quad (13)$$

A partir dos coeficientes de esteira e o coeficiente de redução da força propulsiva, pode-se obter a eficiência do casco, que relaciona a potência efetiva e a potência fornecida pelo hélice, através da Equação 14.

$$\eta_H = \frac{(1 - t)}{(1 - \omega)} \quad (14)$$

Outro fator que precisa ser contabilizado para chegar na potência final é a eficiência do propulsor em águas abertas. Essa pode ser obtida através de curvas características do hélice, formadas a partir de coeficientes adimensionais. As fórmulas 15, 16 e 17 apresentam esses coeficientes.

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (15)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (16)$$

$$J = \frac{V_a}{nD} \quad (17)$$

Sendo  $J$  o coeficiente de avanço,  $K_T$  o coeficiente de empuxo,  $K_Q$  o coeficiente de torque,  $n$  a rotação do hélice e  $D$  o diâmetro do hélice. Esses parâmetros ditam o desempenho do hélice e com eles é possível obter a eficiência do propulsor em águas abertas  $\eta_0$  apresentada na Equação 18.

$$\eta_0 = \frac{JK_T}{2\pi K_Q} \quad (18)$$

Para obtenção dos coeficientes e da eficiência do propulsor em águas abertas, será utilizado uma série sistemática de ensaios com hélices propulsores, variando os principais parâmetros que influenciam na sua eficiência. A série escolhida é a série de Wageningen. A série de Wageningen, também chamada de série B, é formada pelo resultado de ensaios com 120 hélices, tendo seus trabalhos iniciados em 1940, sendo uma das séries sistemáticas mais populares, tendo diversas aplicações (TRINDADE, 2012). A variação dos parâmetros realizada na série é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Intervalos de variação dos parâmetros na série B.

<b>Número hélices</b>	120
<b>P/D</b>	0,5 - 1,4
<b>A<sub>e</sub>/A<sub>0</sub></b>	0,3 - 1,5
<b>Z</b>	2 - 7

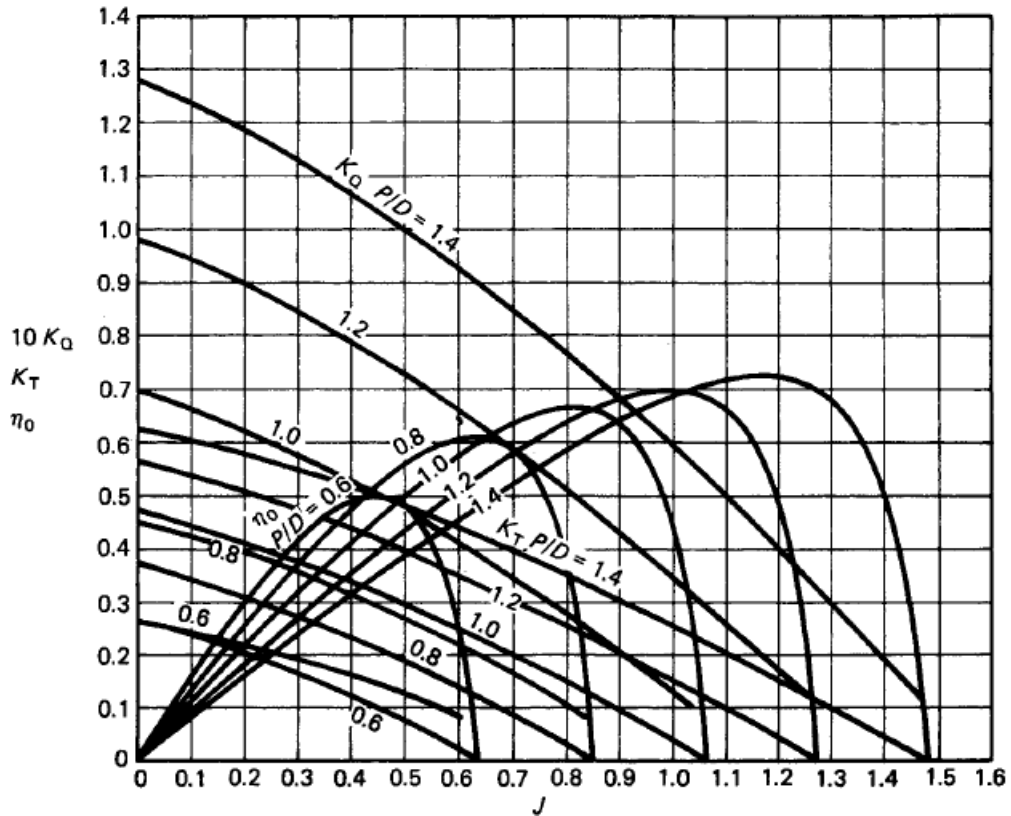
Fonte: Carlton (2012).

Onde P/D representa a relação passo/diâmetro, A<sub>e</sub>/A<sub>0</sub> é a razão entre áreas e Z o número de pás.

Para cada razão de áreas e número de pás, os valores dos coeficientes K<sub>q</sub>, K<sub>t</sub>, J e  $\eta_0$  são apresentados de forma gráfica, um exemplo é mostrado na Figura 13.



Figura 13 – Curvas Kq, Kt, J e n0.



Fonte: Molland (2011).

Para facilitar a otimização na seleção do hélice, Oosterveld e Van Oossanen (1975) desenvolveram funções polinomiais através de uma análise de regressão dos dados originais dos testes que compõem a série B. Dessa forma os valores que Kq e Kt podem ser calculados por esses polinômios de acordo as Equações 19 e 20, e os gráficos podem ser gerados por métodos computacionais.

$$K_Q = \sum_{n=1}^{47} C_n (J)^{S_n} \left(\frac{P}{D}\right)^{t_n} \left(\frac{A_e}{A_0}\right)^{u_n} (Z)^{v_n} \quad (19)$$

$$K_T = \sum_{n=1}^{39} C_n (J)^{S_n} \left(\frac{P}{D}\right)^{t_n} \left(\frac{A_e}{A_0}\right)^{u_n} (Z)^{v_n} \quad (20)$$

Onde  $C_n$ ,  $S_n$ ,  $t_n$ ,  $u_n$  e  $v_n$  são constantes, mostradas no Anexo B.

Para se obter a máxima eficiência do hélice para um certo gráfico da série B, deve-se variar o valor de J encontrando os valores de  $K_{Tcasco}$  e assim a eficiência de

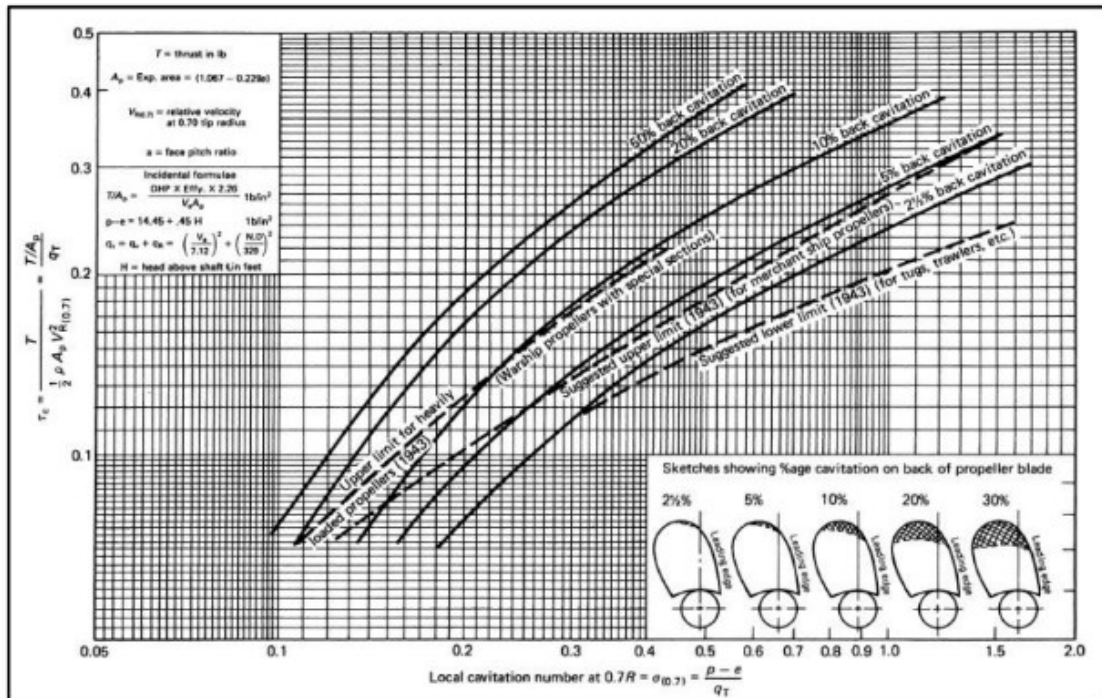
cada ponto, selecionando-se a maior eficiência encontrada. O valor de  $K_{Tcasco}$  depende de  $J$  e pode ser obtido pela equação 21.

$$K_{Tcasco} = \frac{T}{\rho V_a^2 D^2} J^2 \quad (21)$$

Após selecionar o hélice de maior rendimento, deve-se verificar se o mesmo atende aos critérios de cavitação. O processo de cavitação ocorre devido a formação e implosão de bolhas de vapor d'água geradas através da baixa pressão provocada pela alta velocidade de rotação do hélice. A cavitação que ocorre nas pás durante seu funcionamento gera erosão, ruído, vibrações e perda de força propulsiva, prejudicando o funcionamento do propulsor (MOLLAND, 2011).

Uma forma de avaliar se o nível de cavitação do propulsor é aceitável, é através do diagrama de Burril, que determina o limite da porcentagem de cavitação aceitável no hélice. O diagrama de Burril foi criado através de ensaios em túneis de cavitação com modelos de hélices em escala real com geometrias diferentes (MOLLAND, 2011). A partir dos testes foi então gerado o diagrama apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Diagrama de Burril.



Fonte: Carlton (2012).

O diagrama pode ser analisado através do coeficiente de Burril ( $\tau_c$ ) e do número de cavitação ( $\sigma_{0,7}$ ) do hélice, comparando esses com a curva do diagrama mais adequada para a embarcação projetada. O coeficiente de Burril ( $\tau_c$ ) e o número de cavitação ( $\sigma_{0,7}$ ) podem ser obtidos através das Equações 22 e 23 respectivamente.

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

Onde:  $P_{atm}$ : pressão atmosférica;  $P_V$ : pressão de vapor de água na região de navegação;  $h$ : a profundidade onde o propulsor está localizado;  $V_R$ : velocidade composta pela velocidade do fluido e a velocidade radial causada pela rotação do propulsor, sendo a velocidade local a 0,7 do raio do hélice, calculada através da Equação 24.

$$\sigma_{0,7} = \frac{T}{0,5\rho A_P V_R^2} \quad (23)$$

Onde  $A_P$  é a área projetada do hélice e pode ser obtida através da Equação 25.

$$V_R = \sqrt{(V_a^2 + (0,7\pi nD)^2)} \quad (24)$$

$$A_P = A_e(1,067 - 0,229 P/D) \quad (25)$$

Onde  $A_e$  é a área expandida do hélice.

Além das perdas já citadas, outras ainda são geradas devido a outras eficiências. A eficiência relativa rotativa  $\eta_R$  é um fator que afeta a eficiência do hélice, devido ao fato do escoamento não ser constante nessa região e nem perpendicular à área das pás, ou seja, relaciona a perda de eficiência do propulsor quando não está operando em águas abertas (ROH, 2018). Essa eficiência pode ser encontrada pela formulação de Holtrop e Mennen (1982), para embarcações equipadas com um único hélice, representada pela Equação 26.

$$\eta_R = 0,9737 + 0,111(C_p - 0,0225LCB) - 0,06325P/D \quad (26)$$

Com essas eficiências, define-se a eficiência total do propulsor  $\eta_p$  pela Equação 27.

$$\eta_p = \eta_0 \eta_H \eta_R \quad (27)$$

Essa eficiência representa a relação entre a potência efetiva  $P_E$  e a potência absorvida pelo hélice  $P_D$ , como mostra a Equação 28.

$$\eta_p = \frac{R_T V}{2\pi n Q} = \frac{P_E}{P_D} \quad (28)$$

A potência entregue pelo motor e absorvida pelo hélice  $P_D$  para mover o navio a uma dada velocidade  $V$  é dada pela Equação 29.

$$P_D = 2\pi n Q \quad (29)$$

Onde  $Q$  e  $n$  representam o torque e a rotação no hélice propulsor. O torque  $Q$  necessário para mover o hélice funcionando atrás de uma embarcação pode ser representado pela Equação 30.

$$Q = K_Q \rho n^2 D^2 \quad (30)$$

Dessa forma, após selecionar o hélice com maior rendimento através dos gráficos da série B, basta encontrar o valor de  $K_Q$  correspondente do hélice selecionado e então encontra-se  $Q$  pela Equação 30 e  $P_D$  pela Equação 29.

Por fim, ainda deve ser contabilizada a eficiência de transmissão  $\eta_T$ , relacionada a perdas de potência geradas na transmissão entre o motor e o hélice. Com o desenvolvimento atual dos sistemas de transmissão as eficiências são bem altas, por volta de 0,95 à 0,99 (BRINATI, 2010).

Após encontrado o valor de  $P_D$  e aplicado a perda relativa à eficiência de transmissão, o valor da potência necessária na motorização é encontrada e o motor pode ser selecionado.

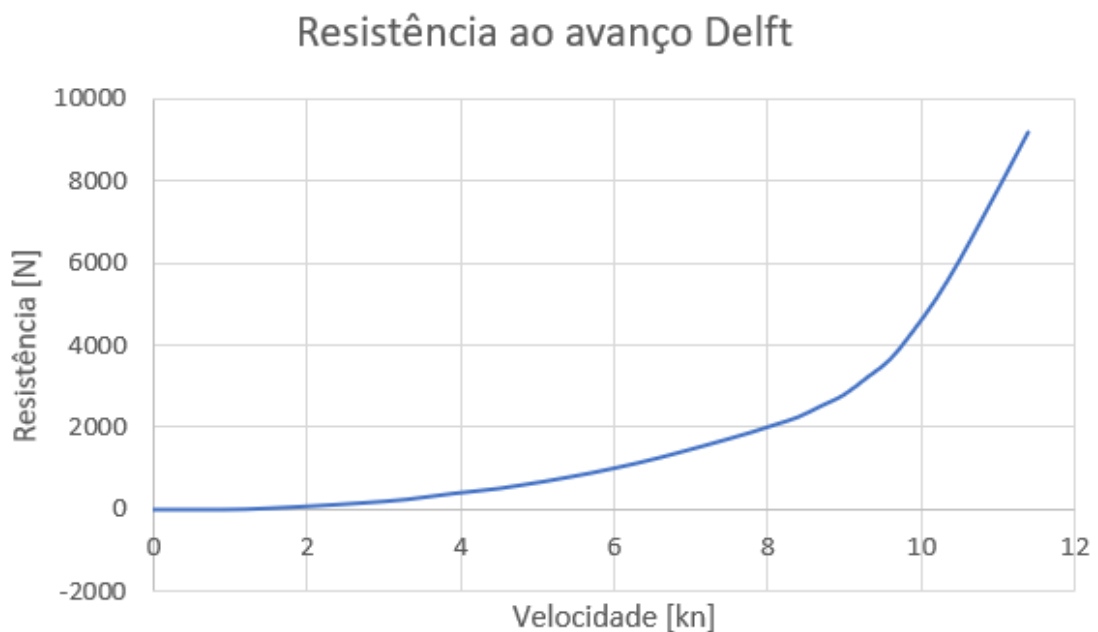
## 4. INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE E COMPONENTES ELÉTRICOS

### 4.1. INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE

Como comentado no capítulo anterior, a etapa de integração casco-hélice é de fundamental importância para o dimensionamento do sistema fotovoltaico híbrido do veleiro, visto que a principal carga do sistema é o motor elétrico da embarcação, que é selecionado a partir dessa etapa do projeto. O primeiro passo desse processo é a estimativa da resistência ao avanço da embarcação.

Para aplicação do método de estimativa de resistência ao avanço da série Delft discutido na fundamentação teórica, foi utilizado o software MaxSurf Resistance e também através da implementação da formulação no software Excel. Os valores ficaram bem próximos com a utilização das duas ferramentas, optou-se por utilizar os dados obtidos pelo software MaxSurf, visto que esses apresentavam maiores valores de resistência, deixando o projeto um pouco mais conservador. Na Figura 15 é apresentado a curva de Resistência ao avanço x Velocidade da embarcação.

Figura 15 – Estimativa resistência ao avanço por meio da série Delft.



Fonte: Autor (2022).

Após estimar a resistência do casco em mar calmo através da série Delft, foi encontrado o valor da componente de resistência do vento para mar calmo e para mar agitado. Para mar calmo foi estimado um valor da velocidade real do vento de 15 nós e para mar agitado de 30 nós, assim para obter a velocidade do vento aparente basta somar esses valores à velocidade de navegação.

Para a seleção da motorização optou-se por considerar 3 situações de navegação da embarcação. Uma em baixa velocidade, para situações de manobra e necessidade de grandes períodos de navegação no motor estabelecida em 6 nós, outra para velocidade de cruzeiro, estabelecida em 8 nós e outra para velocidade máxima da embarcação em 9,8 nós. A Tabela 4 apresenta os valores da resistência do vento para o casco, mastro, estaiamento e resistência total do vento para as 3 faixas de velocidade da embarcação em mar calmo e em mar agitado.

Tabela 4 – Resistência do vento no casco, mastro, estaiamento e total.

<b>Mar calmo</b>				
	$R_{AH}[N]$	$R_{AM}[N]$	$R_{AR}[N]$	$R_A[N]$
<b>6 nós</b>	365,4059701	417,2845954	135,3355445	918,02611
<b>8 nós</b>	437,9564603	500,1354639	162,2060964	1100,298021
<b>9,8 nós</b>	509,7093747	582,0755205	188,7812499	1280,566145
<b>Mar agitado</b>				
	$R_{AH}[N]$	$R_{AM}[N]$	$R_{AR}[N]$	$R_A[N]$
<b>6 nós</b>	1074,70762	1227,289566	398,0398592	2700,037045
<b>8 nós</b>	1196,864823	1366,790075	443,2832676	3006,938165
<b>9,8 nós</b>	1313,889847	1500,429764	486,6258694	3300,945481

Fonte: Autor (2022).

Por fim foi encontrado o valor da parcela adicional de resistência provocada por ondas em mar agitado. Essa parcela foi considerada constante para todas as velocidades de operação. A Tabela 5 apresenta as parcelas de resistência e a resistência total em mar calmo e em mar agitado para as 3 velocidades de operação da embarcação.

Tabela 5 – Parcelas de resistência e resistência total

<b>Mar calmo</b>			
	<b>6 nós</b>	<b>8 nós</b>	<b>9,8 nós</b>
$R_{DELFT}$ [N]	1006,82	2007,35	4086,83
$R_A$ [N]	918,02611	1100,298021	1280,566145
$R_{Total}$ [N]	1645,152651	2772,422088	4977,248229
<b>Mar agitado</b>			
	<b>6 nós</b>	<b>8 nós</b>	<b>9,8 nós</b>
$R_{DELFT}$ [N]	1006,82	2007,35	4086,83
$R_A$ [N]	2700,037045	3006,938165	3300,945481
$R_{AW}$ [N]	2060,1	2060,1	2060,1
$R_{Total}$ [N]	4944,341336	6158,2694	8442,182017

Fonte: Autor (2022).

O motor deve atender todas as condições de navegação em mar calmo, porém a velocidade mais utilizada na embarcação é a velocidade de cruzeiro de 8 nós em mar calmo, por isso para fazer a seleção do hélice será utilizado essa condição.

Após estimada a resistência ao avanço, foi então calculado os coeficientes de redução de força propulsiva  $t$  e de esteira  $\omega$  através das Equações 11 e 13, e então foi encontrado os valores da velocidade de avanço  $V_a$  e da força propulsiva  $T$ , conforme as Equações 10 e 12 apresentadas na fundamentação teórica. A Tabela 6 apresenta os valores obtidos.

Tabela 6 – Coeficientes, velocidade de avanço e força propulsiva.

$\omega$	$t$	$V_a$ [m/s]	$T$ [N]
0,134	0,067	3,56	2971,5

Fonte: Autor (2022).

Através dos gráficos dos propulsores da série B, foram encontradas as maiores eficiências para propulsores com 2, 3 e 4 pás, variando suas razões de áreas. O processo de seleção pode ser verificado no apêndice A. O hélice selecionado foi de 3 pás com razão de área de 0,5. A Tabela 7 apresenta os dados do hélice propulsor selecionado para as 3 velocidades de operação.

Tabela 7 – Dados hélice propulsor selecionado.

	Mar Calmo			Mar agitado		
Vel.	6 nós	8 nós	9,8 nós	6 nós	8 nós	9,8 nós
<b>Diâmetro[m]</b>	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
<b>J</b>	0,3965	0,4057	0,3864	0,2361	0,2827	0,2918
<b>P/D</b>	0,6348	0,6285	0,6230	0,5142	0,5500	0,5418
<b><math>\eta_0</math></b>	0,5413	0,5519	0,5344	0,3830	0,4361	0,4498
<b><math>K_Q</math></b>	0,0145	0,0138	0,0141	0,0126	0,0132	0,0125
<b><math>K_T</math></b>	0,1463	0,1391	0,1452	0,1553	0,1537	0,1458
<b>RPM</b>	735,34	958,10	1232,3	1235,1	1375,0	1.631,8

Fonte: Autor (2022).

A partir dos dados do hélice e aplicando as demais eficiências apresentadas na fundamentação teórica, encontrou-se o torque  $Q$  necessário para mover o hélice e a potência requerida do motor  $P_D$ . A Tabela 8 apresenta a potência requerida no motor para as 3 velocidades de operação da embarcação.

Tabela 8 – Torque necessário para mover o hélice e potência requerida.

	Mar calmo			Mar agitado		
Vel.	6 nós	8 nós	9,8 nós	6 nós	8 nós	9,8 nós
<b><math>Q</math>[Nm]</b>	112,61	182,81	308,77	275,72	358,50	480,69
<b><math>P_D</math>[kW]</b>	9,1276	19,309	41,945	37,538	54,340	86,464

Fonte: Autor (2022).

Para a seleção do motor, será utilizado como critério que o mesmo seja capaz de atender todas as condições de navegação em mar calmo e as condições de navegação de 6 e 8 nós em mar agitado. Desta forma o motor necessita de uma potência de pelo menos 54,34 kW.

Como forma de verificação do resultado obtido, Larsson e Eliasson (2000) propõem uma fórmula simplificada para estimar a potência requerida para embarcações do tipo veleiro como sendo de 3 a 4 kW por tonelada de deslocamento da embarcação. Como o veleiro possui 18 toneladas de deslocamento completamente carregado, necessita de uma potência de 54 a 72kW, estando assim o valor estimado dentro desse range.

A metodologia utilizada para obtenção da potência requerida, e a forma simplificada proposta por Larsson e Eliasson (2000) utilizada para verificação do resultado, são ambas formuladas para motores à diesel. No entanto, de acordo com



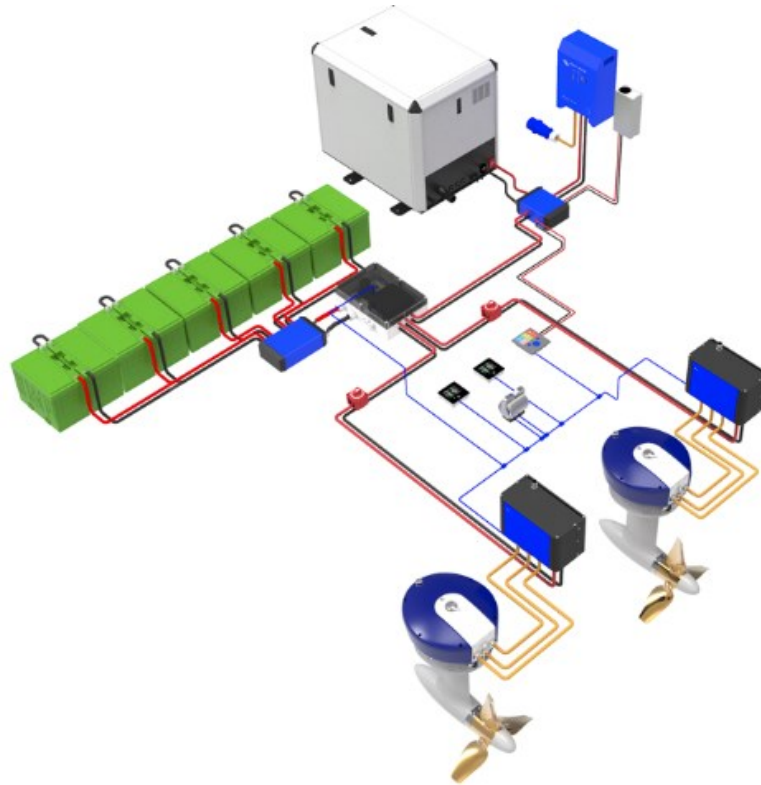
Yachting World (2019), menores motores elétricos podem realizar o mesmo trabalho se comparado a um motor diesel de maiores potências. Isso se deve aos fatos de que os motores diesel não são muito eficientes na conversão de energia química em empuxo e que as características de torque dos motores elétricos são muito melhores do que os motores diesel.

Um motor elétrico de 10kW pode realizar o trabalho de um motor diesel de 22,271kW, apresentando vantagens como manter a velocidade da embarcação de forma mais eficaz em situações de mar agitado e de contra-vento, além de melhor manobrabilidade (Mustelin apud Yachting World 2000). Isso se deve ao fato de os motores a diesel atingirem a potência máxima e o torque máximo em uma pequena faixa de velocidades, enquanto os motores elétricos são altamente eficientes em uma grande gama de velocidades de rotação. Isso também permite que os motores elétricos utilizem hélices mais eficientes (Yachting World 2000).

Dessa maneira a potência inicialmente encontrada para a motorização está superdimensionada para a seleção de um motor elétrico, sendo considerado então apenas a metade dessa potência.

Com os valores obtidos, verifica-se que o motor a ser selecionado deve ter uma potência superior à 27,17kW, para que possa atender a máxima potência exigida, correspondente a condição de operação da embarcação em 8 nós com mar agitado. Dessa forma foi selecionado um sistema com dois motores de 15 kW da empresa OCEANVOLT, em um arranjo chamado Twin ServoProp 15, totalizando 30kW de potência. A Figura 16 apresenta uma imagem do sistema da motorização.

Figura 16 – Arranjo do sistema de propulsão elétrica Twin ServoProp.



Fonte: Oceanvolt (2022).

Como forma de verificação da potência da motorização selecionada foram analisadas embarcações semelhantes que utilizam motorização elétrica, com comprimento e deslocamento total próximas ao veleiro autossustentável. A Tabela 9 apresenta os dados obtidos desses veleiros semelhantes.

Tabela 9 – Embarcações semelhantes que utilizam a mesma motorização.

EMBARCAÇÃO	LOA [m]	B <sub>máx</sub> [m]	Deslocamento [kg]	Motorização	Potência [kW]
<b>ELECTRIC BALTIC 68 CAFÉ RACER</b>	20,73	5,68	22800	2x Oceanvolt ServoProp 15	2 x 15
<b>ELECTRIC SPIRIT 65DH</b>	19,8	4,3	16500(leve)	2x Oceanvolt ServoProp 15	2 x 15
<b>MCCONAGHY FRERS 57 ELECTRIC</b>	17,4	5,03	13200(leve)	2x Oceanvolt ServoProp 15	2 x 15

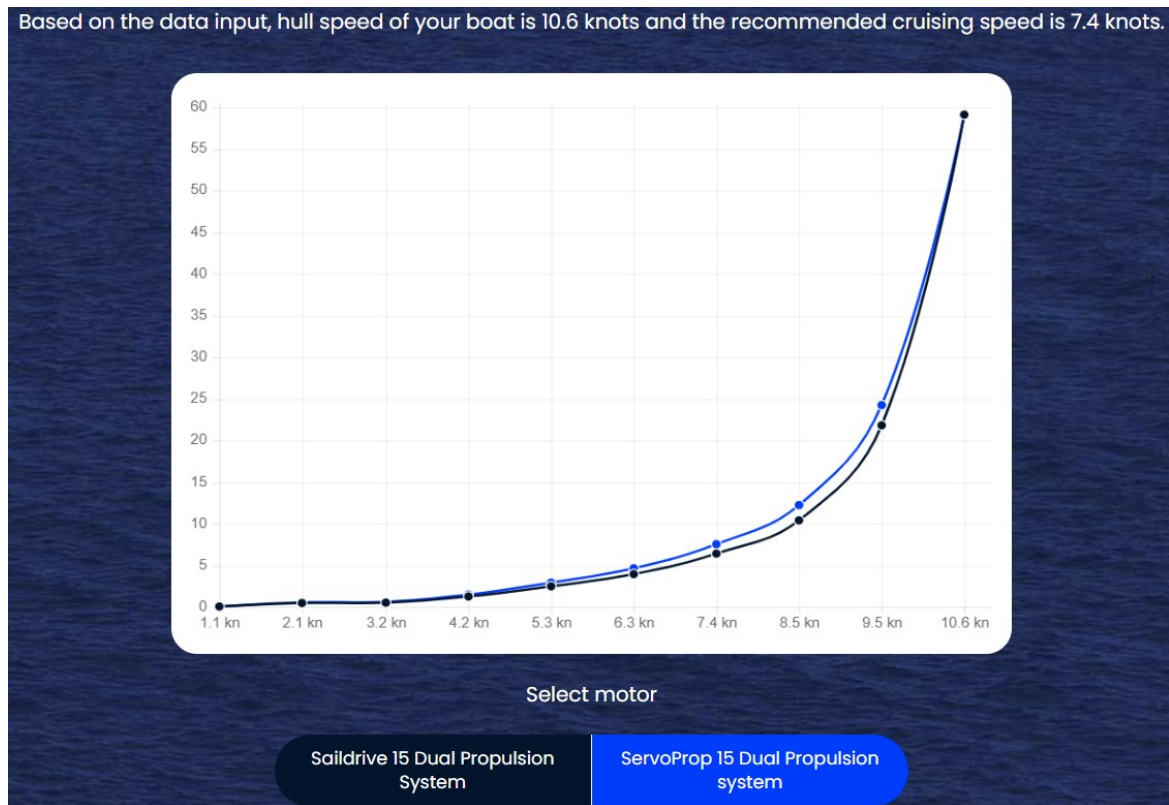
Fonte: Autor (2022).

Como pode-se observar na tabela, foram encontrados no site do fabricante do motor selecionado, soluções implementadas em embarcações com características

semelhantes ao veleiro analisado neste trabalho que utilizam o mesmo sistema de motorização elétrica proposto.

Outra forma de confirmação foi feita através da sugestão de sistema feito pelo fabricante, onde inserindo o comprimento total e o deslocamento do veleiro, a empresa indica um sistema apropriado para a embarcação. Dessa forma ao se inserir os dados da embarcação no site da empresa o mesmo apresentou como sistema mais adequado exatamente a motorização Twin ServoProp 15, constituída de dois motores Oceanvolt Servo Prop 15. A Figura 17 apresenta a curva de potência fornecida pelo fabricante para realizar a seleção da motorização em azul no gráfico e os sistemas de motorização sugeridos.

Figura 17 – Curva de potência motorização segundo fabricante.



Fonte: Oceanvolt (2022).

Vale ressaltar que o fabricante sugeriu dois sistemas de motorização como pode ser observado na Figura 17, Saildrive 15 e ServoProp 15, que são sistemas que possuem a mesma potência e apenas se diferenciam pela maior capacidade de hidrogeração do sistema ServoProp.

O fabricante sugeriu uma velocidade de cruzeiro de 7,4 nós, estando um pouco abaixo da velocidade de cruzeiro de 8 nós proposta. Analisando o gráfico presente na Figura 17, verifica-se que a potência requerida pela motorização para uma velocidade de 8 nós está bem próxima ao estimado anteriormente no trabalho para essa velocidade se considerado a metade do valor encontrado para motorização à diesel.

A Tabela 10 apresenta uma comparação dos valores das potências requeridas para as diferentes condições de navegação em mar calmo estimadas como a metade dos valores apresentados na Tabela 8 e os valores estipulados pelo fabricante conforme a Figura 17.

Tabela 10 – Comparação potência estimada e a fornecida pelo fabricante.

<b>Vel. [nós]</b>	<b><math>P_D</math>[kW]</b>	<b>Pot. Estimada fabricante [kW]</b>
<b>6</b>	4,5638	4,3000
<b>8</b>	9,6545	9,8000
<b>9,8</b>	20,972	25,400

Fonte: Autor (2022).

Conforme embarcações semelhantes e sugestão do fabricante, confirma-se que a motorização selecionada é adequada para o projeto.

#### 4.2. COMPONENTES ELETRO/ELETRÔNICOS DO VELEIRO

Além da motorização, a embarcação conta com diversas outras cargas que compõem o sistema fotovoltaico, como bombas, luzes e equipamentos eletrônicos de navegação. A Tabela 11 apresenta os componentes eletro/eletrônicos a bordo e suas potências.

Tabela 11 – Cargas elétricas veleiro.

Descrição da Carga	Qtd.	Potência unidade [W]	Potência Total [W]
<b>Cargas CC 12V</b>			
Motor elétrico	2	4782,25	9564,5
Lâmpada LED interior teto	42	2	84
Lâmpada LED interior leitura	5	2	10
Luz de mastro e do deck	1	5	5
Luz navegação e ancoragem	1	5	5
GPS Chartplotter + Sonar	2	11,98	23,96
Piloto automático	2	1,6	3,2
Rádio VHF	1	7,2	7,2
Indicador de vento	1	2,4	2,4
Sist. eletromecânico piloto aut.	1	70	70
Refrigerador 100l	1	48	48
Radar	1	20	20
Bomba de porão	1	31,2	31,2
Bomba de pressurização	1	180	180
<b>Cargas CA 220V</b>			
Chuveiro elétrico	1	4500	4500
TV 32 polegadas LED	1	50	50
Tomadas de uso geral	4	400	1200

Fonte: Autor (2022).

## 5. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO

No dimensionamento do sistema fotovoltaico híbrido é realizado o balanço energético entre as energias geradas através das diversas fontes renováveis e a demanda de energia elétrica das cargas. Através do dimensionamento, busca-se adequar a geração de energia elétrica afim de suprir a demanda. Como já discutido no referencial teórico, os blocos básicos de um sistema fotovoltaico são: geração, equipamentos de controle e condicionamento de potência e armazenamento. Partindo dos dados meteorológicos e de uma estimativa precisa da demanda, o projetista especifica cada um destes blocos (PINHO; GALDINO, 2014).

O dimensionamento será realizado com o auxílio do software HOMER Pro (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable), desenvolvido nos EUA, No National Renewable Energy Laboratory (NREL). Este pode simular sistemas conectados à rede, isolados ou híbridos, combinando diferentes tipos de geração como fotovoltaica, eólica, hídrica, gás natural, microturbinas, células combustíveis, entre outras (PINHO; GALDINO, 2014).

Existem diversos softwares que realizam o dimensionamento do sistema fotovoltaico, no entanto é importante compreender como esse dimensionamento é realizado na prática, dessa forma serão apresentados os conceitos por trás das etapas que constituem esse dimensionamento.

### 5.1. AVALIAÇÃO DOS RECURSOS DE GERAÇÃO

Nesta etapa do projeto busca-se quantificar os recursos responsáveis por gerar as energias renováveis, como a radiação solar para a energia fotovoltaica, a incidência de vento para a energia eólica e a velocidade da corrente de água para a energia hídrica.

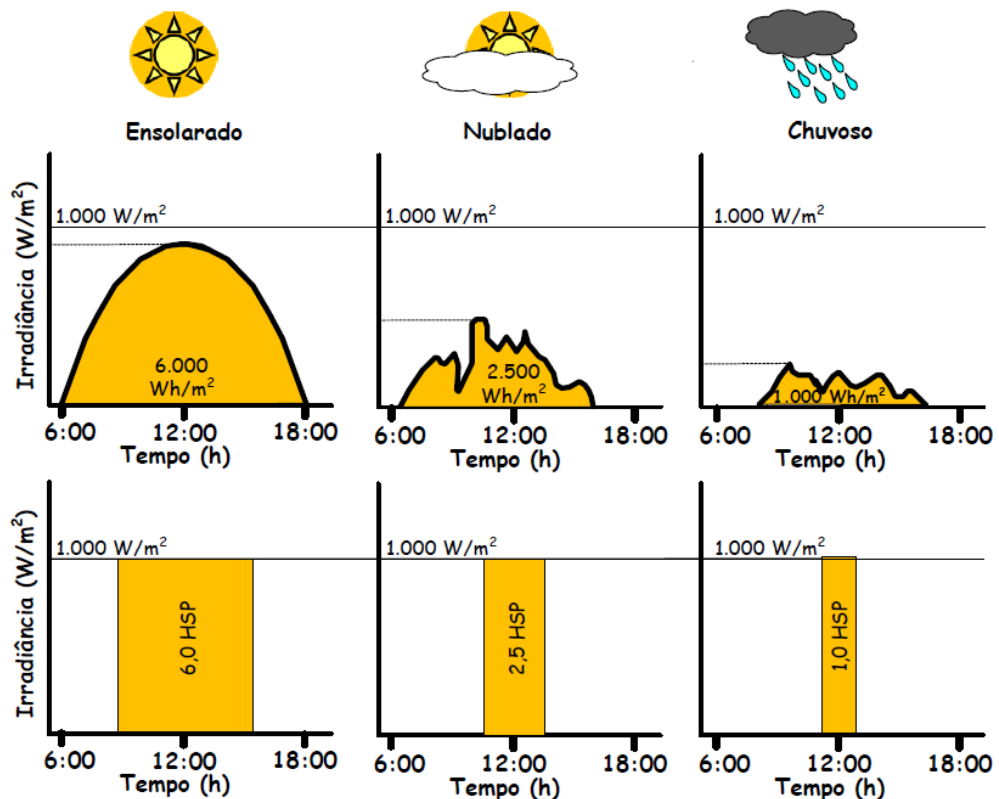
#### 5.1.2 Avaliação do recurso solar

Para avaliar os dados de radiação solar, pode-se utilizar duas especificações, em termos de valores instantâneos de fluxo de potência ou valores de energia por unidade de área, conhecidos como irradiância e irradiação respectivamente. A forma

mais comum para apresentar os dados de radiação é através de valores médios mensais para a energia acumulada ao longo de um dia. As características elétricas de um gerador fotovoltaico são dependentes basicamente da irradiância e da temperatura dos módulos, sendo a irradiância muito mais significativa para as mesmas (PINHO; GALDINO, 2014).

A irradiância pode variar significativamente em um curto intervalo de tempo, como a presença ou ausência de nuvens na direção do módulo, já a variação da temperatura não é tão sensível devido a capacidade térmica dos módulos. Nas estimativas de produção de energia elétrica é útil ignorar essas variações da irradiância e considerar o valor total convertido em energia elétrica em um certo período. Dentro desse conceito, uma forma muito utilizada para expressar a radiação é o número de Horas de Sol Pleno (HSP). Esta grandeza reflete o número de horas em que a irradiância solar deve permanecer constante e igual a  $1\text{ kW/m}^2$  (PINHO; GALDINO, 2014). A Figura 18 apresenta a variação do HSP em diferentes condições climáticas.

Figura 18 – Variação HSP em diferentes condições climáticas.



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

Para obter os dados de radiação, o local de operação do sistema precisa ser definido. Como o sistema dimensionado não é fixo, optou-se por fazer uma análise da rota e utilizar valores de radiação de um local com baixa incidência solar em comparação com os outros locais da rota de navegação. Visto que o principal intuito do projeto é levar a mensagem de modo de vida sustentável, além da ajuda na implementação deste modo de vida em localidades carentes, a Figura 19 apresenta o mapa com os locais onde a fome atinge um maior número de pessoas. Esses locais serão os principais pontos para a rota de navegação do veleiro.

Figura 19 – Mapa da fome.



Fonte: FAO (2014).

Com base no mapa da Figura 19, observa-se que os países mais carentes se encontram principalmente na África, em regiões próximas a linha do Equador, locais de grande incidência solar. Com base nisso, será utilizado como base para o dimensionamento do sistema fotovoltaico os dados de radiação da região da costa africana com alto índice de fome mais distante da linha do Equador, desta forma a radiação da grande maioria das outras localidades será maior e o projeto permanecerá atendendo a demanda energética.

O local selecionado foi a costa da Namíbia e os dados de radiação foram obtidos através do software HOMER Pro, que busca as informações no banco de



dados da NASA. A Figura 20 mostra no mapa o local selecionado no Software e a Tabela 12 apresenta os valores de radiação para esse local.

Figura 20 – Local selecionado para obtenção dos dados de radiação.



Fonte: HOMER Pro (2022).

Tabela 12 – Média mensal de radiação diária no local selecionado.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Agt	Set	Out	Nov	Dez
7,66	6,76	5,84	4,73	3,78	3,41	3,69	4,46	5,46	6,54	7,39	7,83
<b>Média anual (kWh/m<sup>2</sup>/dia):</b>											<b>5,63</b>

Fonte: Adaptado de HOMER Pro (2022).

#### 4.1.2 Avaliação do recurso eólico

A avaliação do potencial eólico de determinada região requer uma análise sistemática de coleta e análise de dados sobre o regime e velocidade dos ventos. Estações meteorológicas e outras aplicações similares realizam essa coleta e disponibilizam os dados para a avaliação do recurso eólico, sendo o principal dado a velocidade média do vento. Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico serão utilizados os dados da mesma região selecionada para coleta dos dados de radiação. A Tabela 13 apresenta os valores das médias mensais das velocidades dos ventos nessa região.

Tabela 13 – Média mensal da velocidade do vento no local selecionado.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Agt	Set	Out	Nov	Dez
6,22	5,72	5,46	5,25	5,31	5,83	5,86	5,83	5,89	6,17	6,30	6,15
<b>Média anual (m/s):</b>											<b>5,83</b>

Fonte: Adaptado de HOMER Pro (2022).

### 5.1.2 Avaliação do recurso hídrico

O recurso hídrico responsável por gerar a energia nos hidrogeradores tem como principal parâmetro a velocidade da água. No projeto do veleiro autossustentável os próprios motores funcionam como hidrogeradores quando a embarcação navega na vela e em nosso estudo essa velocidade será igual a velocidade de navegação da embarcação. Foi considerado para dimensionamento a velocidade de cruzeiro de 4,11m/s, estimando 12 horas de navegação diária nas velas, dessa forma tendo uma média mensal de velocidade de 2,055m/s, constante em todos meses do ano. A Tabela 14 apresentada as médias mensais da velocidade da água.

Tabela 14 – Média mensal da velocidade da água.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Agt	Set	Out	Nov	Dez
2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05
<b>Média anual (m/s):</b>											<b>2,05</b>

Fonte: Adaptado de HOMER Pro (2022).

## 5.2. LEVANTAMENTO DA DEMANDA E DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Para se determinar a demanda da unidade consumidora, analisou-se como as cargas elétricas presentes na embarcação são utilizadas, definindo o gasto energético diário de cada equipamento, de acordo com sua potência e a quantidade de horas na qual o equipamento é utilizado diariamente. Como já discutido, o motor representa a carga com maior consumo energético e para o dimensionamento do sistema fotovoltaico a demanda vai ser analisada para a velocidade de cruzeiro da embarcação. As informações da demanda energética para a velocidade de cruzeiro são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Demanda energética diária.

<b>Cargas elétricas para velocidade de navegação de 8 nós</b>						
<b>Descrição da Carga</b>	<b>Qtd</b>	<b>Potência unidade [W]</b>	<b>Potência Total [W]</b>	<b>Tempo de operação [h/d]</b>	<b>Dias de uso por semana</b>	<b>Consumo médio Diário [Wh]</b>
Equipamentos em CC						
Motor elétrico	2	4782,25	9564,5	5	4	27327,14
Lâmpada LED interior teto	42	2	84	4	7	336
Lâmpada LED interior leitura	5	2	10	4	7	40
Luz de mastro e do deck	1	5	5	12	7	60
Luz navegação e ancoragem	1	5	5	12	7	60
GPS Chartplotter + Sonar	2	11,98	23,96	12	7	287,52
Piloto automático	2	1,6	3,2	6	7	19,2
Rádio VHF	1	7,2	7,2	2	7	14,4
Indicador de vento	1	2,4	2,4	12	7	28,8
Sist. eletromecânico piloto aut.	1	70	70	6	7	420
Refrigerador 100l	1	48	48	12	7	576
Radar	1	20	20	12	7	240
Bomba de porão	1	31,2	31,2	2	7	62,4
Bomba de pressurização	1	180	180	4	7	720
<b>Demanda de eletricidade diária [kWh]</b>						<b>30191,46</b>
<b>Carga de pico [kW]</b>						<b>10054,46</b>
Equipamentos em CA						
Chuveiro elétrico	1	4500	4500	0,5	4	1285,7
TV 32 polegadas LED	1	50	50	3	7	150
Tomadas de uso geral	4	400	1200	1	7	1200
<b>Demanda de eletricidade diária [kWh]</b>						<b>2635,714</b>
<b>Carga de pico[kW]</b>						<b>5750</b>

Fonte: Autor (2022).

### 5.3. DIMENSIONAMENTO DA GERAÇÃO

Para encontrar a energia necessária para suprir a demanda do sistema ( $L$ ), deve-se levar em consideração o tipo de carga do sistema em corrente alternada e corrente contínua, e as eficiências dos elementos que constituem as unidades de armazenamento e de condicionamento de potência, conforme a Equação 31 (PINHO; GALDINO, 2014).

$$L = \frac{L_{cc}}{\eta_{bat}} + \frac{L_{ca}}{\eta_{bat}\eta_{inv}} \quad (31)$$

Onde:

$L$  (Wh/dia) – energia necessária para suprir a demanda do sistema.

$L_{cc}$  (Wh/dia) – quantidade de energia consumida diariamente em corrente contínua.

$L_{ca}$ (Wh/dia) – quantidade de energia consumida diariamente em corrente alternada.

$\eta_{bat}$ (%) – eficiência global da bateria.

$\eta_{inv}$  (%) – eficiência do inversor.

Obtido o valor da energia necessária para suprir a demanda do sistema a partir da Equação 22, calcula-se as potências geradas pelas diferentes fontes afim de verificar se a produção dessas é suficiente para suprir a demanda. Aplicando as devidas perdas relacionadas a um eventual acúmulo de sujeira ao longo do tempo, tolerância de fabricação para menos em relação ao valor nominal, perdas devido a temperatura, perdas devido a fiação, entre outras, a potência solar gerada e a potência eólica gerada podem ser calculadas pelas Equações 32 e 33 respectivamente.

$$P_{PV} = P_0 f_{PV} f_T \left[ \frac{I_T}{I_S} \right] \quad (32)$$

Onde:  $P_{PV}$ : potência solar gerada (Kw);  $P_0$ : potência nominal (kW);  $f_{PV}$ : fator de redução (%) utilizado para simular efeitos como sombra e sujeira;  $f_T$ : fator de temperatura (%);  $I_T$ : irradiação solar incidente (kW/m<sup>2</sup>);  $I_S$ : irradiação incidente sobre o módulo em condições padrão (kW/m<sup>2</sup>).

$$P_{WT} = \frac{1}{2} C_p \eta \rho A_R \vartheta^3 \quad (33)$$

Onde:  $P_{WT}$ : potência eólica gerada;  $C_p$ : coeficiente de performance (%);  $\eta$ : eficiência do conjunto gerador-transmissão (%);  $\rho$ : densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>);  $A_R$ : área do rotor da turbina (m<sup>2</sup>);  $\vartheta$ : velocidade do vento (m/s)

#### 5.4. DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE BATERIAS

Com o valor da energia solicitada pelas cargas obtida através da Equação 31, encontra-se a capacidade do sistema de armazenamento segundo as Equações 34 e 35.

$$CB_{C20}(Wh) = \frac{LN}{P_d} \quad (34)$$

$$CBI_{C20}(Ah) = \frac{CB_{C20}}{V_{sist}} \quad (35)$$

onde  $CB_{C20}$  é a capacidade do banco de baterias em Wh para o regime de descarga em 20 horas (C20) e  $CBI_{C20}$  é a respectiva capacidade em Ah;  $N$  o número de dias de autonomia (o qual varia em função da região onde se instala o sistema);  $P_d$  a máxima profundidade de descarga da bateria, considerando o período de autonomia (PINHO; GALDINO, 2014).

### 5.5. DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR

A potência do inversor deve ser maior do que a potência de pico das cargas em corrente alternada do sistema, ou seja, a maior potência que as cargas em corrente alternada do sistema pode apresentar funcionando em conjunto. No dimensionamento do presente trabalho, foi considerado que todas as cargas operam junto em determinado momento afim de se estimar a potência de pico e dimensionar o inversor da maneira mais conservadora possível, conforme a Equação 36.

$$P_{inv} = \frac{P_{pico}}{\eta_{inv}} \quad (36)$$

Onde:  $P_{inv}$ : potência do inversor;  $\eta_{inv}$ : eficiência do inversor;  $P_{pico}$ : potência de pico do sistema.

### 5.6. FONTES DE GERAÇÃO

Como o veleiro possui uma área disponível limitada para a instalação de painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas e outros meios de captação de energias renováveis, a autonomia energética desse tipo de embarcação não costuma ser muito grande, existindo em muitos casos a necessidade da utilização de um gerador a diesel para complementar a geração de energia do sistema. Visto que o intuito desse trabalho é gerar energia apenas a partir de fontes renováveis, o mesmo busca utilizar o máximo os espaços disponíveis para a captação dessas fontes, além de utilizar de tecnologias

com alta eficiência energética, que tem grande potencial para melhorar a capacidade de geração desse tipo de sistema.

### 5.6.1 Espaços disponíveis nos veleiros para alocação dos geradores

A região mais utilizada em um veleiro para adição de painéis fotovoltaicos é na popa através da instalação de um suporte para fixação dos painéis. Outra região onde habitualmente são instalados painéis e/ou filmes fotovoltaicos é no coachroof do veleiro. As Figuras 21 e 22 são exemplos de instalações de painéis/filmes nessas regiões.

Figura 21 – Painéis fotovoltaicos instalados na região de popa.



Fonte: Sailing Britican (2022).

Figura 22 – Filmes fotovoltaicos instalados no coachroof.

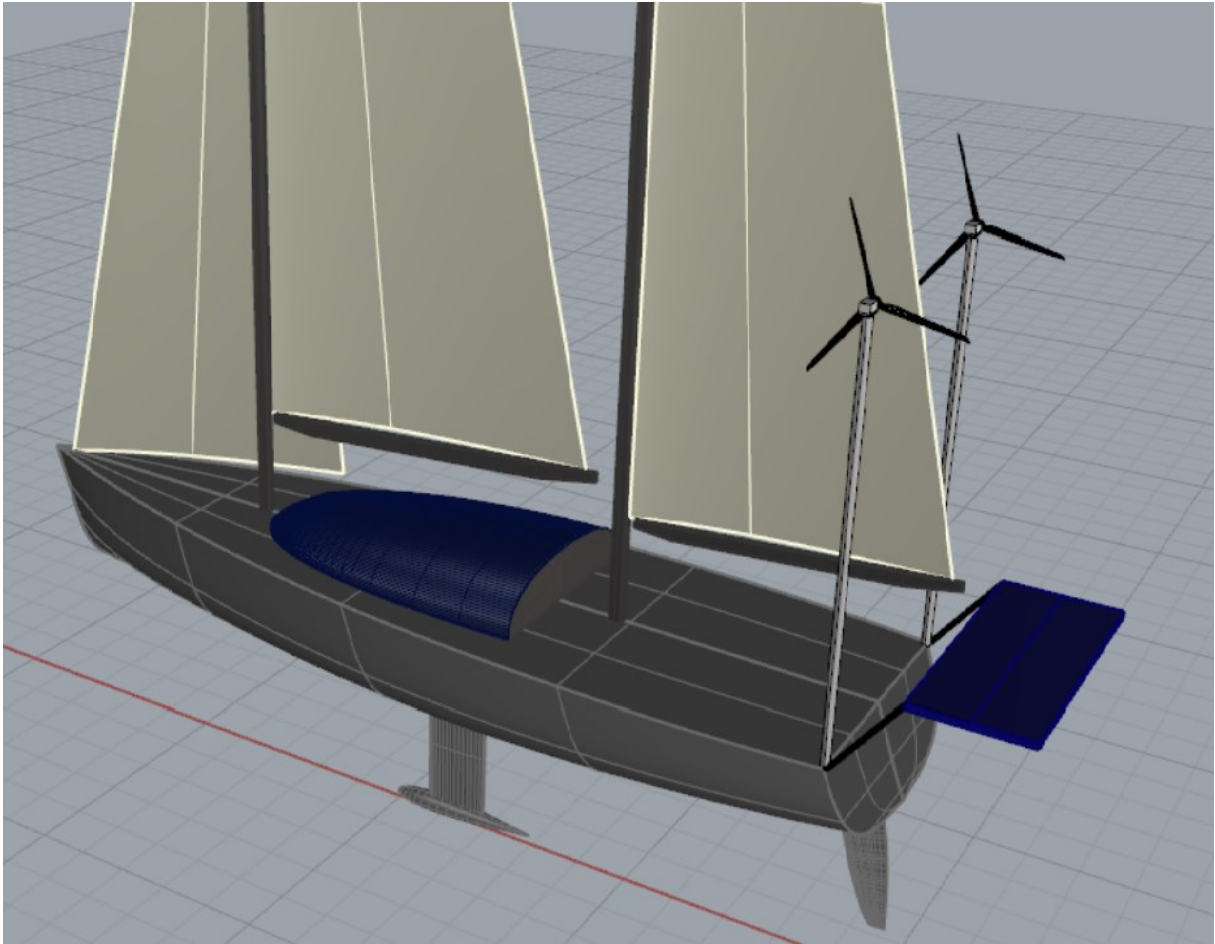


Fonte: SuperyatchNews (2022).

No projeto do veleiro autossustentável ambas regiões foram utilizadas para instalação de painéis e filmes fotovoltaicos. Além desses, também foi selecionado a região da popa para instalação de dois geradores eólicos, visto que essa região é a que comporta maiores geradores, por isso sendo a mais utilizada em outras embarcações. A Figura 23 apresenta o veleiro com os painéis e filmes fotovoltaicos representados em azul nas regiões discutidas e os geradores eólicos.



Figura 23 – Veleiro com painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas.



Fonte: Autor (2022).

### 5.6.2 Painéis/filmes fotovoltaicos, gerador eólico e hidrogerador selecionados

Para a região da popa foram selecionados painéis CS6W-550MB-AG da empresa CanadianSolar, de forma a ocupar todo espaço disponível nessa região, sem comprometer a estabilidade da embarcação. Para a região do coachroof foram selecionados os filmes finos CAT PVT117 da empresa Cartepillar. A Tabela 16 apresenta os dados técnicos do painel e do filme selecionados.



Tabela 16 – Dados painéis e filmes fotovoltaicos.

<b>Características elétricas</b>		
<b>Fabricante</b>	CanadianSolar	Cartepillar
<b>Modelo</b>	CS6W-550MB-AG	CAT PVT117
<b>Tecnologia</b>	Mono-crystalline	Filmes finos CdTe
<b>Máxima Potência [W]</b>	550	117,5
<b>Eficiência [%]</b>	21,4	16,3
<b>Tensão de máxima potência [V]</b>	41,7 V	70,1
<b>Corrente de máxima potência [A]</b>	13,20 A	1,68
<b>Corrente de curto-circuito [A]</b>	14,00 A	1,83
<b>Dimensões</b>		
<b>Comprimento [mm]</b>	2266	1200
<b>Largura [mm]</b>	1134	600
<b>Espessura [mm]</b>	35	6,8
<b>Peso [kg]</b>	32,2	12

Fonte: Autor (2022).

De acordo com o espaço disponível na região da popa e das dimensões dos painéis, foi estabelecido um limite da quantidade de painéis máxima, sem comprometer a estabilidade da embarcação, dessa forma o máximo possível é a instalação de 5 painéis solares CS6W-550MB-AG nessa região. A região do Coachroof possui ao todo 25 m<sup>2</sup>, considerando que apenas em uma parte dessa região podem ser adicionados os filmes, visto que a parte inferior será utilizada para instalar vidros para iluminação natural do interior da embarcação, considerou-se 70% da área total para instalação dos filmes, restando assim 17,5 m<sup>2</sup>. Como cada filme fino CAT PVT117 possui 0,72 m<sup>2</sup>, o maior número de filmes que poderia ser instalado na região é 24, porém considerando algumas perdas de espaço devido a geometria da região, definiu-se 20 filmes como o máximo possível para instalação.

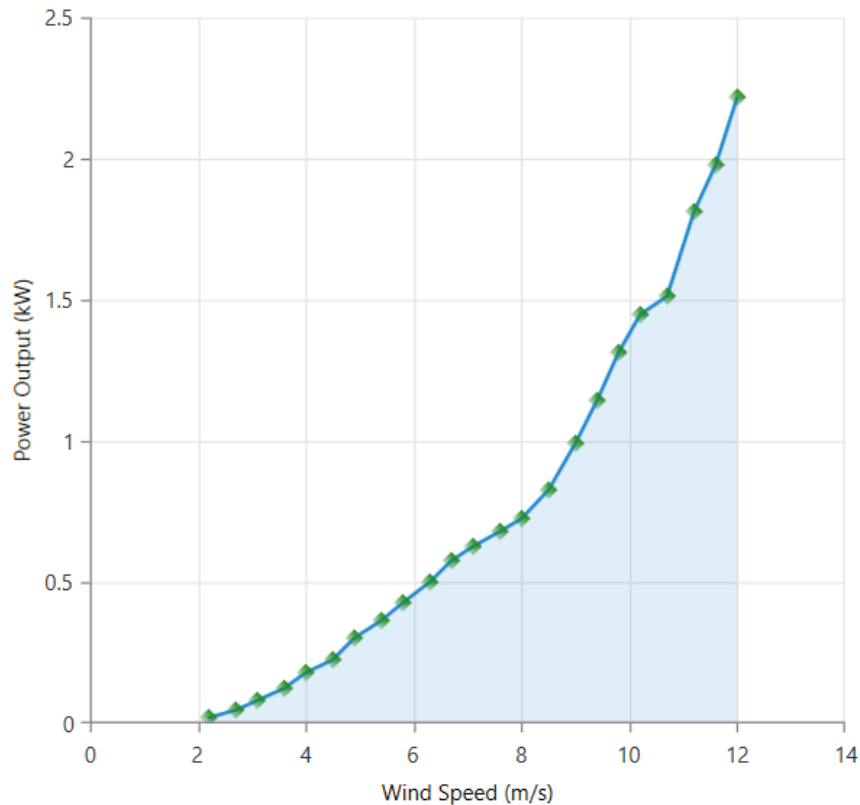
Os geradores eólicos selecionados foram os modelos SHARK S601, sendo que podem ser instalados 1 ou 2 geradores no sistema. A Tabela 17 apresenta os valores da potência gerada para determinada velocidade do vento e a Figura 24 apresentam a curva de potência desse gerador eólico.

Tabela 17 – Relação potência gerada e velocidade do vento.

<b>Vel. Do vento [m/s]</b>	2,2	3,1	4	4,9	5,8	6,7	7,6	8,5	9,4	10,2	11,2	12
<b>Potência saída [kW]</b>	0,02	0,08	0,18	0,30	0,43	0,58	0,68	0,83	1,14	1,45	1,81	2,22

Fonte: Autor (2022).

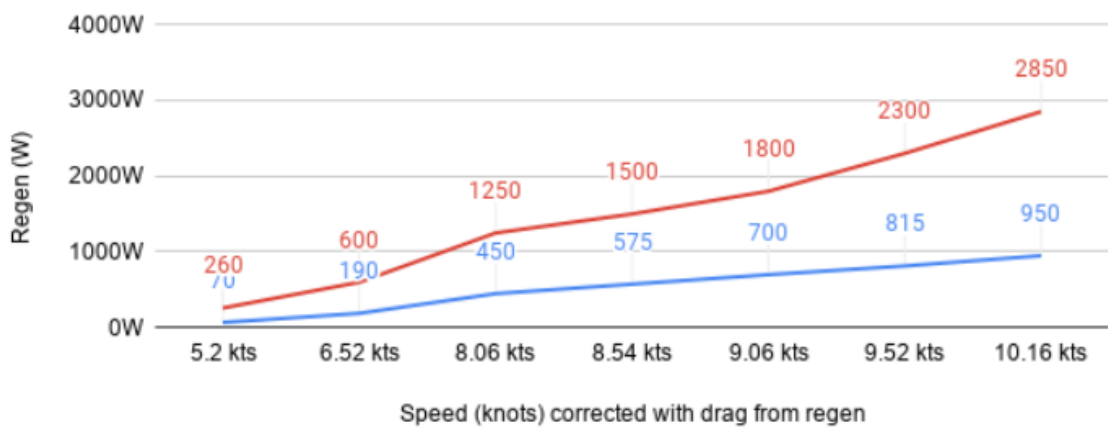
Figura 24 – Curva de potência gerador eólico.



Fonte: HOMER Pro (2022).

A última fonte de geração utilizada no projeto foram os hidrogeradores, que são os próprios motores da embarcação quando a mesma navega utilizando as velas como propulsão. A Figura 25 apresenta a curva de geração dos hidrogeradores ServoProp 15 em vermelho no gráfico.

Figura 25 – Curva de geração dos hidrogeradores.



Fonte: Oceanvolt (2022).

## 5.7. BATERIA E INVERSOR SELECIONADOS

Com os componentes de geração definidos, foram então selecionados os componentes da unidade de controle de potência e da unidade de armazenamento. A Tabela 18 apresenta os dados técnicos da bateria e do inversor selecionados.

Tabela 18 – Dados técnicos bateria e do inversor selecionados.

<b>Características elétricas bateria</b>	
<b>Fabricante</b>	Discover
<b>Modelo</b>	AES 6.6 kWh
<b>Tecnologia</b>	Lítio LiFePO4
<b>Tensão nominal [V]</b>	48
<b>Eficiência [%]</b>	95
<b>Capacidade nominal [Ah]</b>	130
<b>Máxima corrente de carga [A]</b>	150
<b>Máxima corrente de descarga [A]</b>	600
<b>Tempo de vida [anos]</b>	10
<b>Dimensões</b>	
<b>Comprimento [mm]</b>	470
<b>Largura [mm]</b>	348
<b>Altura [mm]</b>	373
<b>Peso [kg]</b>	87
<b>Características elétricas Inversor</b>	
<b>Fabricante</b>	Fronius
<b>Modelo</b>	Fronius Primo 8.2-1
<b>Eficiência [%]</b>	97,7
<b>Máxima corrente de entrada [A]</b>	16
<b>Máxima corrente de curto-circuito do módulo [A]</b>	20
<b>Potência máxima de saída [W]</b>	8200
<b>Intervalo voltagem de saída CA [V]</b>	150-280
<b>Tempo de vida [anos]</b>	10
<b>Dimensões</b>	
<b>Comprimento [mm]</b>	645
<b>Largura [mm]</b>	431
<b>Altura [mm]</b>	204
<b>Peso [kg]</b>	21,9

Fonte: Autor (2022).

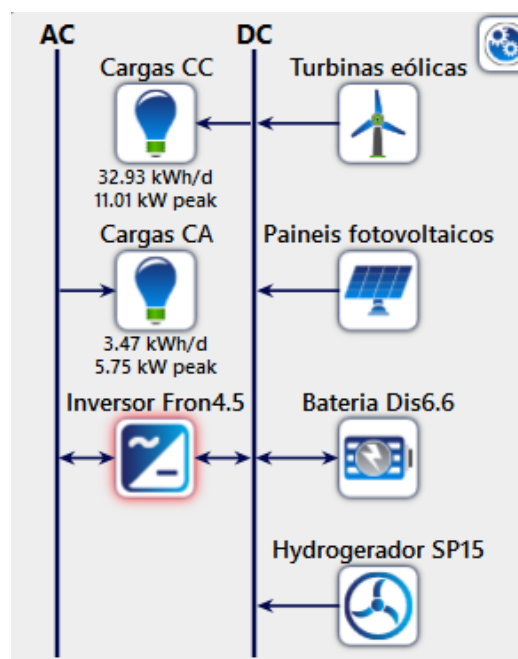
## 5.8. ANÁLISE SOFTWARE HOMER PRO

Após a obtenção da demanda energética, da definição dos componentes da unidade de geração e da seleção do inversor, esses dados são então adicionados

pelo usuário no software HOMER Pro. O software além de contar com um extenso banco de dados de produtos, permite que o usuário crie seus próprios componentes, imputando as características dos mesmos e os salvando em sua biblioteca. Assim foram inseridas as características dos painéis e filmes fotovoltaicos, geradores eólicos, hidrogeradores, inversor, bateria e da demanda energética.

Com esses dados o software gera soluções para o sistema fotovoltaico, caso o mesmo seja viável. A Figura 26 mostra a configuração do sistema fotovoltaico formado no software.

Figura 26 – Configuração do sistema fotovoltaico híbrido.



Fonte: HOMER Pro (2022).

Para gerar as soluções o software simula o funcionamento do sistema no período de tempo estabelecido, realizando uma análise do balanço energético, em que compara a demanda elétrica no período de tempo estabelecido com a eletricidade que pode ser produzida pelos componentes neste intervalo, definindo assim o fluxo de energia necessário em cada equipamento.

O software apresenta diferentes configurações, de acordo com os dados utilizados pelo usuário, variando desde a produção elétrica das diferentes fontes, até a quantidade de inversores e a capacidade do banco de baterias, mostrando quais configurações são viáveis (isto é, podem atender à demanda elétrica nas condições

especificadas), e estima o custo de instalação e operação de cada configuração, elencando as soluções com menor custo e mais eficientes.

Para estimar o custo de cada modelo e selecionar o de menor custo, o software utiliza o NPC (Net Present Cost), que representa todos os custos do sistema durante toda sua vida útil menos a receita gerada por revenda dos equipamentos neste período de tempo, como mostrado na Equação 37.

$$C_{NPC,total} = C_{total} - C_{revenda} \quad (37)$$

O  $C_{total}$  inclui custos de capital inicial, instalação, reposição, manutenção, entre outros. Para medir a eficiência do sistema, não apenas seu custo, o software utiliza o parâmetro COE (Cost of energy), que divide o custo anual total do sistema pela energia total produzida, conforme Equação 38.

$$COE = \frac{C_{anual,total}}{E_{produzida}} \quad (38)$$

Onde  $E_{produzida}$  é a energia total produzida no ano (kWh/ano) e  $C_{anual,total}$  representa o custo total anual do sistema (\$/ano), que depende das taxas de juros anual e do tempo de projeto, conforme Equação 39.

$$C_{anual,total} = CRF(i, T_{proj}) \cdot C_{NPC,total} \quad (39)$$

Onde  $i$  representa a taxa de juros;  $T_{proj}$  o tempo de vida do projeto e  $C_{NPC,total}$  o custo líquido do projeto calculado na Equação 37. O  $CRF(i, T_{proj})$  é o fator de recuperação de capital e representa o valor real após N anos, sendo obtido através da Equação 40.

$$CRF = \frac{i(i+1)^N}{i(i+1)^N - 1} \quad (40)$$

A taxa de juros  $i$  é calculada através da Equação 41.

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad (41)$$

Onde  $i'$  é a taxa de juros nominal e  $f$  a inflação esperada.

A taxa de juros nominal foi estabelecida como sendo a SELIC (Sistema Especial de Liquidação e de Custódia) com valor de 11,75% e a inflação foi estimada pelo IPCA (Índice de Preços ao Consumidor Amplo) acumulado nos últimos 12 meses de 11,3%, ambos em março de 2022.

Com os dados relacionados ao custo, o software tem então todas ferramentas para otimizar o sistema e estabelecer as melhores soluções. A Tabela 19 mostra os componentes de geração e suas possibilidades de instalação no sistema, além de seus preços.

Tabela 19 – Demanda energética diária.

<b>Equipamento</b>	<b>Custo Inicial (\$/und.)</b>	<b>Custo de troca (\$/und.)</b>	<b>Custo de manutenção (\$/und.)</b>	<b>Vida útil (anos)</b>	<b>Intervalos considerados (und)</b>
<b>Painél CS6W-550MB-AG</b>	192,5	192,5	19,25	30	1, 2, 3, 4, 5
<b>Filme fino CAT PVT117</b>	120	120	12	25	5, 10, 15, 20
<b>Gerador eólico SHARK S601</b>	2261	2261	22,61	20	1, 2
<b>Hidrogerador ServoProp 15</b>	-	-	-	-	-
<b>Inversor CSI-xK-S22002-ED 7kW</b>	1000	1000	0	10	1, 2
<b>Bateria Discover AES 6.6kWh 48VDC</b>	6915	6915	0	10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10

Fonte: Autor (2022).

Os hidrogeradores não influenciam na otimização do sistema, uma vez que já são integrados no mesmo, sendo a própria motorização, dessa forma seu custo foi considerado nulo e sua quantidade fixa em dois hidrogeradores, visto que a embarcação possui dois motores.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para elencar as melhores soluções, o software utiliza o NPC, discutido no capítulo anterior. Já o COE é apenas calculado, mas não é utilizado para a classificação dos sistemas. A Tabela 20 apresenta as melhores soluções encontradas pelo software, mostrando a quantidade de cada componente dessa solução, além dos custos relacionados.

Tabela 20 – Melhores soluções encontradas pelo software.

Arquitetura					Custo			
CS6W-550MB-AG (und)	PVT117 (und)	SHARK S601 (uni)	ServoProp 15 (uni)	Bateria Dis6.6 (uni)	NPC (\$)	COE (\$/kWh)	Custo de Operação (\$/ano)	Custo Inicial (\$)
5	20	2	2	7	142058	0,428	3391	57290
5	20	2	2	8	159346	0,480	3806	64205
5	15	2	2	9	174533	0,526	4161	70520
4	20	2	2	9	175961	0,530	4201	70971

Fonte: Autor (2022).

A primeira solução é a solução com menor custo total no decorrer dos 25 anos de projeto, além de apresentar menor COE e menor custo operacional, sendo a opção selecionada. Como pode-se observar, a melhor solução utiliza uma configuração com a máxima produção elétrica possível, utilizando toda a área para os painéis e filmes fotovoltaicos e todos geradores disponíveis. Isso se deve ao fato do alto custo relativo das baterias, além da restrição de espaço para produção de eletricidade por meio de fontes renováveis em um veleiro, nesse sentido o projeto só se tornou viável devido a utilização de diversas tecnologias com altas eficiências.

### 6.1. BALANÇO ENERGÉTICO

A Tabela 21 apresenta a média da produção anual de eletricidade das diferentes fontes, produção total para essa solução e a porcentagem de produção de cada fonte. Já a Tabela 22 apresenta o consumo médio anual das cargas em corrente contínua, corrente alternada e o total.

Tabela 21 – Média da produção anual de eletricidade.

<b>Produção média anual eletricidade</b>	<b>kWh</b>	<b>%</b>
CS6W-550MB-AG	5251	29,3
CAT 117.5W	4540	25,3
Turbinas eólicas SHARK S601	3584	20,0
Hydro generator ServoProp15	4555	25,4
<b>Total</b>	<b>17930</b>	<b>100</b>

Fonte: Autor (2022).

Verifica-se através da Tabela 21 que a produção de eletricidade está bem distribuída nas diferentes tecnologias de captação. Isso é um fator bem interessante, pois a eventual falha de alguma delas não acarretará em desequilíbrio muito severo no sistema, o qual poderá se manter por um maior tempo até que o problema seja solucionado.

Tabela 22 – Consumo médio anual das cargas.

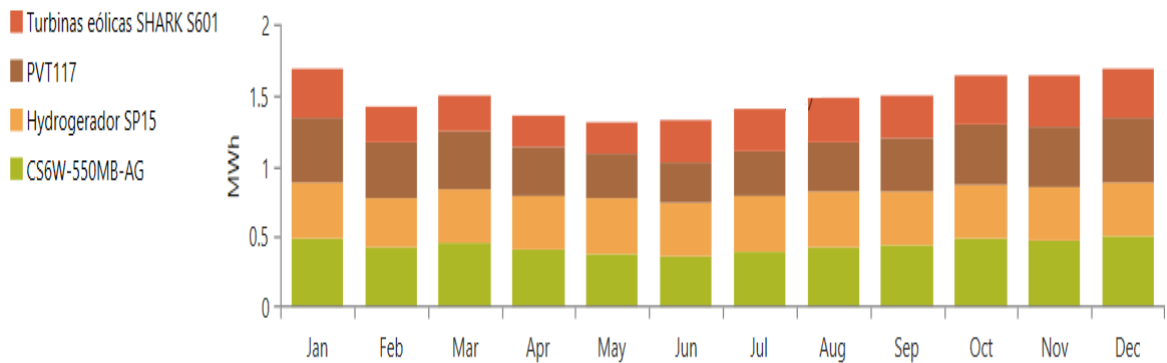
<b>Consumo médio anual eletricidade</b>	<b>kWh</b>	<b>%</b>
Carga CA	1265	9,52
Cargas CC	12019	90,5
<b>Total</b>	<b>13284</b>	<b>100</b>

Fonte: Autor (2022).

Comparando a eletricidade total produzida e o consumo, verifica-se que a produção atende a demanda e ainda que existe uma significativa sobra de eletricidade média anual. Isso se deve devido a variação da produção nos diferentes meses do ano, visto que a produção tem que satisfazer a demanda em todos os meses. Logo em alguns meses existirá uma sobra devido a essa variação, como mostrado na Figura 27 que apresenta a produção de eletricidade mensal das diferentes fontes para todos meses do ano.



Figura 27 – Produção elétrica mensal das diferentes fontes.



Fonte: HOMER Pro (2022).

As variações das produções de eletricidade das diferentes fontes ocorrem devido as variações nos recursos ao decorrer do ano. Verifica-se que nos meses de maio e junho ocorre uma baixa na produção, devido à escassez de ventos e radiação solar.

## 6.2. AUTONOMIA ENERGÉTICA DO BANCO DE BATERIAS

A Tabela 23 apresenta os dados obtidos do banco de baterias. Nesta verificamos que a autonomia da bateria é de 28,8 horas, sendo um valor adequado para o projeto proposto.

Tabela 23 – Dados do banco de baterias.

Quantidade baterias	Voltagem (V)	Autonomia (h)	Capacidade Nominal (kWh)	Tempo de vida esperado (anos)
7	48	28,8	43,7	10

Fonte: Autor (2022).

## 6.3. ANÁLISE FINANCEIRA

A Tabela 24 apresenta os diversos custos dos componentes presentes no sistema, os hidrogeradores não entram nessa análise, visto que os mesmos já são integrados na motorização. Pela tabela percebe-se como o banco de baterias representa a maior parcela do custo total do projeto, tanto no custo inicial quanto na substituição, visto que o tempo de vida da mesma de 10 anos é relativamente baixo

se comparado aos outros componentes, necessitando realizar a substituição no decorrer dos 25 anos de vida útil do projeto.

O custo elevado das baterias se deve por dois fatores, o primeiro relacionado a falta de espaço no veleiro para instalação de mais componentes de geração, o que diminuiria o tamanho do banco de baterias e outro relacionado ao alto custo das baterias de lítio utilizadas no projeto. O segundo caso poderia ser amenizado com a utilização de baterias com melhor custo benefício, porém devido ao espaço limitado no veleiro e o aumento de peso, aumento da resistência e influência na estabilidade da embarcação, baterias com uma maior eficiência energética precisam ser utilizadas, afim de conseguir armazenar a energia necessária em uma área menor e com peso do banco de baterias reduzido.

Tabela 24 – Custos do projeto.

<b>Componente</b>	<b>Custo inicial (\$)</b>	<b>Substituição (\$)</b>	<b>Manutenção (\$)</b>	<b>Revenda (\$)</b>	<b>Total (\$)</b>
<b>CS6W-550MB-AG</b>	962,50	0,00	2400,00	0,00	3362,5
<b>PVT117</b>	2400,00	0,00	6000,00	0,00	8400,0
<b>SHARK S601</b>	4522,00	4522,00	1130,50	3391,50	6783,0
<b>Bateria Dis6.6</b>	48405,00	96810,00	0,00	24202,50	121012,50
<b>Inversor 7kW</b>	1000,00	2000,00	0,00	500,00	2500,00
<b>Total Sistema</b>	<b>57289,50</b>	<b>103332,00</b>	<b>9530,5</b>	<b>28094,0</b>	<b>142058,0</b>

Fonte: Autor (2022).

Outro fator que elevou significativamente o custo do projeto ao final dos 25 anos, foram as taxas de juros e a inflação, ambas muito elevadas no atual momento.

## 7. CONCLUSÃO

Em um planeta extremamente desenvolvido, soluções tecnológicas voltadas a sustentabilidade e amparadas por energias renováveis são cada vez mais importantes. Os veleiros são exemplos de soluções muito antigas que utilizam de energias renováveis para sua propulsão. No entanto apesar de a propulsão principal dos veleiros ser a força dos ventos, a grande maioria deles utilizam motores e geradores a diesel para propulsão auxiliar e geração de energia, devido ao espaço limitado que esses possuem para captação de energia por fontes renováveis.

Porém com o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes de captação de energias renováveis a possibilidade de adotar essas fontes de produção energética, abandonando o uso de combustíveis fósseis vem se tornando cada vez mais viável.

Dentro desse contexto o presente trabalho apresentou o projeto de um veleiro autossustentável e realizou o projeto do sistema fotovoltaico híbrido da embarcação, afim de verificar sua viabilidade energética, sua autonomia e os custos envolvidos.

Na integração casco-hélice foram utilizados os conceitos mais enraizados na literatura de seleção do hélice e do motor voltados a motores à diesel. Com o resultado obtido para os motores a diesel foi então utilizado formulações para obter a potência necessária para motores elétricos, verificando que para essa situação a potência requerida é aproximadamente duas vezes menor, o que foi confirmado com embarcações semelhantes que utilizam o mesmo sistema de motorização.

Com a definição das cargas do sistema fotovoltaico híbrido definidas, verificou-se que o motor elétrico é o que gera o maior consumo. Também foram definidas as unidades de geração, controle de potência e armazenamento. Então foi efetuado a análise do balanço energético do sistema no software HOMER Pro, constatando, mesmo com o alto consumo dos motores, que com a utilização de tecnologias de geração, controle de potência e armazenamento com alta eficiência é possível suprir toda a demanda energética de um veleiro completamente autossustentável de 60 pés, apresentando uma boa autonomia de 28,8 horas do banco de baterias.

Porém na análise de custos ficou evidente o alto valor da implementação e manutenção desse tipo de sistema, sendo que o banco de baterias foi o maior responsável pelo custo elevado no projeto, tanto nos gastos iniciais, tendo um custo

de mais de 48 mil dólares, quanto no decorrer da vida do projeto, visto que seu tempo de vida é de 10 anos, sendo necessário a substituição das baterias por duas vezes no durante o tempo de vida útil do projeto de 25 anos.

Por isso para um aumento na implementação desse tipo de solução, existe a necessidade de melhorar ainda mais o desempenho dessas tecnologias, como aumentar a eficiências dos painéis fotovoltaicos e dos aero e hidrogeradores, e principalmente desenvolver baterias com alto desempenho tendo um custo reduzido, deixando assim o projeto mais viável financeiramente.

## REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, T. R. Hidrogerador para rios sem queda d'água. **Universidade de São Paulo**, São Paulo, 2000.
- BERTRAN, Volker. **Practical ship hydrodynamics**. Butterworth-Heinemann. Grã Bretanha, 2000.
- BORBA, M; GASPAR, N. **Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho**. São Paulo: FAPESP; Amsterdam: InterAcademy Council; Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2010. Disponível online em <http://www.fapesp.br/publicacoes/energia.pdf>
- BREWER, T. **Understanding boat design**. Camden: International Marine, 1993.
- BRINATI, Hernani L. **PNV 2324 Instalações De Máquinas Marítimas**. Universidade de São Paulo. 45p., 2010.
- CANEPPELE, F. L. **Desenvolvimento de um modelo fuzzy para otimização da energia gerada por um sistema híbrido (solar-fotovoltaico e eólico)**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrônômicas) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.
- CHITTICK, R. C.; ALEXANDER J. H.; STERLING H. F. The preparation and properties of amorphous silicon. **J.Electrochemical Soc.**, v. 116, p. 77-81, 1969.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz energética e elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 16 maio 2022.
- EVANS, J. H. **Basic design concepts**. American Society of Naval Engineers Journal. p. 671-678, nov. 1959.
- GOLDEMBERG, J; PALETTA, F. C. **Energias renováveis: série energia e sustentabilidade**. São Paulo: Blucher, 2012.
- HOLTROP, J.; MENNEN, G. G. **An approximate power prediction method**. International Shipbuilding Progress, v. 29, n. 335, p. 166-170, 1982.
- HOLTROP, J.; MENNEN, G. G. **A statistical re-analysis of resistance and propulsion data**. International Shipbuilding Progress, v. 31, n. 363, p. 272-276, 1984.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **IEA data services**. Disponível em: <https://www.iea.org/dataandstatistics/databrowser?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=ElecConsPerCapita>. Acesso em: 16 maio 2022.
- LARSSON, L.; ELIASSON, R. **Principles of Yacht Design**. 2 Ed. Londres: Adlard Coles Nautical, 2000.

- MARTINS, G. S. M. **Conversão do sistema de propulsão a combustão para elétrico em uma embarcação do tipo veleiro**. Monografia (Graduação em Engenharia Naval) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.
- MATSUMOTO, Aghata. **Desenvolvimento de células fotovoltaicas orgânicas e flexíveis**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2013.
- MOLLAND, F. A.; TURNOCK R. S.; HUDSON D. A. **Ship Resistance and Propulsion: Pratical Estimation of Ship Propulsive Power**. Cambridge, 2011.
- PACHECO, FABIANA. Energias renováveis: breves conceitos. **Conjuntura e planejamento**, Salvador, n. 149, p. 4-11, Out. 2006.
- PARANHOS, R.C. **Sistema de energia solar fotovoltaica para geração de energia elétrica em embarcação tipo veleiro**. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia de Energia) – Faculdade do Gama, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel/ Cresesb, 2014.
- RAIMUNDO, D. R. et al. Evaluation of greenhouse gas emissions avoided by wind generation in the Brazilian energetic matrix: a retroactive analysis and future potential. **Resources, Conservation e Recycling**, v. 137, p. 270-280, Jul. 2018.
- RAMPINELLI, G. A; MACHADO, S. **Manual de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída: teoria e prática**. Curitiba: Brazil Publishing, 2021.
- ROH, M.; LEE, K. Y. **Computational ship design**. Singapore: Springer Nature, 2018
- TRINDADE, J. **Hidrodinâmica e Propulsão: Engenharia de Máquinas Marítimas**. Escola Náutica Infante D. Henrique. Portugal, 2012.
- TRUDES, Gustavo Pereira; MONTEIRO, Paulo Eduardo Sampaio. **Dimensionamento e projeto de banco de baterias para um protótipo Fórmula SAE elétrico**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica e Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.
- VAN MANEN, J. D.; VAN OSSANEN, P. **Principles of Naval Architecture, Second Revision, Volume II: Resistance, Propulsion, and Vibration**. Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City, New Jersey USA, 1988.
- YACHTING WORLD. **How hybrid sailing yachts finally became a feasible option**. May 17, 2019. Disponível em: <https://www.yachtingworld.com/features/hybrid-sailing-yachts-120908>. Acesso em: 16 may 2022.

## APÊNDICE A

Tabela 25 – Constantes  $a_n$  série Delft.

Fr	a0	a1	a2	a3	a4
<b>0,125</b>	-6,735654	38,36831	-0,008193	0,055234	-1,997242
<b>0,15</b>	0,38287	38,1729	0,007243	0,026644	-5,295332
<b>0,175</b>	-1,503526	24,40803	0,0122	0,067221	-2,448582
<b>0,2</b>	11,29218	-14,51947	0,047182	0,085176	-2,673016
<b>0,225</b>	22,17867	-49,16784	0,085998	0,150725	-2,878684
<b>0,25</b>	25,90867	-74,75668	0,153521	0,188568	-0,889467
<b>0,275</b>	40,97559	-114,2855	0,207226	0,250827	-3,072662
<b>0,3</b>	45,83759	-184,7646	0,357031	0,338343	3,871658
<b>0,325</b>	89,20382	-393,0127	0,617466	0,460472	11,54327
<b>0,35</b>	212,6788	-801,7908	1,087307	0,538938	10,80273
<b>0,375</b>	336,2354	-1085,134	1,644191	0,532702	-1,224173
<b>0,4</b>	566,5476	-1609,632	2,01609	0,265722	-29,24412
<b>0,425</b>	743,4107	-1708,263	2,435809	0,013553	-81,16189
<b>0,45</b>	1200,62	-2751,715	3,208577	0,25492	-132,0424

Fonte: Adaptado de Larsson e Eliasson (2000).

Tabela 26 – Constantes  $a_n$  série Delft

Fr	a5	a6	a7	a8	a9
<b>0,125</b>	-38,86081	0,956591	-0,002171	0,272895	-0,017516
<b>0,15</b>	-39,55032	1,219563	0,000052	0,824568	-0,047842
<b>0,175</b>	-31,9137	2,216098	0,000074	0,244345	-0,015887
<b>0,2</b>	-11,41819	5,654065	0,007021	-0,094934	0,006325
<b>0,225</b>	7,167049	8,600272	0,012981	-0,327085	0,018271
<b>0,25</b>	24,12137	10,48516	0,025348	-0,327085	0,048449
<b>0,275</b>	53,0157	13,02177	0,035934	-0,715457	0,039874
<b>0,3</b>	132,2568	10,86054	0,066809	-1,719215	0,095977
<b>0,325</b>	331,1197	8,598136	0,104073	-2,815203	0,15596
<b>0,35</b>	667,6445	12,39815	0,166473	-3,026131	0,165055
<b>0,375</b>	831,1445	26,18321	0,238795	-2,45047	0,139154
<b>0,4</b>	1154,091	51,46175	0,288046	-0,178354	0,018446
<b>0,425</b>	937,4014	115,6006	0,365071	1,838967	-0,062023
<b>0,45</b>	1489,269	196,3406	0,528225	1,379102	0,013577

Fonte: Adaptado de Larsson e Eliasson (2000).

## APÊNDICE B

Figura 28 – Coeficientes para gerar as curvas de série B.

<i>Thrust (K<sub>T</sub>)</i>						<i>Torque (K<sub>Q</sub>)</i>					
<i>n</i>	<i>C<sub>s,t,u,v</sub></i>	<i>s(J)</i>	<i>t(P/D)</i>	<i>u(A<sub>E</sub>/A<sub>O</sub>)</i>	<i>v(Z)</i>	<i>n</i>	<i>C<sub>s,t,u,v</sub></i>	<i>s(J)</i>	<i>t(P/D)</i>	<i>u(A<sub>E</sub>/A<sub>O</sub>)</i>	<i>v(Z)</i>
1	+0.00880496	0	0	0	0	1	+0.00379368	0	0	0	0
2	-0.204554	1	0	0	0	2	+0.00886523	2	0	0	0
3	+0.166351	0	1	0	0	3	-0.032241	1	1	0	0
4	+0.158114	0	2	0	0	4	+0.00344778	0	2	0	0
5	-0.147581	2	0	1	0	5	-0.0408811	0	1	1	0
6	-0.481497	1	1	1	0	6	-0.108009	1	1	1	0
7	+0.415437	0	2	1	0	7	-0.0885381	2	1	1	0
8	+0.0144043	0	0	0	1	8	+0.188561	0	2	1	0
9	-0.0530054	2	0	0	1	9	-0.00370871	1	0	0	1
10	+0.0143481	0	1	0	1	10	+0.00513696	0	1	0	1
11	+0.0606826	1	1	0	1	11	+0.0209449	1	1	0	1
12	-0.0125894	0	0	1	1	12	+0.00474319	2	1	0	1
13	+0.0109689	1	0	1	1	13	-0.00723408	2	0	1	1
14	-0.133698	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	+0.168496	3	0	1	0	17	+0.0161886	0	3	1	0
18	-0.0507214	0	0	2	0	18	+0.00318086	1	3	1	0
19	+0.0854559	2	0	2	0	19	+0.015896	0	0	2	0
20	-0.0504475	3	0	2	0	20	+0.0471729	1	0	2	0
21	+0.010465	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	+0.0168424	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	-0.0317791	0	3	1	1	26	-0.00350024	0	6	2	0
27	+0.018604	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	-0.0049819	1	0	0	2	30	+0.0035985	3	0	1	1
31	+0.0025983	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	-0.00163652	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	+0.00421749	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	-0.00146564	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: Oosterveld e Van Oossanen (1975).



## ANEXO A

Para a seleção do melhor hélice foi desenvolvida uma rotina em linguagem Python no console Spyder. O programa gera, através das Equações 19, 20 e 21, para um determinado valor de número de pás ( $Z$ ) e razão de áreas ( $BAR$ ) inseridos, as curvas de  $K_T$ ,  $K_Q$  e  $\eta_0$  da série para cada valor de  $P/D$ . Além disso, gera também a curva de coeficiente de empuxo do casco ( $K_{Tcasco}$ ), através da qual será possível a determinação da máxima eficiência para os valores de  $Z$  e  $BAR$  definidos. Por fim, a rotina verifica o critério de cavitação utilizado no projeto através do diagrama de Burril com limite de 2 a 5% de cavitação no dorso.

Foram testados hélices com 2, 3 e 4 pás sendo variados os valores das razões de áreas, obtendo a máxima eficiência em cada razão de área e verificando o critério de cavitação. Os resultados são representados na Tabela 27.

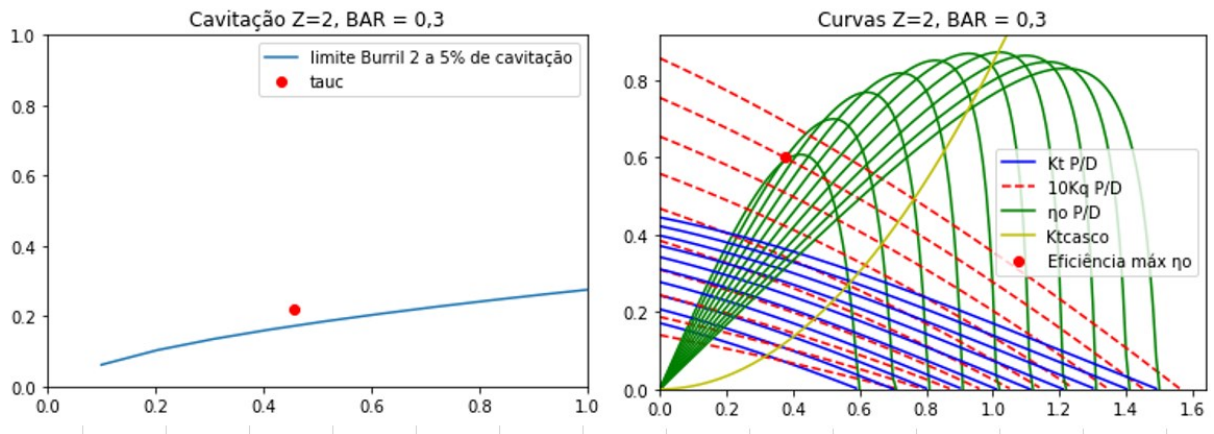
Tabela 27 – Dados seleção hélice.

<b>Z</b>	<b>2</b>	<b>3</b>		<b>4</b>	
<b>BAR</b>	<b>0,3</b>	<b>0,35</b>	<b>0,5</b>	<b>0,4</b>	<b>0,55</b>
<b>J</b>	0,3756	0,4150	0,4058	0,4549	0,4456
<b>P/D</b>	0,5813	0,6403	0,6286	0,7117	0,6974
$\eta_0$	0,6033	0,5732	0,5570	0,5619	0,5542
$K_Q$	0,0100	0,0143	0,0139	0,0194	0,0184
$K_T$	0,1192	0,1455	0,1391	0,1748	0,1678
<b>RPM</b>	1035,0912	936,8854	958,1782	854,7875	872,5955
$\tau_c$	0,2179	0,2299	0,1536	0,2443	0,1702
$\tau_{m\acute{a}x}$	0,1725	0,1939	0,1889	0,2155	0,2105
<b>Cavitação</b>	Não Aprovado	Não Aprovado	Aprovado	Não Aprovado	Aprovado

Fonte: Autor (2022).

Para hélices com duas pás, foi testado apenas a razão de áreas  $BAR = 0,3$ , visto que esta é a única abrangida pelos testes da série B. Os resultados obtidos para esse número de pás podem ser observados na Figura 29.

Figura 29 – Gráficos do hélice de duas pás.

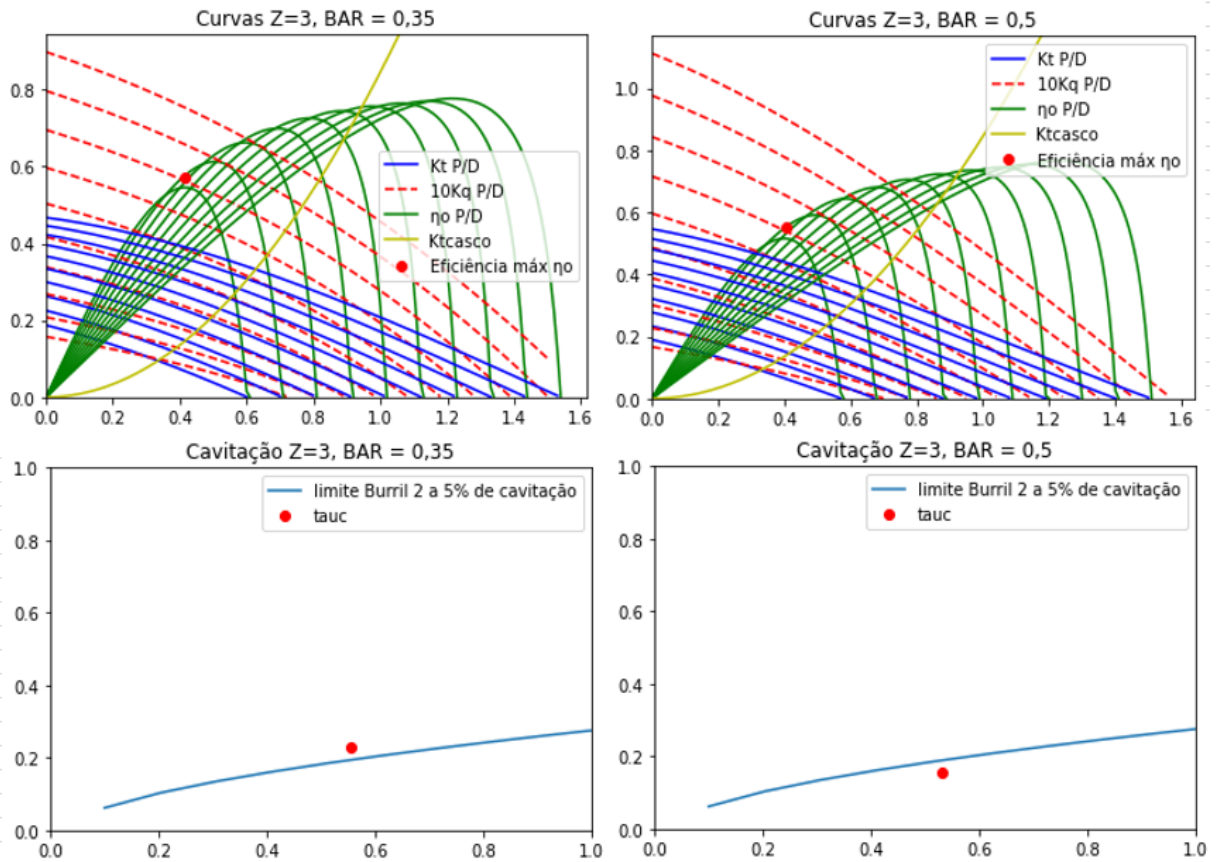


Fonte: Autor (2022).

Para essa situação, como pode ser verificado na Figura x e na Tabela 27, o hélice atingiu uma eficiência acima de 60%, no entanto o mesmo não foi aprovado no critério de cavitação, uma vez que o valor de  $\tau_c$  é maior que  $\tau_{máx}$  estando acima da curva de limite de Burril de 2 a 5% de cavitação como mostrado no gráfico a esquerda.

Para hélices com 3 pás foram analisadas razões de áreas de 0,35 e 0,5, como mostra a Figura 30.

Figura 30 – Gráficos dos hélices de 3 pás.

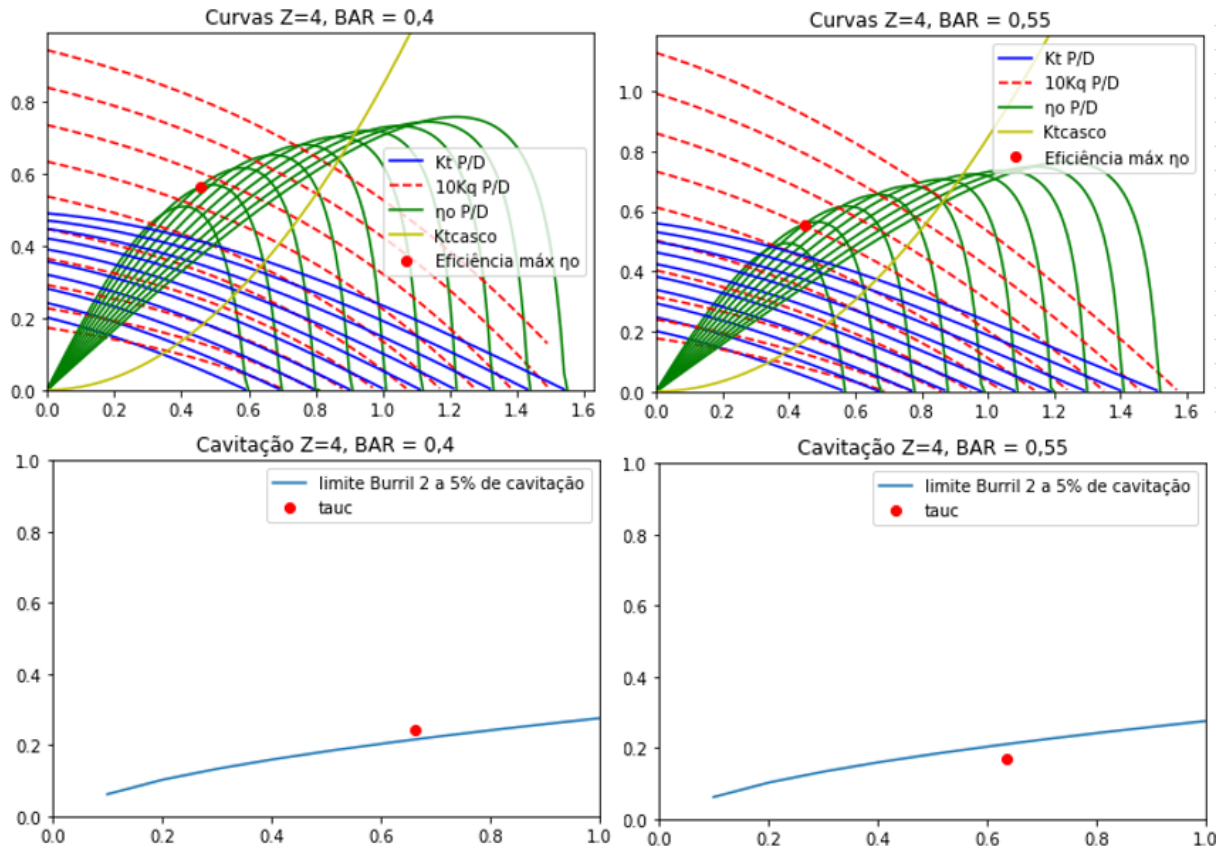


Fonte: Autor (2022).

Verifica-se que para a menor razão de áreas de 0,35 ocorre a maior eficiência, porém não sendo aprovado no critério de cavitação. Com o aumento da razão de áreas para 0,5 a eficiência diminui, no entanto o critério de cavitação é atendido. Como verificou-se que o aumento da razão de área diminui a eficiência e a razão de áreas de 0,5 já atendeu o critério de cavitação, não há necessidade de testar outros hélices com razões de áreas superiores a esse valor.

Por fim foram analisados os hélices com 4 pás como mostra a Figura 31.

Figura 31 – Gráficos dos hélices de 4 pás.



Fonte: Autor (2022).

Nesta situação ocorre algo similar aos hélices de 3 pás, onde a menor razão de áreas apesar de possuir maior eficiência não atende ao critério de cavitação.

Então foi selecionado o hélice com maior eficiência que foi aprovado no critério de cavitação, dessa forma selecionando o hélice de 3 pás com razão de áreas de 0,5, tendo uma eficiência de 55,7%.