



# USO DE ENERGIAS SUSTENTÁVEIS EM NAVIOS DE RECOLHA DE RESÍDUOS

**RAPHAEL SOUZA FREIRE SIMÕES**

janeiro de 2020

# USO DE ENERGIAS SUSTENTÁVEIS EM NAVIOS DE RECOLHA DE RESÍDUOS

Raphael Souza Freire Simões  
1170275

**2019**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica – Mestrado em Energias Sustentáveis



POLITÉCNICO  
DO PORTO

isep

## USO DE ENERGIAS SUSTENTÁVEIS EM NAVIOS DE RECOLHA DE RESÍDUOS

Raphael Souza Freire Simões  
1170275

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Energias Sustentáveis, realizada sob a orientação do professor Doutor Carlos Miguel Pereira da Silva Santos e supervisão do engenheiro Júlio Manuel Marques Barbosa *Chief Project Development Officer* da empresa *Island Power Solutions Ltd.*

**2019**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica – Mestrado em Energias Sustentáveis

POLITÉCNICO  
DO PORTO

isep

## JÚRI

### **Presidente**

Doutor Manuel Carlos Malheiro de Carvalho Felgueiras  
Coordenador do Mestrado de Energias Sustentáveis, ISEP

### **Orientador**

Doutor Carlos Miguel Pereira da Silva Santos  
Professor Adjunto Convidado – Departamento de Engenharia Mecânica, ISEP

### **Supervisor**

Engenheiro Júlio Manuel Marques Barbosa  
Chief Project Development Officer, Island Power Solutions Ltd.

### **Arguente**

Doutor David João da Silva Carvalho  
Investigador do Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM), Universidade de Aveiro



## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer:

À minha mãe por estar sempre me incentivando durante a minha jornada como estudante, mesmo fora do Brasil.

Ao meu pai por ter me apoiado em todos os momentos da minha vida.

À minha noiva por permanecer ao meu lado mesmo nos momentos mais difíceis, sempre me motivando a melhorar e conquistar meus objetivos.

Ao meu orientador Carlos Silva Santos por ter estimulado meu conhecimento e sempre ter me guiado num tema completamente novo e interessante para mim.

Ao meu supervisor Julio Barbosa pelos conselhos e ensinamentos que me proporcionou durante meu estágio.



## PALAVRAS CHAVE

Resíduo marinho; Reanálise meteorológica; Ano típico meteorológico; Navio sustentável; Recurso solar; Recurso eólico.

## RESUMO

Essa tese baseia-se num projeto realizado em conjunto com a empresa *Island Power Solutions Ltd*, cujo objetivo é estudar uma alternativa para reduzir o problema do excesso de lixo plástico nos oceanos, através do projeto de um navio de recolha de resíduos. Este navio possuirá um sistema de tratamento e conversão de lixo em energia a bordo, para assim produzir combustíveis biológicos que possam ser utilizados para tornar a embarcação autossustentável, juntamente com outras fontes alternativas de energia, em especial a energia solar.

Esta tese consiste num estudo preliminar de tal embarcação incluindo dimensionamento e análise energética, para assim avaliar o potencial e identificar as áreas que ainda necessitam de desenvolvimento para o uso efetivo deste sistema em ambiente real de operação.

Para esse estudo foram analisadas diversas tecnologias e navios existentes que realizam operação de coleta de lixo ou que simplesmente navegam movidos apenas a energias renováveis. Também foi necessário utilizar sistemas de reanálise meteorológica como o MERRA-2 e o ERA5 para se obter com maior precisão o comportamento dos recursos solar e eólico no local de estudo, o Mar Mediterrâneo.

Simplificações baseadas em artigos científicos precisaram ser feitas para se obter um primeiro modelo teórico, durante a fase preliminar do projeto da embarcação sustentável, que é objetivo da tese.

Conclui-se neste trabalho que é possível se desenvolver barcos de recolha de resíduos e reaproveitá-los internamente, este navio também contará com uma produção de energia extra, oriunda de painéis fotovoltaicos. No entanto muitos dos equipamentos necessários para o correto funcionamento do navio ainda estão em fase de estudo ou desenvolvimento, causando um atraso na finalização do projeto.

**KEYWORDS**

*Marine litter; Meteorological reanalysis; Typical meteorological year; Sustainable vessel; Solar resource, Wind resource.*

**ABSTRACT**

*This thesis is based on a project, carried out jointly with the company Island Power Solutions Ltd, whose goal is to study an alternative to reduce the problem of excess of plastic waste in the oceans through the design of a waste collecting vessel. This ship will have an on-board waste-to-energy system to produce biofuels that can be used to make the vessel self-sustaining, along with other alternative sources of energy, especially solar energy.*

*This thesis is a preliminary study of such a vessel, including sizing and energy analysis, to evaluate the potential and identify the areas that still need development for the effective use of this system in real operating environment.*

*For this study, several technologies and existing ships that carry out operations of marine litter retrieval or that simply sail powered by renewable energy were analyzed. It was also necessary to use meteorological reanalysis systems such as MERRA-2 and ERA5 to obtain more accurately the behavior of solar and wind resources at the studied location, the Mediterranean Sea.*

*Simplifications based on scientific articles had to be made to obtain a first theoretical model during the preliminary phase of the sustainable vessel project, which is the final goal of the thesis.*

*It is concluded in this work that it is possible to develop waste collection boats and reuse them internally. This ship will also have an extra energy production from photovoltaic panels. However, many of the equipment required for the proper functioning of the ship are still under study or development, causing a delay in the completion of the project.*



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

3D	Três dimensões
ABS	<i>American Bureau of Shipping</i>
ACCESS	<i>Australian Community Climate and Earth-System Simulator</i>
AHTS	<i>Anchor Handling Tug Supply</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
C3S	<i>Copernicus Climate Change Service</i>
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>
CFSR	<i>Climate Forecast System Reanalysis</i>
CSV	<i>Comma Separated Values</i>
DHI	Irradiação Horizontal Difusa
DNI	Irradiação Normal Direta
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>
ECMWF	<i>Europe Centre for Medium-Range Weather Forecast</i>
EPF	<i>Energy Pattern Factor</i>
ERA	<i>European Reanalysis</i>
GEOS-5	<i>Goddard Earth Observing System Model, version 5</i>
GFS	<i>Global Forecast System</i>
GHI	Irradiação Global Horizontal
GPGP	<i>The Great Pacific Garbage Patch</i>
GRG	<i>Generalized Reduced Gradient</i>
GSI	<i>Global Statistical Interpolation</i>
HAWT	Turbina Eólica de Eixo Horizontal
HELMEPA	Hellenic Marine Environment Protection Association
IFS	<i>Integrated Forecast System</i>
IMO	<i>International Maritime Organization</i>
IPS	<i>Island Power Solutions Ltd.</i>
JRA-25	<i>Japanese 25-year Reanalysis</i>
LOA	Comprimento total do navio
LPP	Comprimento entre perpendiculares do navio
MERRA	<i>Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
netCDF	<i>Network Common Data Form</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
NWP	Previsões Numéricas do Clima
PDF	Função de densidade de probabilidade

PR	<i>Performance Ratio</i>
PSV	<i>Platform Supply Vessel</i>
RSU	Resíduo Sólido Urbano
TMY	Ano Meteorológico Típico
UG	<i>Universal Group</i>
VAWT	Turbina Eólica de Eixo Vertical
WRF	<i>Weather Research and Forecasting</i>

#### Lista de Unidades

h	Hora (tempo)
kg	Quilograma (massa)
kg/h	Quilograma por hora (vazão)
kg/km <sup>2</sup>	Quilograma por quilómetro quadrado (concentração)
kg/m <sup>2</sup>	Quilograma por metro quadrado (concentração)
kg/m <sup>3</sup>	Quilograma por metro cúbico (densidade)
kg/s	Quilograma por segundo (vazão)
km/h	Quilómetro por hora (velocidade)
kN	Quilonewton (força)
kts	Nós (velocidade)
kW	Quilowatt (potência)
kWh	Quilowatt hora (energia)
kWp	Quilowatt pico (potência nominal)
L	Litro (volume)
m	Metro (comprimento/largura/altura)
m <sup>2</sup>	Metro quadrado (área)
m <sup>3</sup>	Metro cúbico (volume)
m/s	Metros por segundo (velocidade)
MW	Megawatt (potência)
MWh	Megawatt hora (energia)
ton	Tonelada (massa)
tonf	Toneladas-força (força)
ton/km <sup>2</sup>	Tonelada por quilómetro quadrado (concentração)
ton/m <sup>3</sup>	Tonelada por metro cúbico (densidade)
W	Watt (potência)
W/m <sup>2</sup>	Watt por metro quadrado (potência por unidade de área)

#### Lista de Símbolos

$A_{ps}$	Área disonível para os painéis	[m <sup>2</sup> ]
$A_v$	Área velica	[m <sup>2</sup> ]
$B$	Boca da embarcação	[m]
$c$	Parâmetro de escala da distribuição Weibull	[m/s]

$C_{mr}$	Concentração média de resíduos	[kg/km <sup>2</sup> ]
$C_{ay}$	Coeficiente empírico de corrente	[N*s <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> ]
$C_b$	Coeficiente de bloco	[-]
$C_h$	Coeficiente de altura	[-]
$C_{kg}$	Coeficiente de peso	[-]
$C_m$	Coeficiente de seção mestra	[-]
$C_p$	Coeficiente prismático	[-]
$C_s$	Coeficiente de forma	[-]
$C_w$	Coeficiente empírico de vento	[-]
$C_{wp}$	Coeficiente de linha d'água	[-]
$D$	Pontal	[m]
$E_{ps}$	Energia produzida pelos painéis	[kWh]
$F_{ay}$	Força de corrente	[kN]
$F_{mdy}$	Força de onda	[kN]
$F_{mdy\ ref}$	Força de onda de referência	[kN]
$Fr$	Número de <i>Froude</i>	[-]
$FS$	Número de <i>Finkelstein-Schafer</i>	[-]
$F_w$	Força do vento	[kN]
$g$	Aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$GM$	Altura metacêntrica	[m]
$H_s$	Altura significativa de onda	[m]
$H_{s\ ref}$	Altura significativa de onda de referência	[m]
$k$	Parâmetro de forma da distribuição Weibull	[-]
$KG$	Altura do centro de gravidade	[m]
$KM$	Distância vertical entre a quilha e o metacentro	[m]
$K_r$	Raio de rotação de <i>roll</i>	[m]
$LOA$	Comprimento total	[m]
$L_{pp}$	Comprimento entre perpendiculares	[m]
$L_{ref}$	Comprimento de referência	[m]
$m_{sp}$	Margem de segurança	[-]
$n$	Número de leituras diárias em um mês	[-]
$P_r$	Potência requerida	[kW]
$Q_h$	Quantidade de resíduos coletados por hora	[ton/h]
$r$	Alcance transversal do sistema de coleta	[m]
$R_t$	Resistência total ao avanço	[kN]
$S$	Área da superfície molhada	[m <sup>2</sup> ]
$sf$	Fator de espaçamento	[-]
$T$	Calado	[m]
$T_s$	Calado de verão	[m]
$T_{\vartheta}$	Período de <i>roll</i>	[s]
$u_f$	Velocidade horizontal do vento	[m/s]

$V$	Velocidade do navio	[m/s]
$\langle v \rangle$	Velocidade média do vento	[m/s]
$\langle v^3 \rangle$	Velocidade cúbica média do vento	[m <sup>3</sup> /s <sup>3</sup> ]
$V_c$	Velocidade de corrente	[m/s]
$V_s$	Velocidade de navegação	[kts]
$V_w$	Velocidade do vento	[m/s]
$v$	Velocidade vertical do vento	[m/s]
$v_{op}$	Velocidade de operação do navio	[kts]
$z$	Zénite	[graus]
$\Delta$	Deslocamento do navio (massa do líquido deslocado pelo casco)	[kg]
$\delta_i$	Diferença absoluta entre CDF de longo prazo e do mês candidato em x	[-]
$\eta_{col}$	Eficiência do sistema de coleta	[-]
$\eta_p$	Eficiência propulsiva	[-]
$\eta_{ps}$	Eficiência do painel solar	[-]
$\nu$	Viscosidade cinemática	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	Massa volúmica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\nabla$	Volume submerso do navio	[m <sup>3</sup> ]
$\nabla_a$	Volume da superestrutura	[m <sup>3</sup> ]
$\nabla_{DH}$	Volume de estruturas de convívio no convés	[m <sup>3</sup> ]

## GLOSSÁRIO DE TERMOS

Altura metacêntrica	Distância vertical entre o centro de gravidade e o metacentro no navio
Azimute	Ângulo entre a direção norte e a projeção da superfície normal no plano horizontal; medido no sentido horário a partir do norte.
<i>Biofuels</i>	Combustíveis biológicos
<i>Blockchain</i>	Protocolo de segurança
Boca	Largura do navio
<i>Bow thruster</i>	Impelidores de proa
Calado	Altura submersa do casco de um navio
<i>Download</i>	Transferência
<i>Flettner rotor</i>	Cilindros rotatórios
<i>Input</i>	Entrada
<i>Jupyter notebooks</i>	Ambiente virtual de programação
<i>Kite</i>	Pipa
Metacentro	Ponto virtual para determinação do equilíbrio do navio
<i>Off-grid</i>	Desconectado da rede
<i>Offshore</i>	Em alto mar
<i>Performance Ratio</i>	Índice de desempenho de um sistema fotovoltaico
<i>Pitch</i>	Rotação em relação ao eixo transversal
Pontal	Altura total do casco de um navio
Popa	Região traseira do navio
Proa	Região frontal do navio
<i>Pyrolysis oil</i>	Óleo de Pirólise
<i>Python</i>	Linguagem de programação
<i>Roll</i>	Rotação em relação ao eixo longitudinal
<i>Software</i>	Programa de computador
<i>Solver</i>	Optimizador
<i>Stern thruster</i>	Impelidores de popa
Superestrutura	Estrutura de casaria acima do casco de um navio
<i>Syngas</i>	Gás de síntese
<i>Waste to energy</i>	Sistema de conversão de lixo
<i>Wingsails</i>	Velas navais rígidas
<i>Yaw</i>	Rotação em relação ao eixo vertical

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Principais giros oceânicos. Fonte:</i>	
<i><a href="https://pt.wikipedia.org/wiki/Giro_oce%C3%A2nico#Giros_subtropicais">https://pt.wikipedia.org/wiki/Giro_oce%C3%A2nico#Giros_subtropicais</a>.....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2: Tamanhos dos detritos plásticos nos oceanos. Fonte: "Plastic Pollution in the World`s Oceans" (2014; Eriksen, Lebreton, et al.).....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 3: Contagem da densidade global (peças/km<sup>2</sup>) para cada tamanho de detrito. Fonte: "Plastic Pollution in the World`s Oceans" (2014; Eriksen, Lebreton, et al.).....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 4: Island Power Solutions logo. Fonte: <a href="https://islandpower.energy/">https://islandpower.energy/</a>.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 5: Logo do projeto ICollect. Fonte: <a href="https://icollect.earth">https://icollect.earth</a>.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 6: Fases do projeto ICollect. Fonte: <a href="https://icollect.earth/">https://icollect.earth/</a>.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 7: Localização dos 5 navios tanque. Fonte: <a href="https://icollect.earth">https://icollect.earth</a>.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 8: Estrutura do Sol. Fonte: Livro Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems. ....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 9: Conjunto de painéis fotovoltaicos. Fonte: <a href="https://www.edp.pt/particulares/comunidade/acontecer/como-funciona-um-painel-fotovoltaico/">https://www.edp.pt/particulares/comunidade/acontecer/como-funciona-um-painel-fotovoltaico/</a>.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 10: Modelo de Três Células. Fonte: <a href="https://alunosonline.uol.com.br/geografia/circulacao-atmosferica.html">https://alunosonline.uol.com.br/geografia/circulacao-atmosferica.html</a>.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 11: Brisas marítimas e terrestres. Fonte:</i>	
<i><a href="https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/otempo/previsao.numerica/index.html?page=aladin.brisa.mar.xml">https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/otempo/previsao.numerica/index.html?page=aladin.brisa.mar.xml</a>.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 12: Mapa de ventos. Fonte: <a href="https://www.meteoblue.com/pt/weather-maps/porto_portugal_2735943?variable=wind&amp;level=surface&amp;lines=none&amp;mapcenter=27.9944N-15.1172&amp;zoom=3">https://www.meteoblue.com/pt/weather-maps/porto_portugal_2735943?variable=wind&amp;level=surface&amp;lines=none&amp;mapcenter=27.9944N-15.1172&amp;zoom=3</a>.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 13: Turbina eólica de eixo vertical. Fonte: <a href="https://www.archiexpo.com/pt/prod/aeolos/product-130919-1525437.html">https://www.archiexpo.com/pt/prod/aeolos/product-130919-1525437.html</a>.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 14: Turbina eólica de eixo horizontal. Fonte: <a href="https://engenhariae.com.br/curiosidades/por-que-as-turbinas-eolicas-sao-pintadas-de-branco">https://engenhariae.com.br/curiosidades/por-que-as-turbinas-eolicas-sao-pintadas-de-branco</a>.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 15: Espiral de Evans Fonte:</i>	
<i><a href="http://www1.oceanica.ufjf.br/deno/prod_academico/relatorios/2013/williamfreitas/relat1/Relatorio1.htm">http://www1.oceanica.ufjf.br/deno/prod_academico/relatorios/2013/williamfreitas/relat1/Relatorio1.htm</a>.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 16: Demonstração da situação de fuga de vida marinha. Fonte: Youtube video - The Ocean Cleanup Technology, Explained. ....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 17: Demonstração do processo de recolha. Fonte: Youtube video - The Ocean Cleanup Technology, Explained. ....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 18: Modelo do sistema 001/B. Fonte: <a href="https://theoceancleanup.com/">https://theoceancleanup.com/</a> [27].....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 19: Sistema Interceptor. Fonte: <a href="https://theoceancleanup.com/">https://theoceancleanup.com/</a> [27].....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 20: Exemplificação do efeito Magnus. Fonte:</i>	
<i><a href="http://estadoquantico.blogspot.com/2011/01/efeito-magnus.html">http://estadoquantico.blogspot.com/2011/01/efeito-magnus.html</a>.....</i>	<i>31</i>

Figura 21: Navio com Rotor Sails em seu convés principal. Fonte: <a href="https://worldmaritimenews.com/archives/285275/norsepower-rotor-sails-achieve-8-2-of-fuel-savings-on-maersk-pelican/">https://worldmaritimenews.com/archives/285275/norsepower-rotor-sails-achieve-8-2-of-fuel-savings-on-maersk-pelican/</a> .....	32
Figura 22: Sky Sails conectada a um yacht do tipo trimarã. Fonte: <a href="https://www.skysails-yacht.com/system/advantages/">https://www.skysails-yacht.com/system/advantages/</a> .....	33
Figura 23: Wingsails em um catamarã. Fonte: <a href="https://www.boatdesign.net/threads/wing-sails.36306/page-2">https://www.boatdesign.net/threads/wing-sails.36306/page-2</a> .....	34
Figura 24: Características da oceanwing. Fonte: <a href="https://vplp.fr/realisation/oceanwings/58.html">https://vplp.fr/realisation/oceanwings/58.html</a> .....	34
Figura 25: Oceanwings propelindo um yacht. Fonte: <a href="https://www.luxuo.com/motoring/yachting/komorebi-vplp-oceanwings-hybrid-propulsion.html">https://www.luxuo.com/motoring/yachting/komorebi-vplp-oceanwings-hybrid-propulsion.html</a> .....	35
Figura 26: Vistas frontal, lateral e superior do modelo proposto para o Ocean Saviour. Fonte: <a href="https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-6176135/New-40-million-eco-yacht-collects-five-TONNES-plastic-ocean-day-recycles-it.html">https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-6176135/New-40-million-eco-yacht-collects-five-TONNES-plastic-ocean-day-recycles-it.html</a> .....	36
Figura 27: The Manta. Fonte: <a href="https://www.theseacleaners.org/en/the-manta-a-revolutionary-vessel/">https://www.theseacleaners.org/en/the-manta-a-revolutionary-vessel/</a> .	37
Figura 28: Procedimento de recolha de resíduos no Manta. Fonte: <a href="https://www.theseacleaners.org/en/technical-data/">https://www.theseacleaners.org/en/technical-data/</a> [31] .....	38
Figura 29: Navio Energy Observer. Fonte: <a href="http://www.energy-observer.org/">http://www.energy-observer.org/</a> .....	40
Figura 30: Desempenho energético durante uma travessia de 50 dias. Fonte: <a href="https://www.linkedin.com/company/energyobserver/">https://www.linkedin.com/company/energyobserver/</a> .....	41
Figura 31: Navio Planet Solar. Fonte: <a href="http://www.bluebird-electric.net/planetsolar.htm">http://www.bluebird-electric.net/planetsolar.htm</a> .....	42
Figura 32: Sistema de coleta por tapetes rolantes. Fonte: <a href="https://getboat.com/de/boat-news/eko-yahta-ocean-saviour-vo-spasenie-okeana-ot-musora">https://getboat.com/de/boat-news/eko-yahta-ocean-saviour-vo-spasenie-okeana-ot-musora</a> .....	48
Figura 33: Bolsa de coleta para recolha de resíduos. Fonte: <a href="http://www.thomsea.fr/UK/hydrocarbures.awp">http://www.thomsea.fr/UK/hydrocarbures.awp</a> .....	49
Figura 34: Sistema de coleta do projeto ReCleanSea. Fonte: <a href="http://www.recleansea.org/">http://www.recleansea.org/</a> [42] .....	50
Figura 35: Esquema simplificado da unidade de conversão do lixo. ....	55
Figura 36: Modelo do barco. Fonte: <a href="https://www.icollect.earth/">https://www.icollect.earth/</a> [14] .....	56
Figura 37: Embarcação do tipo AHTS. Fonte: <a href="https://www.marineinsight.com/types-of-ships/features-applications-and-limitations-of-anchor-handling-tug-supply-vessels-ahts/">https://www.marineinsight.com/types-of-ships/features-applications-and-limitations-of-anchor-handling-tug-supply-vessels-ahts/</a> .....	58
Figura 38: Esquema dos principais parâmetros de um navio. Fonte: <a href="https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/projecto-de-defensas/principais-caracteristicas-dos-navios/">https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/projecto-de-defensas/principais-caracteristicas-dos-navios/</a> .....	59
Figura 39: Regressão linear dos parâmetros chave .....	61
Figura 40: Corte esquemático da seção mestra de um navio, com os parâmetros geométricos de estabilidade. Fonte: <a href="https://fas.org/man/dod-101/navy/docs/swos/dca/stg4-01.html">https://fas.org/man/dod-101/navy/docs/swos/dca/stg4-01.html</a> .....	63
Figura 41: Representação dos parâmetros de forma de um navio. Fonte: <a href="https://www.slideserve.com/cirila/ship-form">https://www.slideserve.com/cirila/ship-form</a> & <a href="http://marinegyaan.com/what-is-coefficient-of-fineness-of-waterplane-area/">http://marinegyaan.com/what-is-coefficient-of-fineness-of-waterplane-area/</a> .....	64
Figura 42: Modelo 3D do casco .....	68
Figura 43: Sistema de posicionamento dinâmico e movimentos restringidos. Fonte: <a href="https://www.portalmaritimo.com/2017/02/17/entenda-de-maneira-simples-como-funciona-um-sistema-de-posicionamento-dinamico/">https://www.portalmaritimo.com/2017/02/17/entenda-de-maneira-simples-como-funciona-um-sistema-de-posicionamento-dinamico/</a> .....	70

Figura 44: Coeficientes referentes a força do vento. Fonte: API, A. P. (1987). API RP 2P, Recommended Practice for the Analysis of Spread Mooring System for Floating Drilling Units [48] .....	72
Figura 45: Gráfico da relação altura de onda e força de onda para uma embarcação de referência com 400 pés de comprimento. Fonte: API, A. P. (1987). API RP 2P, Recommended Practice for the Analysis of Spread Mooring System for Floating Drilling Units [48] .....	74
Figura 46: Pontos selecionados para a obtenção das séries temporais. ....	78
Figura 47: Resumo das séries temporais .....	78
Figura 48: Gráficos comparativos de CDF para diferentes meses e parâmetros .....	81
Figura 49: Histograma da irradiação global anual, baseada nas séries temporais .....	83
Figura 50: Carta Solar em um ponto no norte do Mar Mediterrâneo. ....	85
Figura 51: Carta Solar em um ponto no sul do Mar Mediterrâneo .....	85
Figura 52: Esquema trigonométrico para cálculo do sombreamento. ....	86
Figura 53: Características do painel fotovoltaico considerado. Fonte: <a href="https://www.canadiansolar.com/solarPanels/detail/29">https://www.canadiansolar.com/solarPanels/detail/29</a> [54] .....	87
Figura 54: Produção energética mensal do sistema fotovoltaico, baseado nas séries temporais simples. 88	
Figura 55: Gráficos em um dia de inverno e verão respectivamente, representando a energia solar produzida .....	89
Figura 56: Base de dados ERA5 referente ao TMY. ....	90
Figura 57: Gráfico anual comparativo de quatro bases de dados de reanálise .....	91
Figura 58: Variação da irradiação anual em função da latitude .....	92
Figura 59: Produção mensal de energia por fontes solares.....	93
Figura 60: Vista superior parcial da região Mediterrânea. ....	95
Figura 61: Frequência de ocorrência das velocidades de vento retirada da base de dados de séries temporais. ....	96
Figura 62: Frequência de ocorrência das velocidades de vento retirada da base de dados ERA5 .....	97
Figura 63: Função de distribuição cumulativa (CDF) .....	98
Figura 64: Gráfico representativo da variabilidade do recurso eólico ao longo do ano típico meteorológico, baseado no ERA5.....	98
Figura 65: Gráficos representando a variabilidade do recurso eólico no inverno e verão respectivamente, baseados no ERA5. ....	99
Figura 66: Velocidades médias de vento para cada estação do ano, obtidas pelo sistema ERA5.....	100
Figura 67: Velocidade média mensal do vento, a partir das séries temporais. ....	100
Figura 68: Turbina de referência. Fonte: <a href="https://www.windturbinestar.com/5kwv-v-aeolos-wind-turbine.html">https://www.windturbinestar.com/5kwv-v-aeolos-wind-turbine.html</a> [59] .....	101
Figura 69: Características da turbina de referência. Fonte: <a href="https://www.windturbinestar.com/5kwv-v-aeolos-wind-turbine.html">https://www.windturbinestar.com/5kwv-v-aeolos-wind-turbine.html</a> [59].....	101
Figura 70: Curva de potência aproximada para a turbina de referência .....	102
Figura 71: Movimentos de um navio. Fonte: <a href="https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RU-SHIP/2015-10/DNVGL-RU-SHIP-Pt3Ch4.pdf">https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RU-SHIP/2015-10/DNVGL-RU-SHIP-Pt3Ch4.pdf</a> .....	105



## ÍNDICE DE TABELAS

<i>Tabela 1: Contagem estimada (n x 1010 peças) e peso (g x 102 toneladas) de plástico no Pacífico Norte (NP), Atlântico Norte (NA), Pacífico Sul (SP), Atlântico Sul (SA), Índico (IO), Mar Mediterrâneo (MED) e oceano global (Total). Fonte: "Plastic Pollution in the World's Oceans" (2014; Eriksen, Lebreton, et al.)...4</i>	
<i>Tabela 2: Parâmetros principais de alguns modelos de NWP. Fonte: Huang J., Rikus L.J., Qin Y., Katzfey J. (2018) Assessing Model Performance of Daily Solar Irradiance Forecasts over Australia. [34]..... 42</i>	
<i>Tabela 3 : População costeira e produção de lixo/plástico no ano de 2010 por países do Mediterrâneo. Fonte: Marine Litter Assessment in the Mediterranean [40]. ..... 47</i>	
<i>Tabela 4: Dados da localização alvo da operação..... 52</i>	
<i>Tabela 5: Estimativa da capacidade de coleta do navio..... 53</i>	
<i>Tabela 6: Definição do sistema de conversão e dimensionamento dos tanques. .... 56</i>	
<i>Tabela 7: Navios semelhantes ..... 60</i>	
<i>Tabela 8: Variáveis de restrição para a aplicação do solver..... 63</i>	
<i>Tabela 9: Variáveis modificadas automaticamente pelo software. .... 65</i>	
<i>Tabela 10: Função objetivo..... 66</i>	
<i>Tabela 11: Parâmetros do navio..... 67</i>	
<i>Tabela 12: Resistências calculadas pelo método de Delft ..... 69</i>	
<i>Tabela 13: Velocidade x Resistência (variação)..... 69</i>	
<i>Tabela 14: Força e potência necessárias para as velocidades definidas ..... 70</i>	
<i>Tabela 15: Parâmetros ambientais no Mar Mediterrâneo ..... 71</i>	
<i>Tabela 16: Parâmetros e definição da força do vento..... 71</i>	
<i>Tabela 17: Parâmetros e definição da força de corrente ..... 72</i>	
<i>Tabela 18: Parâmetros e definição da força de onda..... 73</i>	
<i>Tabela 19: Resultante das forças ambientais..... 74</i>	
<i>Tabela 20: Força e potência devido as forças ambientais..... 75</i>	
<i>Tabela 21: Demanda energética do grupo 12, composto pelos equipamentos específicos ..... 76</i>	
<i>Tabela 22: Demanda energética do grupo 13, composto pelos propulsores ..... 76</i>	
<i>Tabela 23: Resumo do balanço energético..... 76</i>	
<i>Tabela 24: Seção inicial da tabela com a série temporal em um ponto geográfico. .... 79</i>	
<i>Tabela 25: Valores de peso em dois métodos base. Fonte: Wilcox S.; Marion W. (2008) User's Manual for TMY3 Data Sets [52]. ..... 80</i>	
<i>Tabela 26: TMY em função dos pesos de cada parâmetro..... 82</i>	
<i>Tabela 27: GHI mensal baseado na análise de séries temporais simples ..... 84</i>	
<i>Tabela 28: Cálculo de distância em função do sombreamento. .... 86</i>	
<i>Tabela 29: Comparativo do recurso solar..... 93</i>	
<i>Tabela 30: Comparativo mensal da energia produzida por fontes solares ..... 93</i>	
<i>Tabela 31: Resumo da análise do recurso eólico. .... 103</i>	



# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.1.1	POLUIÇÃO DOS OCEANOS .....	1
1.1.2	A INDÚSTRIA DE NAVEGAÇÃO E O CLIMA .....	5
1.2	A EMPRESA <i>ISLAND POWER SOLUTIONS LTD</i> .....	6
1.3	MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DO PROJETO A DESENVOLVER .....	7
1.4	ESTRUTURA DA TESE .....	11
2	CONCEITOS FUNDAMENTAIS E METODOLOGIA.....	14
2.1	ENERGIA SOLAR.....	14
2.1.1	RECURSO SOLAR.....	14
2.1.2	PAINÉIS FOTOVOLTAICOS .....	15
2.2	ENERGIA EÓLICA.....	16
2.2.1	RECURSO EÓLICO .....	16
2.2.2	TURBINAS EÓLICAS.....	18
2.3	REANÁLISE METEOROLÓGICA .....	20
2.3.1	MERRA-2.....	20
2.3.2	ERA5 .....	21
2.4	PROJETO DE UM NAVIO .....	21
3	REVISÃO LITERÁRIA E PROJETOS INSPIRADORES.....	26
3.1	TECNOLOGIAS INOVADORAS .....	26
3.1.1	THE OCEAN CLEANUP .....	26
3.1.2	ROTOR SAILS.....	30
3.1.3	SKY SAILS .....	32
3.1.4	OCEANWINGS.....	33
3.2	EMBARCAÇÕES EXISTENTES.....	35
3.2.1	OCEAN SAVIOUR.....	35
3.2.2	THE MANTA .....	37
3.2.3	ENERGY OBSERVER.....	38
3.2.4	PLANET SOLAR.....	41
3.3	ESTUDOS ANTERIORMENTE DESENVOLVIDOS DE ANÁLISE METEOROLÓGICA .....	42

4	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO .....	45
4.1	DEFINIÇÃO DA REGIÃO DE OPERAÇÃO .....	45
4.2	DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE RECOLHA E TRATAMENTO DO LIXO .....	47
4.2.1	SISTEMA DE RECOLHA .....	48
4.2.2	TECNOLOGIA DE TRATAMENTO .....	50
4.3	CÁLCULOS PRELIMINARES.....	51
4.3.1	CÁLCULO DOS SISTEMAS DE RECOLHA E CONVERSÃO EMBARCADOS .....	51
4.3.2	ANÁLISE DE EMBARCAÇÕES SEMELHANTES .....	57
4.3.3	DIMENSIONAMENTO INICIAL DO NAVIO .....	62
4.3.4	CÁLCULO DA NECESSIDADE ENERGÉTICA.....	67
4.4	AVALIAÇÃO DOS RECURSOS EÓLICO E SOLAR .....	77
4.4.1	DEFINIÇÃO DO ANO TÍPICO METEOROLÓGICO .....	77
4.4.2	ANÁLISE DE ENERGIA SOLAR .....	83
4.4.3	ANÁLISE DE ENERGIA EÓLICA .....	94
4.5	INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS .....	103
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	109
5.1	CONCLUSÕES.....	109
5.2	TRABALHOS FUTUROS.....	111
6	BIBLIOGRAFIA.....	113
7	ANEXOS.....	119
7.1	CÓDIGO <i>PYTHON</i> APLICADO NO <i>JUPYTER NOTEBOOK</i> PARA REGRESSÃO DE NAVIOS.....	119
7.2	CÓDIGO <i>PYTHON</i> APLICADO NO <i>JUPYTER NOTEBOOK</i> PARA O DESENVOLVIMENTO DO TMY .....	121
7.2.1	CÓDIGO PARA A DEFINIÇÃO DO ANO TÍPICO METEOROLÓGICO DA REGIÃO NORTE DO MEDITERRÂNEO.....	121
7.2.2	CÓDIGO PARA A DEFINIÇÃO DO ANO TÍPICO METEOROLÓGICO DA REGIÃO SUL DO MEDITERRÂNEO.....	125
7.2.3	CÓDIGO PARA A DEFINIÇÃO DO ANO TÍPICO METEOROLÓGICO GLOBAL DO MAR MEDITERRÂNEO.....	129
7.2.4	CÓDIGO PARA A VISUALIZAÇÃO GRÁFICA COMPARATIVA ENTRE OS VALORES DO ANO TÍPICO METEOROLÓGICO E OS VALORES DE LONGO PRAZO .....	130
7.2.5	CÓDIGO PARA A ANÁLISE DOS RECURSOS SOLARES E EÓLICOS A PARTIR DO TMY COM DADOS ORIUNDOS DE SÉRIES TEMPORAIS.....	132

---

7.3	COMANDO UTILIZADO PARA O ACESSO DOS DADOS MERRA-2 ATRAVÉS DE LINHAS DE COMANDOS NO <i>WINDOWS</i> .....	141
7.4	CÓDIGO <i>PYTHON</i> PARA O ACESSO À BASE METEOROLÓGICA ERA5 ATRAVÉS DE <i>API</i>	141
7.5	CÓDIGO <i>PYTHON</i> PARA ANÁLISE DO RECURSO SOLAR UTILIZANDO AS BASES DE DADOS MERRA-2 E ERA5 .....	142
7.6	CÓDIGO <i>PYTHON</i> PARA ANÁLISE DO RECURSO EÓLICO UTILIZANDO A BASE DE DADOS ERA5	147



# INTRODUÇÃO

# 1 INTRODUÇÃO

Os oceanos compõem 70% da superfície da Terra e abrigam milhões de espécies animais que desempenham um papel importante no ecossistema natural. Portanto, trata-se de um recurso natural de demasiada importância para o planeta, ao qual a humanidade não tem dedicado o devido cuidado. A cada ano é produzido mais lixo que não recebe o devido tratamento e, conseqüentemente, uma grande parcela encontra seu destino final nos oceanos. Atualmente existem grandes concentrações de resíduos no mar e o plástico é o material que apresenta a maior concentração. Este problema é frequentemente abordado em diversos meios de comunicação, ampliando assim a consciência coletiva da população e levando à criação de muitos projetos e iniciativas em busca de soluções para o presente desafio.

O aquecimento global trata-se também de um tema de extrema preocupação na atualidade, o que está a gerar investimentos a nível global na pesquisa e desenvolvimento de fontes energéticas sustentáveis, assim como questões relacionadas com o armazenamento de energia e eficiência energética. O setor dos transportes é um dos setores que contribui de forma negativa para o aquecimento global e as embarcações compõem uma parcela significativa deste setor. Ao contrário do setor automóvel, ainda existe um número muito reduzido de embarcações autossustentáveis ou até mesmo híbridas e eficientes energeticamente.

Este capítulo introdutório apresenta detalhadamente a conjuntura atual destes dois temas citados e de suma importância, e indica uma alternativa para tratar ambos os problemas simultaneamente.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

### 1.1.1 POLUIÇÃO DOS OCEANOS

De acordo com o Banco Mundial, anualmente são produzidos mais de 1,3 mil milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos globalmente e a previsão é de que este valor suba para 2,2 mil milhões de toneladas por ano em 2025 [1]. Estes dados indicam um significativo aumento na quantidade de resíduos urbanos produzidos. Porém, com os sistemas atuais de tratamento e armazenamento, não é possível reter todo este lixo e conseqüentemente, uma grande parcela encontra o seu destino final nos oceanos. A fluabilidade e durabilidades dos materiais plásticos torna este tipo de resíduo o mais abundante entre os demais resíduos presentes no ambiente marítimo e, portanto, é

possível encontra-lo distribuído por todos os oceanos. Devido a determinados processos de intemperismo, como a foto-degradação, o plástico é fragmentado e dispersado no oceano [2], convergindo em sua maioria nos chamados giros oceânicos, os quais são regiões onde ocorrem grandes sistemas de correntes marinhas rotativas [3]. Além destes locais de acumulação, existem diferentes locais litorais e densamente povoados que cercam baías, golfos, mares e rios, onde também ocorre a grande acumulação de resíduos plásticos, como é o caso do Mar Mediterrâneo.

Na figura 1 é possível observar os cinco principais giros oceânicos existentes, também denominados de giros subtropicais:



Figura 1: Principais giros oceânicos. Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Giro oceânico#Giros\\_subtropicais](https://pt.wikipedia.org/wiki/Giro oceânico#Giros_subtropicais)

A absorção de detritos plásticos está a impactar negativamente a fauna marinha, causando morte prematura de diversas espécies animais e ainda uma ingestão de microplástico por parte da população humana ao se consumir peixes que já haviam ingerido tais detritos.

Os resíduos plásticos comumente encontrados a flutuar nos oceanos incluem plásticos duros utilizados para embalagens e atividades de pesca (como garrafas, tampas e boias), cordas fibrosas usadas na indústria marítima, redes de pesca e pastilhas pré-produzidas [4].

De acordo com as Nações Unidas os danos ambientais causados pelo plástico aos ecossistemas marinhos representam um prejuízo de 13 mil milhões de dólares anuais, devido à necessidade de limpeza nas praias e às perdas financeiras causadas à indústria pesqueira. Apenas na costa dos Estados Unidos existem mais de 46 mil detritos plásticos em cada 2,5 km<sup>2</sup> o que, apenas nesta área, contribui para a morte de

100 mil mamíferos marinhos e dois milhões de aves anualmente. Esta região é considerada uma ilha de lixo denominada de *The Great Pacific Garbage Patch* (GPGP), a qual possui uma dimensão equivalente a 17 vezes a área de Portugal e é considerada a zona com maior acumulação de resíduos a flutuarem nos oceanos. No total, um volume de mais de 850 milhões de metros cúbicos de resíduos foi produzido nos últimos 85 anos e o plástico representa aproximadamente 90% do lixo que está a flutuar na superfície do oceano. Estima-se que são despejados nos oceanos oito milhões de toneladas de plástico anualmente [5], o que é equivalente a um caminhão de lixo plástico a cada minuto [6], valor que segundo estimativas deverá duplicar a partir de 2025. Portanto, se nada for feito a este respeito, estudos indicam que em 2050 haverá uma maior massa de plástico nos oceanos do que de peixe [7].

Estes detritos são subdivididos em quatro categorias, de acordo com o apresentado na figura 2.



Figura 2: Tamanhos dos detritos plásticos nos oceanos. Fonte: "Plastic Pollution in the World's Oceans" (2014; Eriksen, Lebreton, et al.)

Ao usar dados publicados a respeito dos giros subtropicais e de áreas marinhas adjacentes a regiões altamente povoadas, juntamente com as devidas correções em função da mistura vertical causada pelos ventos, Eriksen et al. [8] desenvolveram um modelo oceanográfico da distribuição dos detritos, com o intuito de estimar a distribuição global da poluição plástica nos oceanos. Este modelo assume que a quantidade de plástico a entrar nos oceanos depende de três variáveis principais: desembocaduras de bacias hidrográficas, densidade populacional e atividade marítima. A base de dados utilizada neste estudo contém expedições realizadas entre

2007 e 2013 em todos os cinco giros subtropicais, além de mares próximos a regiões costeiras densamente populosas.

O modelo desenvolvido indica como resultado que pelo menos 5,25 bilhões de partículas plásticas a pesar mais de 268 mil toneladas encontram-se a flutuar no mar. A sua distribuição, em função da dimensão dos detritos pode ser observada na tabela 1:

Tabela 1: Contagem estimada ( $n \times 10^{10}$  peças) e peso ( $g \times 10^2$  toneladas) de plástico no Pacífico Norte (NP), Atlântico Norte (NA), Pacífico Sul (SP), Atlântico Sul (SA), Índico (IO), Mar Mediterrâneo (MED) e oceano global (Total). Fonte: "Plastic Pollution in the World's Oceans" (2014; Eriksen, Lebreton, et al.)

	Size class	NP	NA	SP	SA	IO	MED	Total
Count	0.33–1.00 mm	68.8	32.4	17.6	10.6	45.5	8.5	183.0
	1.01–4.75 mm	116.0	53.2	26.9	16.7	74.9	14.6	302.0
	4.76–200 mm	13.2	7.3	4.4	2.4	9.2	1.6	38.1
	>200 mm	0.3	0.2	0.1	0.05	0.2	0.04	0.9
	Total	199.0	93.0	49.1	29.7	130.0	24.7	525.0
Weight	0.33–1.00 mm	21.0	10.4	6.5	3.7	14.6	14.1	70.4
	1.01–4.75 mm	100.0	42.1	16.9	11.7	60.1	53.8	285.0
	4.76–200 mm	109.0	45.2	17.8	12.4	64.6	57.6	306.0
	>200 mm	734.0	467.0	169.0	100.0	452.0	106.0	2028.0
	Total	964.0	564.7	210.2	127.8	591.3	231.5	2689.4

É possível observar que a maioria dos detritos encontrados pode ser classificada como microplásticos (< 5 mm), representando uma contagem de aproximadamente 92%, o que significa que a maioria do plástico presente nos oceanos possui uma alta complexidade no que se refere a um possível sistema de reciclagem. Em relação ao peso, meso e macroplásticos representam aproximadamente 87% da massa de plástico encontrada nestas regiões. No entanto com o tempo ocorrerá meteorização destas partículas, devido ao meio ambiente marinho e a exposição à luz solar, transformando-as em microplásticos.

As observações consideradas para este estudo foram conservadoras, ao reconhecer que itens com pouca flutuabilidade, escuros e pequenos são difíceis de se observar. Com este estudo também foi possível estimar de forma visual a distribuição dos detritos plásticos como evidenciado na figura 3.

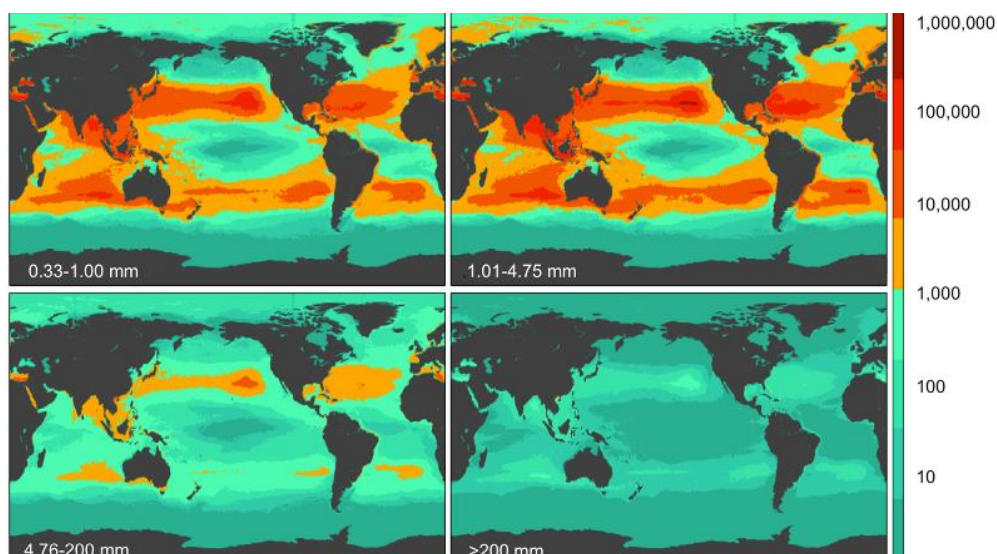


Figura 3: Contagem da densidade global (peças/km<sup>2</sup>) para cada tamanho de detrito. Fonte: "Plastic Pollution in the World's Oceans" (2014; Eriksen, Lebreton, et al.)

### 1.1.2 A INDÚSTRIA DE NAVEGAÇÃO E O CLIMA

O sistema económico global possui uma alta dependência na indústria marítima, pois 90% do comércio global é realizado através dos oceanos, utilizando aproximadamente 90 mil embarcações [10], as quais, assim como os demais meios de transporte, são responsáveis por emitir dióxido de carbono para a atmosfera, o que contribui para a mudança climática. Um detalhe que amplifica este problema trata-se do facto de os navios geralmente queimarem um combustível chamado óleo pesado, que é considerado o combustível mais sujo do mercado, devido a não ser refinado. Além desta influência nas alterações climáticas, há indícios de que estas emissões contribuem para aproximadamente 60 mil mortes por cancro de pulmão a cada ano [9].

Os navios representam mais de 3% das emissões globais de dióxido de carbono. A *International Maritime Organization (IMO)* calculou que as embarcações que navegam nos oceanos emitiram 1,12 mil milhões de toneladas de dióxido de carbono em 2007 [11], além de emitirem outros gases de efeito estufa, como óxidos de nitrogênio. Devido a este facto, muitas companhias de navegação tentam adotar medidas e assim reduzir as emissões de gases poluentes, algumas medidas incluem a redução da velocidade de cruzeiro, alteração para combustíveis mais limpos ou a implantação técnica e operacional de outros meios que visem melhorar a eficiência do combustível.

Ao longo das três últimas décadas, a indústria de navegação cresceu em média 5% ao ano, e a IMO prevê que se não forem introduzidas mais medidas para reduzir as emissões neste setor, elas subirão para 1,48 mil milhões de toneladas de dióxido de carbono em 2020, o equivalente a colocar 65 milhões de novos carros na rua [12].

Sendo as emissões de gases poluentes diretamente proporcionais ao consumo de combustível, a IMO calculou que é possível alcançar uma redução nas emissões de 23% se houver uma redução de 10% na velocidade dos navios da frota global.

Existem muitos métodos capazes de tornar a indústria da navegação mais eficiente e menos poluente, sendo a variável mais simples de se alterar a própria velocidade de cruzeiro. No entanto atualmente existem diferentes projetos, geralmente de navios de menor dimensão, capazes de utilizar fontes renováveis de energia, em especial o sol e o vento para os auxiliarem na redução do consumo de combustível ou até mesmo para possibilitarem a utilização de sistemas propulsivos que não necessitem de qualquer tipo de combustível, exceto a energia elétrica produzida através da conversão da energia solar ou eólica.

## 1.2 A EMPRESA ISLAND POWER SOLUTIONS LTD

A *Island Power Solutions Ltd* (IPS) é uma empresa cujo foco principal é a criação de soluções para energias sustentáveis, em especial através de projetos solares e de conversão de resíduos (*Waste-to-Energy*). A empresa trabalha com pequenas e descentralizadas unidades de produção de energia próximas aos locais de consumo, a incluir projetos em ilhas e comunidades *off-grid*, possibilitando que estes locais não necessitem mais de tecnologias poluentes e ao mesmo tempo que sejam criados benefícios financeiros e empregos locais.

A IPS possui soluções em diferentes setores dentro do campo das energias sustentáveis, em seu portfólio encontram-se projetos solares, sistemas de armazenamento de energia e centrais de tratamento e conversão de resíduos em energia e em combustíveis biológicos. Mais recentemente a empresa começou a atuar em projetos navais, referentes a recolha de resíduos nos oceanos.

A empresa está presente em diversos países, como Reino Unido, Suécia, Espanha, Portugal, Itália, França e China, além de possuir parcerias com grandes empresas atuantes no setor das energias renováveis.



Figura 4: *Island Power Solutions* logo. Fonte: <https://islandpower.energy/>

### 1.3 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DO PROJETO A DESENVOLVER

O âmbito deste trabalho consiste no desenvolvimento de um projeto interno da empresa *Island Power Solutions Ltd.*, com o acréscimo de análises relativas aos recursos solar e eólico na região do Mar Mediterrâneo. O projeto em questão é denominado de *Icollect*, o qual envolve duas empresas, cada uma responsável por um setor dentro do projeto: a *Island Power Solutions (IPS)*, empresa ligada a soluções de engenharia para sistemas de energia sustentável e a *Universal Group (UG)*, uma empresa com experiência em desenvolvimento tecnológico, através de soluções de infraestrutura em *blockchain*.



Figura 5: Logo do projeto *ICollect*. Fonte: <https://icollect.earth>

Com o excesso de plástico existente nos oceanos e a quantidade crescente de resíduos sendo produzidos e despejados neste meio ambiente marinho, as consequências

negativas geradas pela poluição tendem a aumentar e é, portanto, necessário que existam incentivos para uma melhor gestão do lixo, desde o despejo destes materiais no mar, até ao investimento em novas formas de recolha destes resíduos, possibilitando uma limpeza dos oceanos. O projeto em questão é dividido em duas grandes áreas: a primeira trata-se da utilização da tecnologia *blockchain* para evitar o despejo de lixo em locais ilegais ou no oceano, o que pode ser alcançado com o tratamento local do lixo e inovações tecnológicas para possibilitar um rastreamento nas indústrias; a segunda área refere-se a recolha dos resíduos no oceano, através de um navio que possua a bordo um sistema de coleta e uma estação de pré-tratamento e conversão do lixo em energia e combustíveis biológicos.

O foco desta tese incide sobre a segunda área do projeto, portanto este capítulo irá focar-se apenas neste setor do projeto.

O projeto *ICollect* foi idealizado a partir de trabalhos já realizados pela empresa IPS no desenvolvimento de centrais de tratamento e conversão de lixo em pequena escala para ilhas e tinha como conceito inicial o projeto de navios de pequena dimensão que realizariam apenas a recolha e o transporte de resíduos para serem tratados em pequenas ilhas. Este conceito evoluiu e atualmente tem-se como objetivo desenvolver uma frota de navios autossustentáveis capazes de recolher o lixo que está a flutuar no mar e tratá-los a bordo, através da utilização de um sistema de pequena escala desenvolvido internamente para o tratamento e conversão do lixo em energia, juntamente com sistemas de produção de energia através de fontes sustentáveis e meios de armazenamento energéticos também desenvolvidos por empresas parceiras no projeto.

O *ICollect* é um projeto atrativo devido à vantagem logística que apresenta, ao reduzir a necessidade de navegação frequente aos portos para entrega dos resíduos coletados, possibilitando desta forma que a energia outrora necessária para o propelar neste trecho de navegação, seja redirecionada para a sua operação de coleta e conversão.

Os navios começarão a operação de coleta nas principais regiões de acumulação de lixo, a incluir os giros subtropicais previamente apresentados e o Mar Mediterrâneo, onde realizarão o processo de tratamento e conversão em alto mar e armazenarão a energia e o combustível resultante internamente para repetir o processo de recolha. Desta forma só será necessário ir a um porto quando os tanques de armazenamento de resíduos recicláveis ou perigosos estiverem completos, sendo assim possível alcançar o objetivo principal do projeto: realizar uma limpeza nos oceanos através da recolha de resíduos sem que seja necessário o consumo de combustíveis convencionais em embarcações e conseqüentemente reduzindo a sua pegada ecológica.

Os navios, além de realizarem a coleta e tratamento, também serão uma plataforma para criar uma maior consciência ecológica, assim como expor o projeto *ICollect* e os parceiros envolvidos neste trabalho ao rececionar eventos para ampliar a visibilidade a investidores. Outro objetivo do navio é utilizá-lo como um laboratório flutuante para possibilitar futuros desenvolvimentos e otimizações do sistema. O navio também permitirá que navios maiores depositem seus resíduos em seus tanques, funcionando como um centro de coleta em alto mar.

O processo trabalha em quatro passos:

- **Recolha:** Recolher os resíduos sólidos no oceano e evitar que espécies marinhas sejam afetadas no processo;
- **Pré-tratamento dos resíduos:** Os poluentes estarão molhados e misturados, então o primeiro passo é realizar a separação, secagem e compactação dos resíduos;
- **Destruição dos resíduos:** Será usada uma tecnologia limpa e inovadora de tratamento de lixo para destruir os resíduos compactados de uma forma segura, eficiente e sustentável;
- **Geração de energia:** A destruição dos resíduos irá gerar combustível biológico, que juntamente com outros sistemas de produção de energia, como painéis fotovoltaicos, permitirá abastecer os motores e geradores do navio para manter o navio operacional.

A base de implantação da frota é através da conversão de barcos antigos que realizavam outros tipos de serviços, em barcos capazes de realizar a operação proposta. Para este processo de conversão é estimado em um período de três a seis meses.

O plano a seguir é composto de três fases:

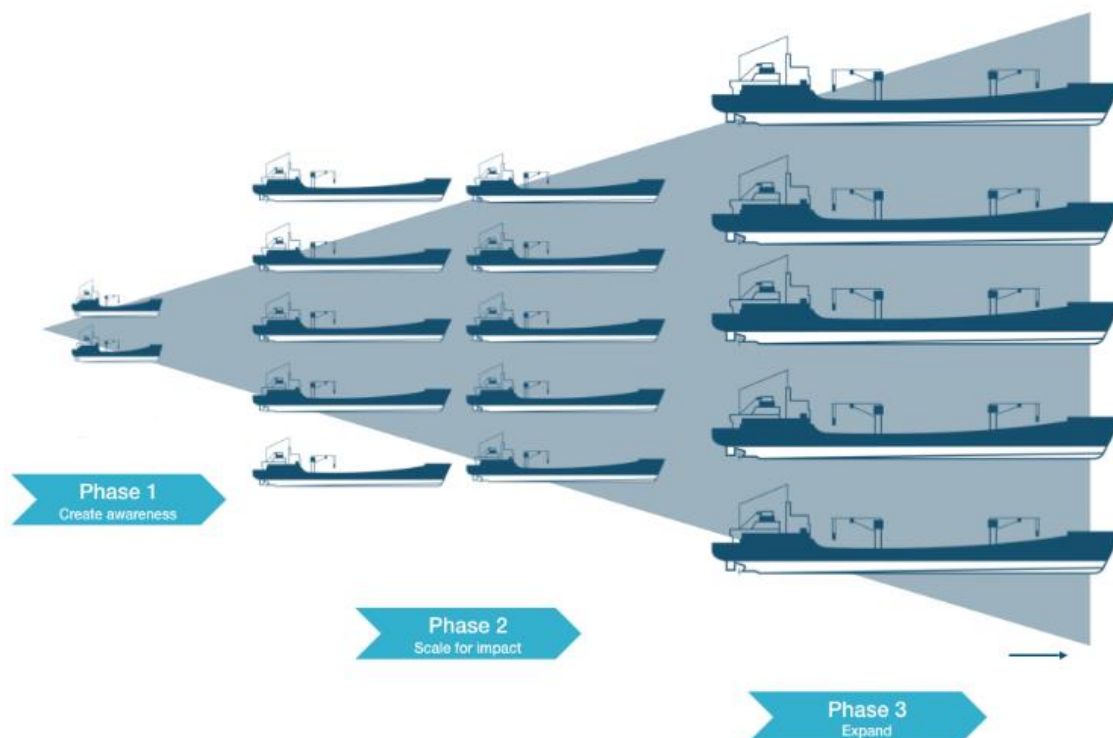


Figura 6: Fases do projeto *ICollect*. Fonte: <https://icollect.earth/>

- Fase 1: projeto e conversão de dois navios, completamente operacionais que servirão também como uma plataforma de pesquisa, otimização e comunicação para a obtenção de suporte no objetivo de reverter a situação de plástico nos oceanos. Estes navios irão operar apenas no hemisfério norte a começar pela costa europeia;
- Fase 2: nesta fase a frota de navios será ampliada de dois para dez navios e estas embarcações apresentarão uma maior dimensão, para ampliar a capacidade de armazenamento. Estes navios irão operar nos cinco principais giros oceânicos;
- Fase 3: a etapa final consiste na implementação de cinco navios tanques que servirão como estações de tratamento e centrais energéticas localizadas nos cinco giros subtropicais, nos quais as demais embarcações poderiam despejar os resíduos previamente coletados, além dos produzidos internamente.



Figura 7: Localização dos 5 navios tanque. Fonte: <https://icollect.earth>

Portanto, este trabalho tem como objetivo apresentar as principais questões envolvidas no projeto de uma embarcação de recolha de resíduos para operar na fase 1 do projeto *Icollect*, considerando como local de estudo o Mar Mediterrâneo e terá como foco principal a análise realizada para avaliação dos recursos eólico e solar neste mesmo local, para uma possível aplicação de tecnologias de aproveitamento dos mesmo a bordo da embarcação.

#### 1.4 ESTRUTURA DA TESE

O presente estudo realizado no âmbito do estágio desenvolve-se ao longo de cinco capítulos.

Neste primeiro capítulo foi exposta uma breve introdução sobre a atual conjuntura global referente à poluição dos oceanos, assim como os prejuízos ambientais gerados pelo atual funcionamento da indústria de navegação. Também foi feita uma apresentação da empresa responsável pelo estágio e o projeto em que a tese está inserida.

O segundo capítulo apresentará os principais conceitos fundamentais para o desenvolvimento da tese acrescido da metodologia por trás de um projeto naval, portanto este será responsável por expor resumidamente conhecimentos atuais na área da energia solar e eólica, além de ferramentas de análise meteorológicas e por fim será feita uma apresentação de um projeto naval.

O terceiro capítulo denomina-se revisão literária e projetos inovadores, onde serão apresentados sistemas reais de coleta de resíduos e de utilização de fontes alternativas de energia na indústria marítima, além de estudos previamente desenvolvidos na área de reanálise meteorológica, ferramenta de extrema importância no presente trabalho.

O capítulo quatro será o que apresentará mais informações, visto que este tem por objetivo demonstrar todo o desenvolvimento do projeto, incluindo as tecnologias utilizadas a bordo, o dimensionamento do navio e os resultados obtidos.

O capítulo cinco será a conclusão dos assuntos tratados na tese, assim como sugestões de trabalhos futuros neste mesmo âmbito.

Este trabalho não terá como foco a metodologia e os cálculos navais, os quais serão apresentados de forma mais resumida, visto que o tema principal deve se manter na área da energia. Serão apresentados com maior detalhe os cálculos realizados para as análises meteorológicas no local de estudo, em especial referente aos recursos solares e eólicos, pois a tecnologia de conversão do lixo foi fornecida internamente pela empresa parceira do projeto, podendo, portanto, ser apresentada, mas não detalhada.

**CONCEITOS FUNDAMENTAIS E  
METODOLOGIA**

## 2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS E METODOLOGIA

### 2.1 ENERGIA SOLAR

#### 2.1.1 RECURSO SOLAR

O Sol é a estrela que rege o nosso sistema solar e é constituído principalmente por hélio e hidrogênio. No seu centro as condições de pressão e temperatura são extremamente elevadas, o que provoca processos de fusão nuclear no seu interior.

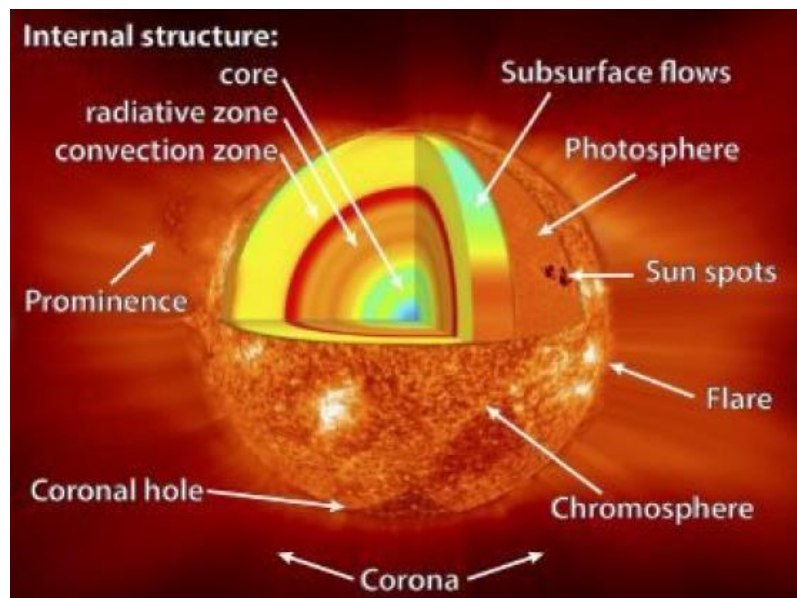


Figura 8: Estrutura do Sol. Fonte: Livro *Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems*.

A potência total do Sol é de  $3,8 \times 10^{26} \text{W}$  e a Terra recebe em sua atmosfera  $174 \times 10^{15} \text{W}$  de radiação solar, da qual aproximadamente 30% é refletida pela atmosfera [15]. Em média, ao redor de toda a superfície do planeta, energia equivalente a aproximadamente  $4,2 \text{ kWh/m}^2$  de energia é absorvida todos os dias, ou seja, há uma abundância de energia solar disponível no planeta durante o período diurno.

Irradiação solar é a potência por unidade de área recebida do Sol na forma de radiação eletromagnética. Existem diferentes medidas de irradiação solar, das quais as principais são:

- Irradiação Normal Direta (DNI), que é medida na superfície da Terra, trata-se da irradiação extraterrestre acima da atmosfera menos as perdas atmosféricas devido à absorção e dispersão;
- Irradiação Horizontal Difusa (DHI) é a radiação na superfície da Terra da luz dispersada pela atmosfera;
- Irradiação Global Horizontal (GHI) é a irradiação total do Sol em uma superfície horizontal na Terra, portanto é a soma da irradiação direta e irradiação difusa, considerando o ângulo solar Zénite ( $z$ ).

$$GHI = DHI + DNI * \cos(z) \quad (2.1)$$

Este último tipo de irradiação será o único objeto de cálculo solar deste trabalho.

### 2.1.2 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Um painel fotovoltaico é um sistema capaz de aproveitar a energia solar a partir da luz, para produzir energia elétrica. Existem diversos tipos de painéis fotovoltaicos, no entanto o mais comum são painéis compostos por células de silício, um elemento químico da família do carbono, com estrutura cristalina. Infelizmente, cada célula tem uma capacidade muito baixa de produção de energia, algo em torno de 0,5 volts em corrente contínua. Para contornar este problema, os painéis fotovoltaicos são compostos por conjuntos de 60 ou 72 células, juntamente com pistas de alumínio condutoras para formar um módulo.

Quando a luz do Sol incide sobre as células fotovoltaicas, pequenas “partículas” denominadas de fótons, que possuem uma determinada quantidade de energia, criam tensão elétrica, transferindo assim energia para os elétrons presentes nos átomos de silício, o que força a sua deslocação. As propriedades do silício, um material semicondutor, permitem assegurar a circulação de energia. Este efeito é obtido devido à existência de dois tipos distintos deste mesmo material na mesma célula, sendo que um dos tipos possui elétrons a mais e o outro possui lugares vagos para serem preenchidos por estes mesmos elétrons. Como o silício também possui propriedades isolantes ele é capaz de manter esse desequilíbrio constante, criando desta forma uma corrente elétrica.



Figura 9: Conjunto de painéis fotovoltaicos. Fonte: <https://www.edp.pt/particulares/comunidade/acontecer/como-funciona-um-painel-fotovoltaico/>

Para que estes painéis produzam energia é necessário que haja irradiação solar, portanto este sistema só é capaz de produzir energia durante o dia e possui uma significativa redução de produção durante meses com menor incidência solar, situação comum em meses de inverno. Em alguns casos, utilizam-se sistemas de bateria, para armazenamento da parcela de energia produzida em excesso nos horários de maior produção.

## 2.2 ENERGIA EÓLICA

### 2.2.1 RECURSO EÓLICO

O Sol aquece o planeta Terra de forma desigual, sendo as regiões equatoriais e tropicais mais favorecidas ao receber mais energia do que as regiões polares. Além disso, a Terra está em rotação e tem seu eixo inclinado em  $23,5^\circ$ . Estes fatores influenciam diretamente no comportamento planetário do vento, o que pode ser representado pelo Modelo de Três Células:

- Células de Hadley: O ar aquecido sobre o Equador sobe e dirige-se para os pólos e para leste; ao chegar a latitudes subtropicais, o ar arrefece, desce à superfície e retorna ao Equador e para oeste;
- Células de Ferrell: O ar move-se para os pólos e para leste junto à superfície, subindo nos pólos para assim retornar no sentido do Equador e para oeste;
- Células Polares: O ar sobe e desloca-se em altitude para os pólos, posteriormente descendo para dar origem a altas pressões polares, onde diverge e retorna na direção do Equador, fechando desta forma a célula convectiva.

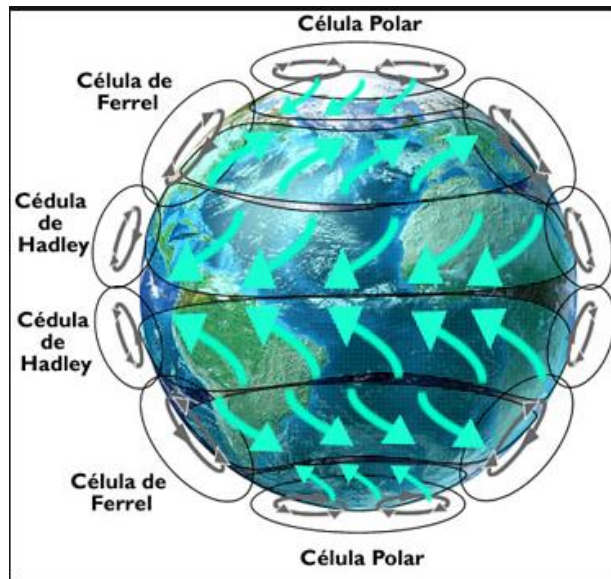


Figura 10: Modelo de Três Células. Fonte: <https://alunosonline.uol.com.br/geografia/circulacao-atmosferica.html>

Outro fenômeno que rege o comportamento dos ventos são as brisas marítimas e terrestres. Durante o dia, a terra aquece mais rapidamente do que a água, assim o ar sobre a terra aquece, se tornando mais leve que o ar frio e, conseqüentemente, este sobe, para posteriormente dar origem à entrada de ar marítimo às baixas alturas, resultando em uma brisa marítima, a qual é muito instável, devido a turbulência gerada pela subida do ar sobre a terra. Durante a noite o processo inverte-se, devido ao arrefecimento acelerado da terra em relação à água, o que resulta nas brisas terrestres, que são mais estáveis sobre a terra, devido à supressão da turbulência por parte do vento durante o seu movimento de descida.

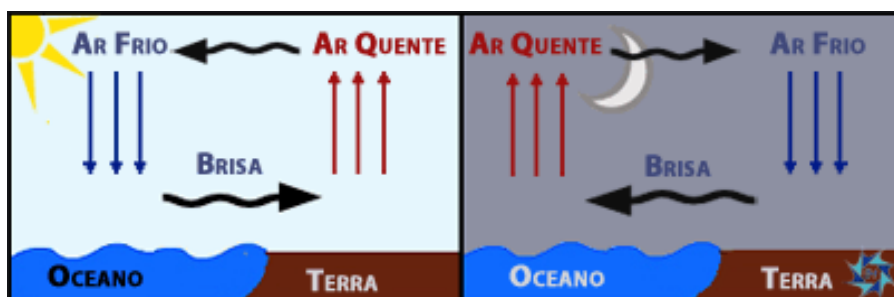


Figura 11: Brisas marítimas e terrestres. Fonte: <https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/otempo/previsao.numerica/index.html?page=aladin.brisa.mar.xml>

A orografia e os obstáculos existentes no percurso do vento também influenciam diretamente seu comportamento e sua velocidade. A alta fricção entre o ar e a superfície terrestre reduz a velocidade do vento e causa turbulência no escoamento. Por este motivo a baixas altitudes (10 m) a velocidade do vento em zonas terrestres é

muito inferior, se comparada com zonas marítimas, como pode ser observado na figura 12.

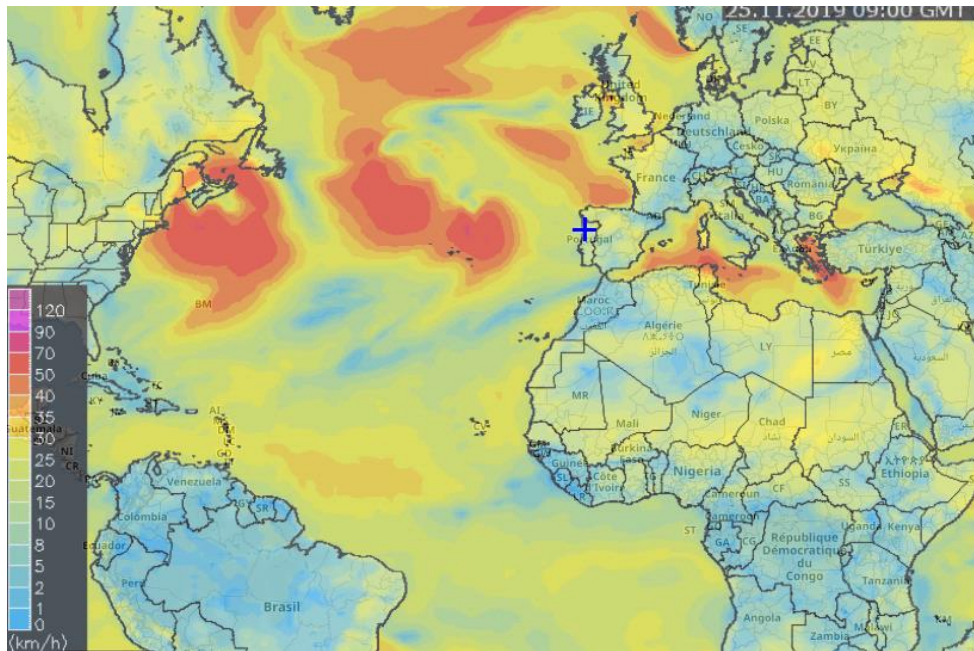


Figura 12: Mapa de ventos. Fonte: [https://www.meteoblue.com/pt/weather-maps/porto\\_portugal\\_2735943?variable=wind&level=surface&lines=none&mapcenter=27.9944N-15.1172&zoom=3](https://www.meteoblue.com/pt/weather-maps/porto_portugal_2735943?variable=wind&level=surface&lines=none&mapcenter=27.9944N-15.1172&zoom=3)

A velocidade do vento a ser estimada e utilizada em cálculos de análise do recurso eólico trata-se da componente horizontal do vento, como expressa pela equação 2.2:

$$u_f = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2.2)$$

### 2.2.2 TURBINAS EÓLICAS

As turbinas eólicas ou aerogeradores podem ser divididas em dois grandes grupos:

- Turbinas Eólicas de Eixo Vertical (VAWT): São turbinas que apresentam o eixo de rotação perpendicular à terra e aproveitam, normalmente a força de arrasto do vento. Este tipo de turbina tem como vantagem sua resistência a ventos mais fortes e não precisam ser orientadas de frente para o vento, não exigindo, portanto o chamado sistema de *yaw*, componente este responsável por manter a orientação da turbina de acordo com a direção do vento;



Figura 13: Turbina eólica de eixo vertical. Fonte: <https://www.archiexpo.com/pt/prod/aeolos/product-130919-1525437.html>

- Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (HAWT): é o tipo de turbina mais comum no mercado global, pois possui uma melhor eficiência em relação às turbinas de eixo vertical. Geralmente possuem três pás, capazes de extrair energia do vento a partir da força de sustentação. São compostas basicamente de suas pás, torre, nacelle, rotor, motor de yaw, gerador elétrico e diversos sensores. As pás são os componentes que apresentam maior custo em relação ao aerogerador por inteiro, custo esse de aproximadamente um quarto do valor total.



Figura 14: Turbina eólica de eixo horizontal. Fonte: <https://engenhariae.com.br/curiosidades/por-que-as-turbinas-eolicas-sao-pintadas-de-branco>

## 2.3 REANÁLISE METEOROLÓGICA

As reanálises meteorológicas providenciam descrições numéricas do clima, geradas ao se combinar informações de modelos de previsão e observações meteorológicas através de um processo de assimilação de dados.

Em previsões numéricas para o estado do tempo, são usados modelos para prever estados futuros da atmosfera, baseados em como o sistema atmosférico se desenvolve a partir de um estado inicial. O estado inicial usado como *input* para a previsão deve consistir de dados referentes a campos que determinam a evolução futura do modelo. Campos de variação espacial (latitude e longitude) são obrigatórios no formato usado pelo modelo. Por outro lado, os dados observacionais disponíveis geralmente não incluem todos os campos prognósticos do modelo e ainda podem incluir campos adicionais. Tais dados possuem distribuição espacial diferente da malha numérica do modelo de previsão e estão sujeitos a erro. A técnica de assimilação de dados é, portanto, usada para produzir uma análise do estado inicial, a qual é o melhor ajuste do modelo numérico aos dados disponíveis, levando em consideração os erros do modelo e nos dados.

Um projeto de reanálise envolve o reprocessamento de dados observacionais abrangendo um período histórico estendido e um sistema de análise moderno e consistente, para produzir um conjunto de dados que possam ser usados em estudos meteorológicos e climatológicos.

Existem diferentes sistemas de base de dados de reanálise, como o *Japanese 25-year Reanalysis (JRA-25)*, o *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications (MERRA)*, o *NCEP/NCAR Reanalysis*, o *ERA5 European Reanalysis 5* [16] e o *CFSR Climate Forecast System Reanalysis* [17].

### 2.3.1 MERRA-2

*Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2)*, é um sistema de reanálise atmosférica que possui dados a partir do ano de 1980 e foi desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*. Este sistema substitui o MERRA original, usando uma versão melhorada do sistema de assimilação de dados *Goddard Earth Observing System Model, version 5 (GEOS-5)*. MERRA-2 inclui atualizações ao modelo [19] e ao esquema de análise *Global Statistical Interpolation (GSI)*. A maior motivação para a substituição do sistema original para esta segunda versão foi o facto de que o sistema de assimilação de dados MERRA estar congelado desde 2008 e não ser capaz de utilizar diversos tipos importantes de novos dados. Como os satélites antigos estão a falhar, o número de observações disponíveis para

assimilação no MERRA está a decair rapidamente. MERRA-2 usa o GEOS-5, que é capaz de usar novos instrumentos de micro-ondas e radiação infravermelha hiperespectral, além de outros tipos de dados.

Toda a coleção de dados do MERRA-2 é fornecida na mesma malha horizontal. Essa malha possui 576 pontos na direção longitudinal e 361 pontos na direção latitudinal, correspondendo a uma resolução de  $0,625^\circ \times 0,5^\circ$ . A coleção de dados distribuída é interpolada espacialmente para a malha latitude-longitude. As variáveis são fornecidas em malhas verticais (modelo de 72 camadas ou 73 arestas) ou interpoladas para 42 níveis padrões de pressão [20].

Os arquivos de dado MERRA-2 são fornecidos em formato netCDF-4 e geralmente possuem quatro dimensões: longitude, latitude, nível de pressão e tempo, ou apenas 2 dimensões, incluindo longitude, latitude e tempo.

### 2.3.2 ERA5

O ERA5 é um sistema de reanálise atmosférica global, composta por dados de diversos satélites e responsável por substituir o sistema *ERA-Interim*. Foi desenvolvido pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF)* e é parte do *Copernicus Climate Change Service (C3S)*. Esse novo sistema possui uma base de dados a partir do ano de 1979 até o presente, e pretende estender o período de início para 1950, no ano de 2020.

O ERA5 possui em sua base dados horários de muitos parâmetros atmosféricos, da superfície terrestre e de estado de mar em conjunto. Este sistema está disponível numa malha regular de latitude-longitude, com resoluções de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  e 37 níveis de pressão.

Os arquivos de dados ERA5, em formato netCDF, são representados por quatro dimensões, assim como o MERRA-2 e permite que se faça um *download* através de *APIs (Application Programming Interface)*, além de possuir uma grande variedade de parâmetros.

## 2.4 PROJETO DE UM NAVIO

O projeto de um navio envolve diferentes áreas tecnológicas, apresentando assim uma alta complexidade. Este pode ser dividido em duas grandes etapas, o projeto preliminar e o projeto detalhado. A primeira etapa é composta por cálculos baseados em estimativas e em definições científicas desenvolvidas no passado, para se obter uma primeira versão do navio, que servirá como ponto de partida para um projeto mais detalhado, o qual inclui cálculos de resistência estrutural da embarcação (através do uso de *softwares* de elementos finitos), cálculos hidrodinâmicos (para os quais pode

se fazer uso da dinâmica dos fluidos computacional) e cálculos e definições detalhadas que compõem a arquitetura naval (baseados em modelos 3D da embarcação).

O processo de projeto de um navio é o conjunto de atividades que envolvem a criação de desenhos, especificações, determinação dos parâmetros principais, capacidade de carga e dados secundários e necessários para a construção [21]. A etapa inicial deste processo envolve a definição da missão da embarcação, seguida da determinação do local de operação.

Tradicionalmente o projeto de navios possui um formato sequencial, porém iterativo, como sugerido por Evans [22]. Este processo é dividido em etapas lógicas, pois desta forma é possível atingir uma rápida convergência para a solução final, representada pelo centro da espiral de projeto [22], como observado na figura 15:



Figura 15: Espiral de Evans Fonte:

[http://www1.oceanica.ufrr.br/deno/prod\\_academic/relatorios/2013/williamfreitas/relat1/Relatorio1.htm](http://www1.oceanica.ufrr.br/deno/prod_academic/relatorios/2013/williamfreitas/relat1/Relatorio1.htm)

Outro fator importante argumentado por Gale [21] é que a natureza de um projeto naval, a quantidade de integrantes na equipe de projeto, o nível de detalhes do projeto e outras características mudam com o tempo, tornando este um trabalho de alta complexidade ao lidar também com diversas áreas da engenharia, sendo a resistência estrutural, hidrodinâmica e arquitetura naval os campos principais que compõem o projeto. Portanto, é comumente realizada uma subdivisão em etapas para se facilitar o desenvolvimento do projeto. Kiss [23] utilizou como base a espiral de Evans para propor uma divisão em quatro etapas, que se iniciam na análise de requisitos e são concluídas no projeto detalhado. Estas etapas são:

- Projeto conceitual: É a etapa inicial do projeto do navio, ou seja, a primeira volta na espiral de projeto, responsável por traduzir os requisitos referentes às

características de engenharia naval. Essencialmente, determina-se nesta etapa a viabilidade do projeto e algumas características do navio como suas dimensões principais e coeficientes de forma e potência ou conjuntos de alternativas que cumprem os requisitos do projeto, como a velocidade, autonomia e capacidade de carga;

- Projeto preliminar: Há um refinamento dos parâmetros principais da embarcação, possibilitando que no final desta etapa haja uma definição precisa de um navio que satisfaça os requisitos iniciais;
- Projeto contratual: Nesse estágio produz-se um conjunto de planos e especificações que fazem parte do documento contratual. Esta etapa engloba mais algumas voltas na espiral de projeto, refinando ainda mais o projeto preliminar. Nesta etapa podem ser determinadas características como a potência, baseada em ensaios realizados em tanques de prova; o aço a ser usado que é escolhido a partir de diferentes tipos estudados; a definição do modelo 3D da embarcação, a incluir uma compartimentação detalhada; a definição estrutural completa, baseada em determinações impostas por regulamentos fornecidos por classificadoras, como *American Bureau of Shipping (ABS)* ou *Det Norske Veritas (DNV)* e posteriormente avaliados com o uso de *softwares* de elementos finitos; a realização de simulações computacionais com o auxílio de ferramentas de dinâmica dos fluidos computacional; e a verificação de critérios de estabilidade e avaria baseados, com auxílio de regulamentos internacionais, responsáveis por determinar valores limites;
- Projeto detalhado: Esta é a fase final do projeto, na qual se encontra o desenvolvimento dos planos de construção do navio e instalação de equipamentos.

A etapa do projeto conceitual representa a primeira volta na espiral do projeto, as outras etapas são representadas por uma ou mais voltas na espiral. Muitas vezes é possível redimensionar estas subdivisões de quatro para duas etapas, denominadas de projeto preliminar, a referir-se às duas primeiras etapas apresentadas, e neste novo formato a segunda etapa trata-se da combinação entre projeto contratual e detalhado, passando a referir-se apenas como projeto detalhado. Evans [22] diz que o processo deve ocorrer em passos sequenciais, onde cada passo irá lidar com uma tarefa em particular. Ao final destes passos, os resultados são analisados e caso não sejam balanceados e/ou viáveis, inicia-se uma nova iteração.

No entanto, de acordo com Gale [21], na prática esse não é um processo sequencial, a menos que o projeto seja desenvolvido inteiramente por uma única pessoa. Mesmo

neste caso os passos não serão feitos numa ordem pré-estabelecida. Ao invés disso o engenheiro naval irá pular de um ponto para outro da espiral conforme os problemas que encontre.

O método tradicional de projeto é uma abordagem de análise, cujo objetivo é satisfazer os requisitos de projeto, supondo que em um determinado projeto existam 10 requisitos e cada requisito pode assumir 10 valores, existiriam  $10^{10}$  diferentes combinações de navios conceito possíveis. Se cada navio conceito então representasse uma volta na espiral de projeto e o engenheiro demorasse apenas um segundo para realizar tal volta. O tempo total para completar o projeto seria de  $10^{10}$  segundos, ou seja, mais de 317 anos como apresentou Tancredi em sua tese [26].

Portanto, segundo Tancredi [26], essa abordagem só é viável quando se analisa um número restrito de casos. Para tornar o método do projeto mais eficiente e interessante é possível utilizar uma abordagem a partir de métodos de otimização, para reduzir significativamente o tempo para se encontrar a solução ótima do problema. Assim é sugerido pelo autor que a resolução do problema conceitual deve ser por meio da solução de um modelo matemático que descreve os atributos desempenho da embarcação, com funções das variáveis que descrevem a eventual solução do problema.

Em muitos projetos de engenharia, a melhoria de um atributo de desempenho provocará detrimento de outro. Além disso, quanto maior o número de parâmetros considerados no projeto, mais difícil é aborda-los de forma eficiente a fim de obter uma solução ótima.

Um projeto navio apresenta um clássico problema de otimização, visto que em muitos casos é necessária uma maior capacidade de carga em conjunto com uma maior velocidade de serviço, porém o mínimo possível de consumo de combustível, o que conseqüentemente requer baixa resistência ao avanço.

**REVISÃO LITERÁRIA E PROJETOS**  
**INSPIRADORES**

## 3 REVISÃO LITERÁRIA E PROJETOS INSPIRADORES

### 3.1 TECNOLOGIAS INOVADORAS

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foi necessário realizar um estudo de diversas empresas e tecnologias inovadoras existentes ou em fase de projeto para o mercado global. Estas tecnologias serviram como base e inspiração para o projeto em questão. No entanto, não estão necessariamente presentes no modelo proposto da embarcação objetivo desta tese.

O interessante deste estudo foi observar a existência ou, ao pelo menos projetos de futuros desenvolvimentos, referentes a meios para auxiliar o planeta a mitigar diversos problemas ambientais que podem ser considerados comuns nos dias atuais e que representam o foco desta tese, como a poluição dos oceanos e a emissão de gases poluentes.

#### 3.1.1 THE OCEAN CLEANUP

*The Ocean Cleanup* é uma empresa holandesa, cujo objetivo é limpar 90% da poluição plástica nos oceanos. Para este fim desenvolveram um sistema de limpeza passiva dos oceanos denominado de *System 001/B*.

A empresa reconhece que para enfrentar o problema do plástico nos oceanos é preciso trabalhar em duas etapas paralelas, a primeira é remover os resíduos acumulados nos oceanos e a segunda trata-se de impedir que mais resíduos plásticos encontrem seu destino final nos oceanos a partir de diversos rios ao redor do planeta.

Limpar os oceanos com métodos convencionais exigiria um tempo muito longo e um custo muito elevado para se tornar um processo concluído. Portanto, o sistema passivo desenvolvido pela empresa tem como objetivo remover 50% dos resíduos acumulados na superfície do principal giro oceânico do Pacífico em apenas cinco anos.

O funcionamento desta tecnologia baseia-se na concentração dos resíduos para uma posterior coleta, devido ao facto de o maior desafio na coleta destes resíduos nos oceanos se dever à grande dispersão dos mesmos através de milhões de quilômetros quadrados e o seu movimento em várias direções.

O sistema consiste num longo flutuador cilíndrico que fica na superfície da água e possui uma saia na sua região inferior. O objetivo do flutuador é principalmente proporcionar fluabilidade ao sistema, enquanto a saia é responsável por evitar que

os detritos plásticos escapem ao mesmo tempo em que possibilita a fuga da vida marinha devido ao fluxo descendente produzido pela mesma saia.

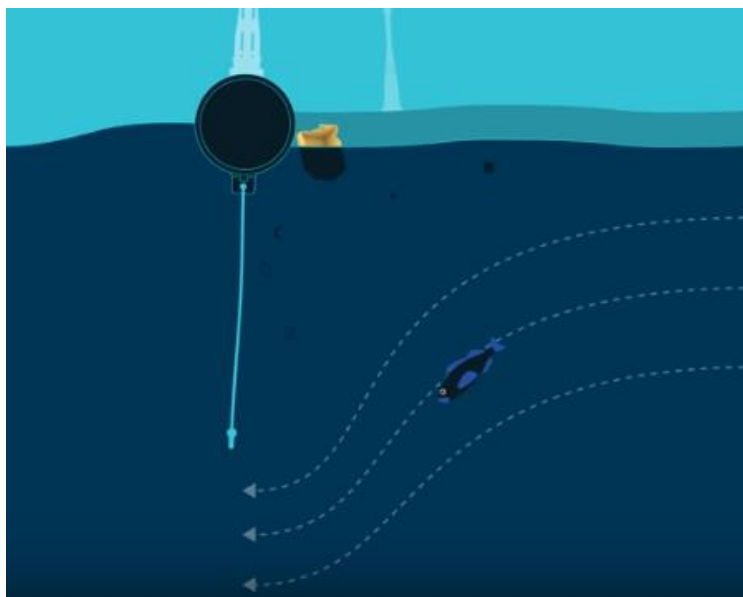


Figura 16: Demonstração da situação de fuga de vida marinha. Fonte: Youtube video - The Ocean Cleanup Technology, Explained.

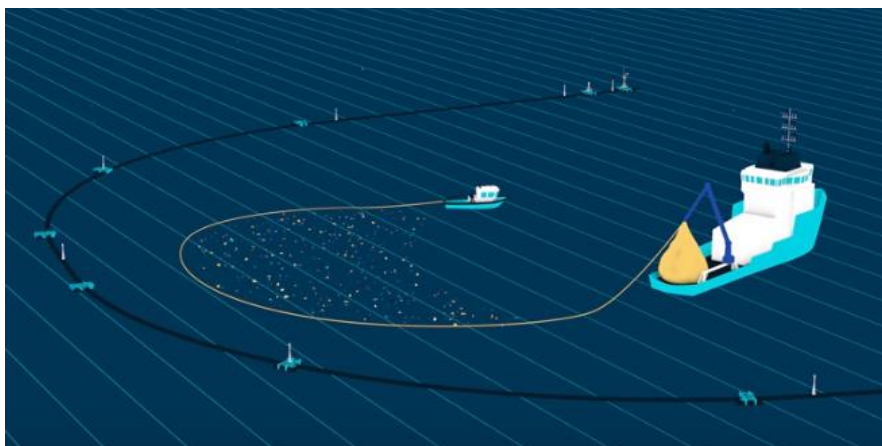


Figura 17: Demonstração do processo de coleta. Fonte: Youtube video - The Ocean Cleanup Technology, Explained.

Como apresentado pela empresa [27], após 273 testes em escala do modelo, seis protótipos no mar, diversos estudos que originaram artigos científicos relacionados com a situação do plástico no oceano e um mapeamento da região do *Great Pacific Garbage Patch (GPGP)* com mais de 30 navios e aeronaves, foi lançado em setembro de 2018 o primeiro sistema de limpeza, *System 001*. Durante aproximadamente quatro meses em alto mar, foram provados diversos aspectos da tecnologia, porém o sistema não estava retendo corretamente o plástico capturado e durante o tempo de teste de

novas soluções houve uma fratura, que causou a separação de uma seção de 18 metros de comprimento.

Com a falha do primeiro sistema, foi necessária a recolha da tecnologia e a busca por um novo projeto. Ao usar os conhecimentos e dados obtidos no primeiro teste, foi conduzida uma análise para se perceber a raiz do problema que causava tanto a falha mecânica quanto a não retenção devida do plástico. A conclusão foi que o sistema devia mover-se com o plástico a uma velocidade consistente, seja essa mais rápida ou devagar, possibilitando que a coleta e a retenção fossem bem-sucedidas. Além disso, foi determinado que a fratura ocorreu devido a fadiga do material, causada pela concentração de tensões nos pontos de solda nas suas conexões.

Um novo desenho foi realizado, tendo em conta estas causas analisadas, dando origem ao Sistema 001/B. Este novo sistema foi projetado como uma plataforma modular para se testar diferentes formas de se solucionar o problema previamente apresentado. Em junho de 2019 o Sistema 001/B foi instalado com sucesso no GPGP. O objetivo inicial foi testar as diferentes soluções, como a utilização de boias para acelerar o sistema, a redução da velocidade do sistema com o auxílio de paraquedas conectado ao sistema, diferentes formatos de saia e um ajuste da localização de uma tela para reduzir os carregamentos no flutuador. Esse sistema modular pode ser modificado em alto mar.

O sistema atual aproveita-se de forças oceânicas naturais, para evitar uma alta intensidade energética. Ambos o sistema e o lixo são levados pelo vento, ondas e corrente, no entanto há uma diferença de velocidade entre o sistema e os resíduos, gerada pelo uso de uma âncora de paraquedas, responsável por reduzir a velocidade do sistema e assim reter o plástico capturado.

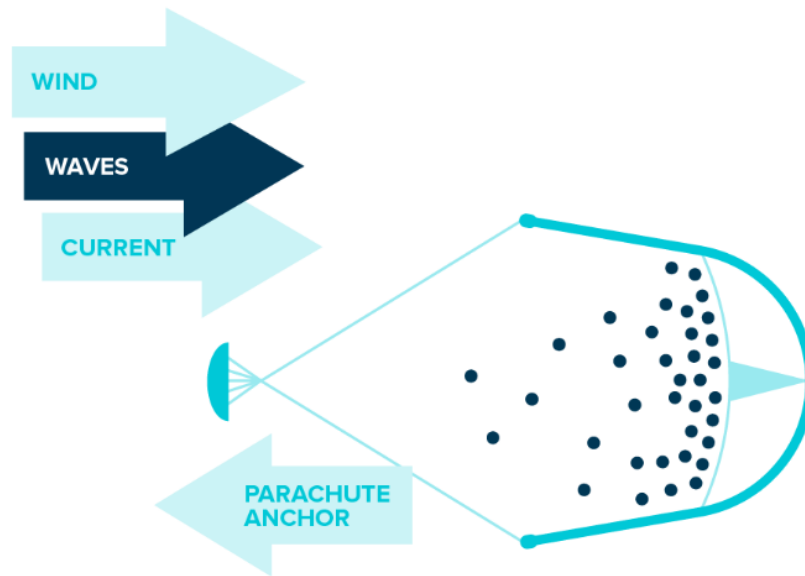


Figura 18: Modelo do sistema 001/B. Fonte: <https://theoceancleanup.com/> [27]

A combinação das forças naturais e a âncora marítima criam um arrasto, permitindo que o sistema se mova mais lento que o plástico, enquanto permite que este resíduo seja capturado. Este sistema navega pelo giro oceânico do Pacífico de forma autónoma por longos períodos, acumulando plástico no centro do sistema. Quando o sistema está completo um navio pode facilmente recolher o lixo e transportá-lo para terra, para ser tratado, reciclado e, em alguns casos, transformado em energia.

Na segunda etapa necessária para a limpeza dos oceanos, é preciso evitar que mais resíduos entrem nos oceanos, para isso a empresa realizou diversas pesquisas, utilizando inclusive tecnologias para observar a presença de plástico em diversos rios e concluiu que uma grande parcela dos resíduos chega aos oceanos através dos rios e que aproximadamente 1% dos rios, o equivalente a 1000 rios, são responsáveis pela entrada de 80% dos plásticos de rio. Portanto, outro objetivo da companhia é aplicar sua mais recente tecnologia em todos estes 1000 rios até 2025. Esta nova tecnologia trata-se do *Interceptor*, um sistema completamente autónomo e movido 100 % a energia solar, com capacidade de 5,6 kWp de produção e baterias de lítio com 20 kWh de capacidade para o armazenamento de energia.



Figura 19: Sistema *Interceptor*. Fonte: <https://theoceancleanup.com/> [27]

Esse sistema possui uma barreira em forma de haste, a qual é responsável por guiar os resíduos do rio para a abertura do *Interceptor*, e sendo o sistema baseado em uma embarcação do tipo catamarã, o fluxo da água pode passar naturalmente através deste equipamento. Dentro desta abertura encontra-se uma esteira rolante que retira o lixo da água e o leva até a região de armazenamento, composta por seis áreas de despejo de lixo, que são capazes de acumular 50 m<sup>3</sup> de lixo plástico. A ideia deste projeto é que o sistema funcione 24 horas por dia e sete dias por semana, sendo capaz de extrair 50 toneladas de lixo por dia, possuindo uma taxa de até 24 kg de resíduos a cada segundo.

### 3.1.2 ROTOR SAILS

Uma fonte de energia comumente aproveitada na indústria marítima é o vento. Muitas embarcações utilizam sistemas de vela para ajudar a propelir a embarcação, em alguns casos esta é até mesmo capaz de agir como única fonte de propulsão de uma embarcação. No entanto estes são elementos que ocupam um espaço significativo no convés principal, espaço este que muitas embarcações não podem sacrificar para obter vantagens não tão significativas, considerando as dimensões extremas que as embarcações podem alcançar atualmente, valores na faixa de 300 metros de comprimento.

Um sistema desenvolvido para aproveitar a energia do vento e ao mesmo tempo evitar algumas das desvantagens apresentadas por velas convencionais de navegação são as *Rotor Sails*. Este sistema tem o seu funcionamento baseado no chamado efeito Magnus, fenômeno pelo qual a rotação de um objeto é capaz de alterar a sua própria trajetória ao percorrer através de um fluido.

A explicação deste fenómeno físico se dá pelo facto de que se observarmos os diferentes pontos de uma corrente uniforme, e nesses pontos o fluido se move com velocidades distintas, onde ocorre um aumento da velocidade, ocorre consequentemente uma queda da pressão, com isso surge uma força no sentido da alta para a baixa pressão.

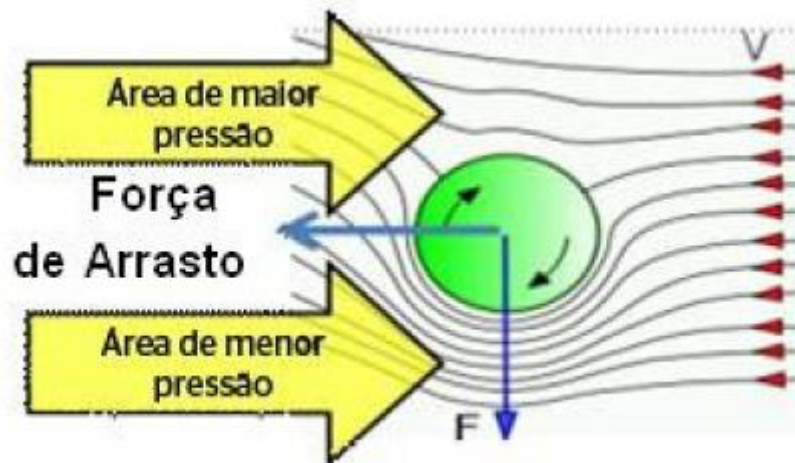


Figura 20: Exemplificação do efeito Magnus. Fonte: <http://estadoquantico.blogspot.com/2011/01/efeito-magnus.html>

A empresa Norsepower [25] desenvolveu as chamadas *Rotor Sails*, onde a força produzida pelo efeito Magnus pode ser aproveitada na propulsão do navio, ao se instalar um cilindro no convés principal da embarcação que através de um sistema de acionamento elétrico variável, pode iniciar um processo de rotação em torno de seu eixo vertical. Como afirmado pela fabricante, este sistema é aproximadamente 10 vezes mais eficiente do que velas navais convencionais, devido à maior quantidade de sustentação produzida com uma menor área velica. Isso permite uma economia de combustível ao se reduzir à necessidade energética do motor.

A tecnologia apresentada pela Norsepower possui três opções de altura, 18, 24 ou 30 metros. O sistema é completamente autónomo e foi idealizado especificamente para utilização em embarcações de grande porte, como petroleiros, cargueiros, cruzeiros, Ro-Ros, entre outros. O seu desenho baseia-se no *Flettner rotor*, equipamento inventado pelo engenheiro alemão Anton Flettner.



Figura 21: Navio com *Rotor Sails* em seu convés principal. Fonte: <https://worldmaritimeneeds.com/archives/285275/norsepower-rotor-sails-achieve-8-2-of-fuel-savings-on-maersk-pelican/>

Até o presente momento este sistema foi instalado em três embarcações de grande porte, possibilitando uma redução na necessidade de combustível entre 5 e 20%, possibilitando uma redução na emissão de dióxido de carbono superior a cinco mil toneladas.

Apesar do benefício em termos energéticos gerado por este sistema, ele não será utilizado na embarcação deste trabalho, pois além das dimensões do navio estudado nesta tese possuir dimensões reduzidas, este também terá o espaço de seu convés principal ocupado pela unidade de tratamento e conversão de lixo, como será apresentado posteriormente.

### 3.1.3 SKY SAILS

Outro desenvolvimento tecnológico para aproveitamento do recurso eólico na indústria marítima foi feito por uma empresa alemã chamada *Sky Sails GmbH* [28]. Esta tecnologia trata-se de uma pipa capaz de auxiliar na propulsão de navios cargueiros e outras embarcações de grande porte.

A velocidade e conseqüentemente o potencial eólico, aumenta de acordo com a altura, por isso seria muito mais vantajoso usar dispositivos capazes de extrair a energia do vento a altas altitudes ao invés de altitudes próximas à superfície. Com esse intuito a empresa referida neste capítulo desenvolveu um *kite* completamente automatizado que fosse capaz de operar em altitudes entre 100 e 300 metros. Esse sistema transmite a energia através de cabos sintéticos conectados à embarcação.

As *Sky Sails* possuem um sistema de lançamento e recuperação que gere a implantação e a retração da pipa, e este sistema é instalado na proa do navio. A pipa só se desdobra no momento em que atinge uma determinada altura, então um guincho libera o cabo conectado a pipa até que ela atinja a altitude operacional desejada. Tanto o processo de lançamento quanto o de recuperação demoram entre 10 e 20 minutos para serem concluídos. A área velica do sistema é de 400 metros quadrados e de acordo com a empresa é capaz de substituir uma potência energética fornecida por um motor principal de até 2 MW. Tomando este um sistema extremamente promissor para a indústria naval, devido a sua poupança energética e ausência de espaço ocupado no convés principal.



Figura 22: Sky Sails conectada a um yacht do tipo trimarã. Fonte: <https://www.skysails-yacht.com/system/advantages/>

#### 3.1.4 OCEANWINGS

Em alguns navios em operação atualmente existem as chamadas *wingsails*. Estas velas de asa são estruturas aerodinâmicas de curvatura variável que é ajustada a um navio no lugar de velas convencionais. Estas novas velas são análogas a asas de avião, porém diferentemente do que ocorre no avião, estas são projetadas para fornecer sustentação de ambos os lados, ajustando a sua curvatura com uma estrutura flexível ou articulada. Devido a sua geometria, estas velas apresentam uma melhor relação sustentação-arrasto se comparadas a velas convencionais.



Figura 23: *Wingsails* em um catamarã. Fonte: <https://www.boatdesign.net/threads/wing-sails.36306/page-2>

As empresas francesas *VPLP Design* e *CNIM* foram responsáveis por desenvolver uma tecnologia chamada de *Oceanwings*, um sistema de vela para a indústria naval completamente autónomo e baseado nas *wingsails* [29].

Apesar da superioridade aerodinâmica das *wingsails*, elas possuem uma grande desvantagem: a limitada capacidade de reduzir a sua área velica devido à sua rigidez. O novo modelo de velas desenvolvido pelas empresas francesas tem como objetivo superar estes obstáculos, pois estas *oceanwings* são capazes de serem dobradas, reduzindo completa ou parcialmente a sua área velica, além de apresentar as vantagens já associadas a velas rígidas (*wingsails*). Este sistema é capaz de reduzir o consumo de combustível num valor entre 18 e 42%.

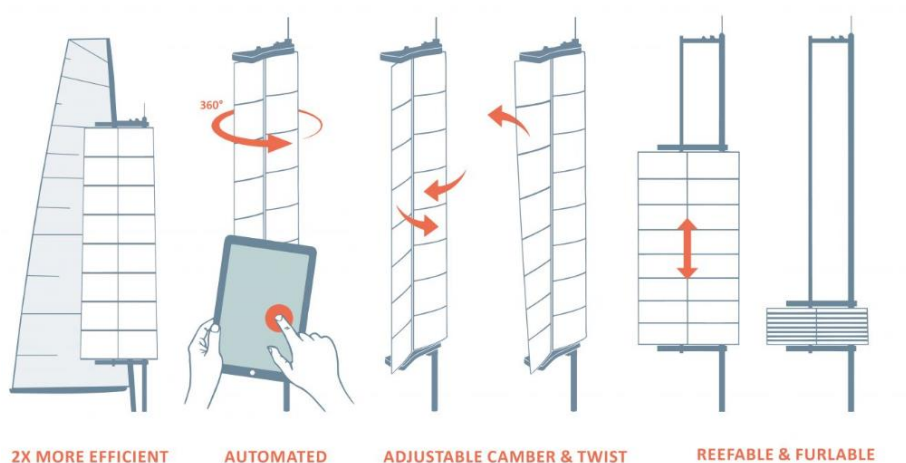


Figura 24: Características da *oceanwing*. Fonte: <https://vplp.fr/realisation/oceanwings/58.html>



Figura 25: *Oceanwings* propelindo um yacht. Fonte: <https://www.luxuo.com/motoring/yachting/komorebi-vplp-oceanwings-hybrid-propulsion.html>

## 3.2 EMBARCAÇÕES EXISTENTES

O uso de energias sustentáveis como forma principal de propulsão na indústria naval é ainda recente, se excluirmos a utilização de velas convencionais. Portanto, são poucas as embarcações, principalmente de grande porte, que fazem uso do recurso solar e eólico para auxiliar na navegação. Porém, com o aumento da pressão global em relação às emissões de gases de efeito estufa, a tendência é surgirem mais investimentos e novas tecnologias neste setor.

Outra novidade na indústria marítima é o uso de navios que se dedicam exclusivamente a recolha de resíduos nos oceanos.

Esta seção da tese apresenta quatro embarcações inovadoras, que estão em fase de projeto ou que já se encontram em operação no mar. Estas tecnologias ajudaram a fornecer ideias e motivações para o desenvolvimento do presente trabalho.

### 3.2.1 OCEAN SAVIOUR

*Ocean Saviour* é uma embarcação ainda em fase de projeto do tipo catamarã e com 70 metros de comprimento, cuja missão é realizar a recolha e reciclagem de plástico no oceano [30].

Os elementos centrais do projeto deste navio são os sistemas de coleta *Manta Collector Array* localizados nos costados (superfície lateral do casco) e na frente da embarcação, que serão responsáveis por realizar a concentração e recolha do plástico.

Os resíduos plásticos serão transportados em seu interior por tapetes rolantes, passarão por sistemas capazes de cortar e moer os resíduos e serão depois processados através de uma instalação de gaseificação por plasma a bordo, o qual realizará a destruição do resíduo com uma mínima quantidade de cinzas como resultado e também impactando minimamente na poluição atmosférica. O produto deste sistema irá abastecer a própria embarcação, tornando esta autossuficiente.

Este processo compacto de destruição de resíduos foi implantado pela primeira vez para uso marítimo a bordo do navio militar americano *USS Gerald R. Ford Aircraft Carrier* e foi desenvolvido pela empresa *PyroGenesis*. O sistema em questão foi escolhido pela marinha americana para fazer parte de seu navio, para que este tivesse um meio compacto e sustentável para destruir o lixo durante a sua navegação, visto que um porta-aviões costuma ficar em alto mar durante um período muito prolongado.

O convés inferior do navio será uma das principais áreas de trabalho do navio, sendo este local onde ocorrerá o tratamento do plástico. O convés intermediário abrigará dois contentores de 12 metros, que servirão de laboratório de pesquisa e área de armazenamento.

A sua capacidade de recolha, de acordo com seus projetistas é estimada em 5 toneladas de plástico por dia, sendo esse lixo recolhido por três aberturas distintas, uma central localizada entre os dois cascos e duas laterais, onde hastes são responsáveis por direcionar o lixo para o interior do navio.

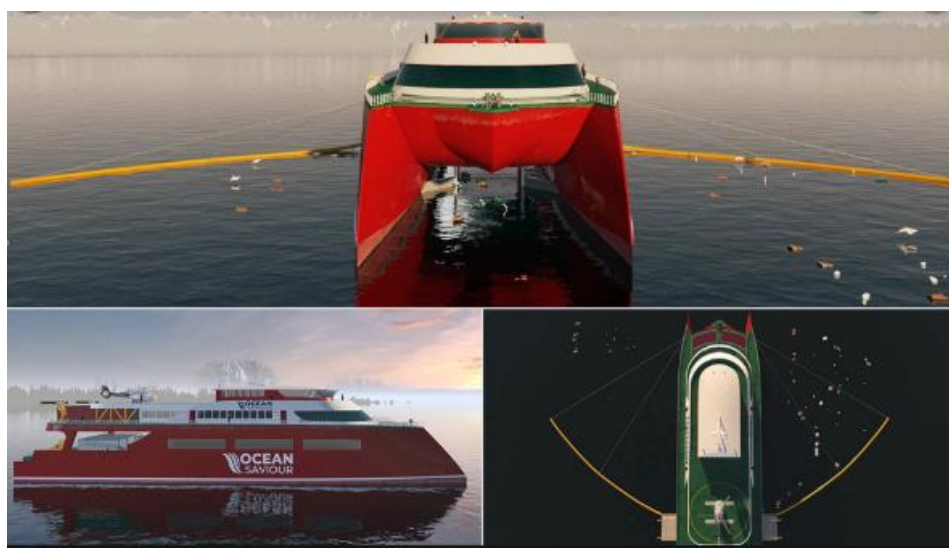


Figura 26: Vistas frontal, lateral e superior do modelo proposto para o *Ocean Saviour*. Fonte: <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-6176135/New-40-million-eco-yacht-collects-five-TONNES-plastic-ocean-day-recycles-it.html>

### 3.2.2 THE MANTA

O *Manta* é outra embarcação que têm como objetivo realizar a limpeza dos oceanos, porém, diferentemente do navio *Ocean Saviour*, será equipada com diferentes sistemas de produção de energia. Este navio possuirá quatro cascos e suas dimensões serão de 70 metros de comprimento, 49 metros de largura e 61 metros de altura.



Figura 27: *The Manta*. Fonte: <https://www.theseacleaners.org/en/the-manta-a-revolutionary-vessel/>

O projeto deste navio tem-se focado em tecnologias inovadoras no campo das energias renováveis, de forma a limitar sua pegada ecológica e maximizar sua autossuficiência energética. Para esse fim o *Manta* possuirá motores elétricos que acionarão suas hélices, e a energia elétrica necessária para fornecer energia a estes motores será produzida a bordo, através dos sistemas de produção de energia renovável, em especial solar e eólica, além do aproveitamento de um sistema de conversão do lixo recolhido em energia.

O objetivo dos promotores do projeto, segundo informações disponíveis em seu site é de instalar a bordo duas turbinas eólicas de eixo vertical do tipo Darrieus, com capacidade aproximada de 500 kW, aproximadamente dois mil metros quadrados de painéis solares, totalizando 100 kW de capacidade, quatro velas automáticas com um valor conjunto de área velica de 2500 metros quadrados e por fim, uma unidade de conversão de lixo, com capacidade de 500 kW. O sistema de armazenamento energético a bordo contará com 100 toneladas de bateria [31].

A coleta do lixo será realizada através de tapetes rolantes na região central da embarcação, entre os seus dois cascos. A capacidade de armazenamento será de 600m<sup>3</sup> ou 250 toneladas de resíduos compactados.



Figura 28: Procedimento de recolha de resíduos no *Manta*. Fonte: <https://www.theseacleaners.org/en/technical-data/> [31]

Esta embarcação ainda está em fase de projeto e a empresa pretende lançá-la em 2023.

### 3.2.3 ENERGY OBSERVER

O *Energy Observer* [32] possui um objetivo diferente das duas primeiras embarcações apresentadas: não faz a recolha do plástico no oceano, mas tem como missão apenas testar e aperfeiçoar diferentes tecnologias para uma navegação sustentável a bordo, servindo assim como um laboratório flutuante para possibilitar futuros investimentos em larga escala de tecnologias de produção energética para navios.

Este navio está a realizar uma odisseia, onde visitará 50 países e 101 portos em seis anos. Uma citação muito interessante de Jérôme Delafosse, líder de expedição do *Energy Observer* é a seguinte:

*“ The ecological transition needs to be seen as a promise for a better world. Through this exclusive Odyssey, we want to make people dream, to raise awareness, to prove that humans can live in harmony with nature and that the fight against global warming can open some doors to a new economic expansion. ”*

O *Energy Observer* é o primeiro navio movido a hidrogénio, energia solar e eólica, que busca a autossuficiência energética, sem qualquer emissão de gases poluentes. O

navio foi transformado a partir de um navio de corrida e possui como dimensões principais 30,5 metros de comprimento e 12,8 metros de largura.

A fonte primária de energia para esta embarcação é a energia solar. O navio possui 141 metros quadrados de painéis fotovoltaicos, sendo eles de dois tipos, painéis conformáveis e painéis bifaciais. O primeiro tipo é necessário para ocupar a área curva no centro do convés principal e cada painel possui uma capacidade de 300 W. Nas regiões com envidraçados ou sem superfície material abaixo, foram colocados painéis bifaciais, que devido às condições apresentadas durante a navegação apresentaram uma capacidade de produção 30% superior aos painéis convencionais. Além disso, o facto de os painéis bifaciais instalados possuírem dois tipos de silício permite que sua eficiência atinja 22%, portanto 3% a mais do que a eficiência comum de um painel solar. O pico de produção alcançou valores de 23,7 kW e a produção média diária dos painéis foi entre 100 e 120 kWh no período de navegação pelo Mar Mediterrâneo. Durante sua navegação na região norte da Europa a estimativa de produção passou a ser de 60 a 70 kWh por dia, por isso foram instalados 27 m<sup>2</sup> adicionais de painéis a fim de ampliar a capacidade máxima para 28,5 kW.

Em 2019 foram instaladas *Oceanwings* com 12 metros de altura e uma área velica de 31,5 metros quadrados. Estas velas foram responsáveis por substituir duas turbinas eólicas de eixo vertical com potência nominal de 1 kW cada. Essa troca permitirá analisar o potencial desta nova tecnologia velica e permitirá ao *Energy Observer* aumentar sua velocidade de cruzeiro devido ao empuxo complementar fornecido pelo vento e reduzir o consumo de energia dos motores elétricos.

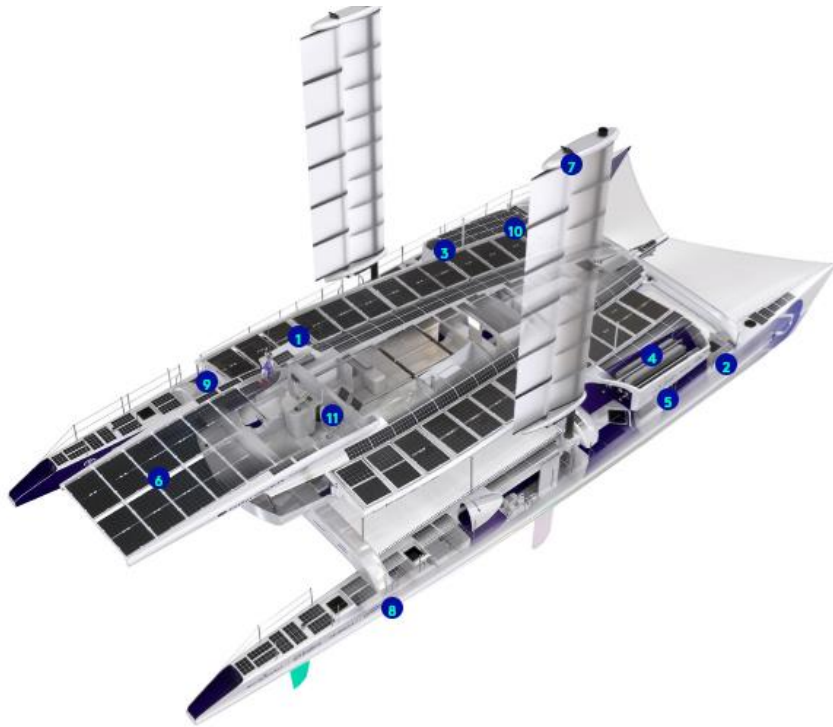


Figura 29: Navio *Energy Observer*. Fonte: <http://www.energy-observer.org/>

O navio possui um sistema de baterias com capacidade de 112 kWh para alimentar o motor elétrico principal, enquanto outro grupo de baterias com capacidade de 18 kWh é responsável por fornecer energia auxiliar. Há também um sistema de armazenamento de hidrogênio com uma capacidade de 332 litros, resultando num armazenamento total de 62 kg de hidrogênio, que proporciona a mesma quantidade de energia que 230 litros de combustível. Portanto, a energia global armazenada é de 1 MWh.

A figura 30 mostra a produção e o consumo energético numa travessia de 1207 horas, onde o consumo total de energia foi de 5442,98 kWh, a produção foi de 9160,8 kWh, onde 52% foi devido à energia solar e 42%, ou 3717,82 kWh foi de redução da necessidade energética devido às velas rígidas.

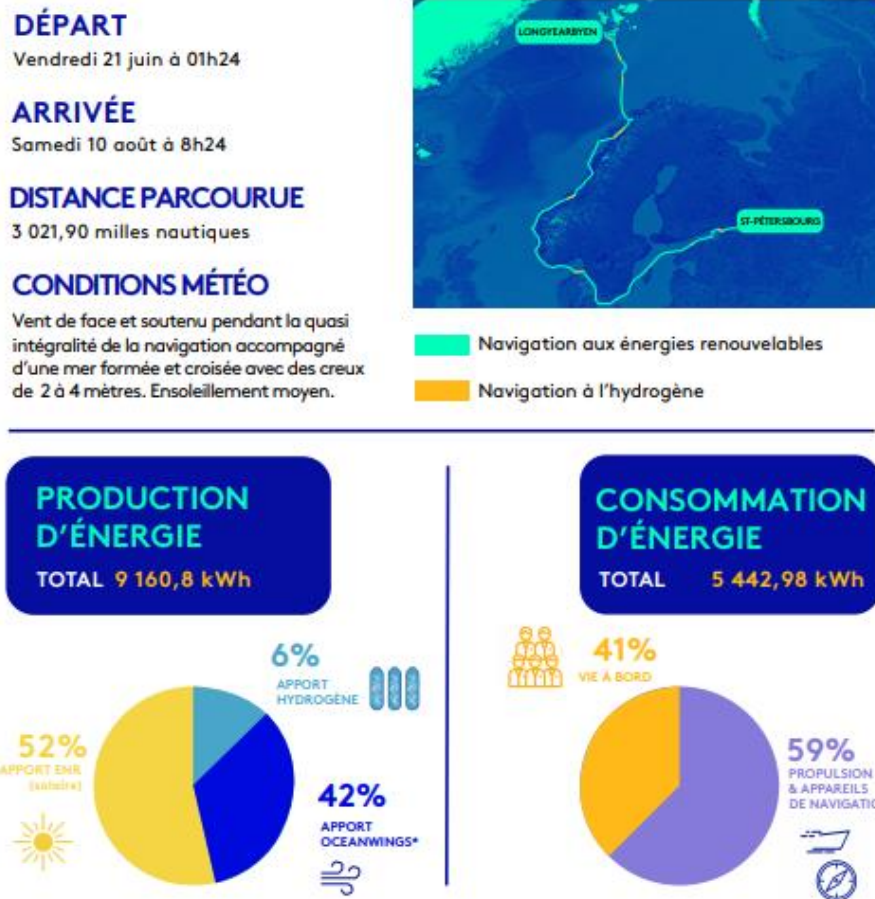


Figura 30: Desempenho energético durante uma travessia de 50 dias. Fonte: <https://www.linkedin.com/company/energyobserver/>

### 3.2.4 PLANET SOLAR

*Planet Solar* é uma embarcação com o único objetivo de navegar utilizando apenas a energia produzida por painéis solares [33].

Este barco é do tipo catamarã, possui 31 metros de comprimento, 16 metros de largura, 6,5 metros de altura, uma superfície de painéis solares de 536,65 metros quadrados composta por 825 módulos. A eficiência dos painéis instalados é de 22,6 % e a energia produzida é armazenada em 12 toneladas de baterias de lítio.

A autonomia do sistema sem luz solar é de três dias, considerando uma velocidade de cruzeiro de 5 nós (2,57 m/s) e uma velocidade máxima de 9 nós (4,63 m/s). Ao se navegar à velocidade de cruzeiro, a potência necessária é de 20 kW, enquanto que a potência máxima do barco é de 120 kW e a performance de pico dos painéis é de 93,5 kW.



Figura 31: Navio *Planet Solar*. Fonte: <http://www.bluebird-electric.net/planetsolar.htm>

### 3.3 ESTUDOS ANTERIORMENTE DESENVOLVIDOS DE ANÁLISE METEOROLÓGICA

O crescimento do mercado de energia solar exige cada vez mais o desenvolvimento de modelos precisos e de alta resolução para se avaliar a irradiação solar na superfície terrestre. Previsões numéricas do tempo (NWP) desempenham um papel de extrema importância na avaliação e previsão do recurso solar, pois é possível realizar simulações explícitas dos principais fatores atmosféricos. Huang et al. [34], utilizou dados existentes de simulações previamente realizadas para avaliar a irradiação horizontal global na Austrália, utilizando três sistemas NWP, *Australian Community Climate and Earth-System simulator (ACCESS)*, *Global Forecast System (GFS)* e *Integrated Forecast System (IFS)*, o qual trata-se de uma fonte de dados que combinada a observações meteorológicas através de um sistema de assimilação de dados resultou na reanálise ERA5. Para validar o sistema foram usados dados de um satélite meteorológico geostacionário. As características principais de cada modelo podem ser observadas na tabela 2 desenvolvida a partir da fonte [34]:

Tabela 2: Parâmetros principais de alguns modelos de NWP. Fonte: Huang J., Rikus L.J., Qin Y., Katzfey J. (2018) *Assessing Model Performance of Daily Solar Irradiance Forecasts over Australia*. [34]

Modelo/satélite	Operador	Resolução horizontal	Resolução temporal
ACCESS-R	ABOM	0.11°	Horária
ERA5	ECMWF	0.25°	Horária
GFS	NCEP	0.25°	3 horas

Os dados coletados por [34] incluem o GHI médio anual e o GHI diário e foi observado que os três modelos se comportam bem nas regiões central e oeste da Austrália, onde ocorre uma prevalência de céu sem nuvens ou em quantidades reduzidas. No entanto, a dificuldade surge ao se tentar realizar previsões em locais com alta concentração de nuvens. O GFS tende a sobrestimar a irradiação solar na região sudeste da Austrália, enquanto o ACCESS subestima este mesmo parâmetro na região norte australiana. Porém o ERA5 possui uma performance robusta, sem deficiências em todo o território australiano.

Outro autor que realizou um estudo comparativo, usando como parâmetro alvo o recurso solar foi Urraca et al. [35], o qual examinou o progresso obtido na estimativa da irradiação utilizando o sistema ERA5 e outro sistema denominado de COSMO-REA6. Para esta análise os dados globais foram avaliados em 294 estações europeias e outras 41 estações ao redor do mundo.

Foi observado neste estudo que o ERA5 possui um erro médio de viés positivo no mundo todo e na Europa de  $+4,05 \text{ W/m}^2$  e  $+4,54 \text{ W/m}^2$ , respectivamente, implicando assim uma redução do viés médio em comparação com o ERA-Interim ( $+10,05 \text{ W/m}^2$ ) e o MERRA-2 ( $+11,34 \text{ W/m}^2$ ). Isto torna o ERA5 comparável aos produtos derivados de satélites em tendência média na maioria das estações no interior de regiões terrestres, no entanto os resultados degradam-se em regiões costeiras e de montanha. Também foi observado que este modelo apresenta uma fraca capacidade de previsão de padrões de nuvem levando a erros absolutos maiores do que os derivados de satélites, visto que subestima as condições sob céu limpo e sobrestima em condições de céu nublado.

Olauson [36] realizou uma comparação dos sistemas de reanálise ERA5 e MERRA-2, usando como tema a energia eólica. Para isso foi considerada a produção de energia eólica agregada de cinco países e a produção de 1051 turbinas eólicas na Suécia. A conclusão obtida foi de que o sistema ERA5 tem um melhor desempenho se comparado ao MERRA-2 para todos os aspectos analisados. A incerteza apresentada pelo sistema ERA5 é 20% menor para correções de longo prazo. O autor verificou que o uso de amostras de um ano na reanálise ERA5 fornece estimativas um pouco mais precisas do que o uso de dois anos de dados em amostras na reanálise MERRA-2.

Carvalho et al [18] antes do desenvolvimento dos sistemas de reanálise ERA5 e MERRA-2, buscou avaliar qual sistema de reanálise existente, dentre seis opções (NCEP-R2, ERA-Interim, NCEP-CFSR, NASA-MERRA, NCEP-FNL e NCEP-FS), fornece as simulações de vento e estimativas energéticas, em ambiente *offshore*, mais precisas. A conclusão deste estudo foi que a reanálise ERA-Interim apresentou os menores erros em termos da variação temporal do vento em alto mar e o sistema NCEP-R2 mostrou o menor viés para a velocidade do vento *offshore*, para a velocidade média do vento e também, para as estimativas de produção de energia eólica *offshore*, porém

apresentou erros elevados em sua variabilidade temporal, se comparado às outras ferramentas de reanálise. Portanto, desconsiderando os sistemas ERA5 e MERRA-2, a ferramenta de reanálise ERA-Interim fornece os dados mais precisos em estudos de simulações de vento próximo à superfície. No entanto para a estimativa do potencial de produção de energia eólica o sistema que apresenta uma maior precisão é o NCEP-R2.

# DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

## 4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Este capítulo contém todos os dados e cálculos realizados para o desenvolvimento do projeto de um navio autossustentável com a missão de realizar a recolha de resíduos, maioritariamente plásticos, em uma localização específica.

O relatório em questão aborda a fase do projeto preliminar da embarcação, a incluir todos os estudos ambientais na região especificada e um projeto naval completamente baseado em formulações obtidas de revisões literárias e regulamentos, para que em uma fase posterior deste projeto, os dados presentes possam ser usados como ponto de partida nas análises numéricas e ensaios em escala reduzida.

### 4.1 DEFINIÇÃO DA REGIÃO DE OPERAÇÃO

O parâmetro inicial ao se considerar para se realizar o projeto de um navio é a caracterização de sua missão em conjunto com a localização de operação.

Atualmente existem diversas áreas oceânicas que apresentam acumulação excessiva de resíduos, em especial os cinco giros oceânicos apresentados em capítulos mais introdutórios do presente relatório. No entanto, outra região negativamente afetada devido ao acúmulo de plástico é o Mar Mediterrâneo. Sendo esta região um dos principais pontos de concentração de resíduos marítimos e também o local de maior proximidade ao continente europeu, o qual é a região central no desenvolvimento da tecnologia proposta, foi definido que o Mar Mediterrâneo será o local definido para os estudos apresentados a seguir.

Lixo marinho é um problema crítico no Mediterrâneo, devido aos seguintes fatores:

- Troca limitada entre a bacia e outros oceanos;
- Regiões costeiras altamente povoadas;
- Turismo elevado;
- Passagem de 30% do tráfego marítimo global;
- Adição de resíduos no mar, oriundos de rios e áreas densamente urbanizadas.

Algumas das maiores quantidades de resíduos sólidos urbanos (RSU) produzidos anualmente por pessoa ocorrem no Mediterrâneo, o equivalente a valores entre 208 a 760 kg por ano [38]. O resíduo que representa o maior componente é o plástico, o qual pode chegar a até 95% do lixo acumulado nas margens costeiras, na superfície do oceano ou no fundo do mar, excluindo regiões com profundidades intermédias.

Infelizmente a maioria desses materiais não se decompõe ou tem um processo de decomposição muito lento, tornando este um problema crítico no fundo do mar onde se estima que 90% do lixo seja plástico, ou na superfície onde esta percentagem pode alcançar os 100% [38].

Pesquisas de campo realizadas até o presente momento indicam que há uma grande variabilidade espacial na concentração de resíduos, que se deve a diversos fatores, como a presença de cidades grandes, uso da costa, comportamento hidrodinâmico e atividades marítimas. As concentrações costumam ser maiores em mares fechados, como a bacia Mediterrânea, a qual tem uma das maiores concentrações de lixo marinho encalhado no fundo do mar, valor capaz de atingir 100 mil itens por quilómetro quadrado [39]. Relatórios sobre o Mediterrâneo, realizados na Grécia, classificam que até 69% do lixo marinho é proveniente de fontes terrestres e até 26% são devido a embarcações que navegam na região [38].

Identificar a fonte do lixo marinho é uma tarefa de alta complexidade, visto que estes resíduos entram no mar a partir de fontes pontuais e difusas, tanto terrestres quanto oceânicas, e podem viajar longas distâncias antes de serem depositados na costa ou se estabelecerem no fundo do mar. A liberação de resíduos originários de aterros costeiros, transportes aquaviários, praias e despejos ilegais contribuem diretamente para a acumulação de lixo marinho. Tal lixo pode ser transportado indiretamente para o mar através de rios, esgotos, escoamento de águas pluviais, estradas ou mesmo devido aos ventos. As fontes terrestres incluem o turismo e o uso recreativo da costa, lixo público em geral, indústria local, portos e locais de depósito de resíduos desprotegidos. Estima-se que aproximadamente 677 toneladas de microplástico entrem no Mar Mediterrâneo todos os anos, a partir de fontes terrestres.

A tabela 3 apresenta uma compilação da quantidade de lixo produzida em diferentes países da região Mediterrânea, além de indicar os valores responsáveis pela quantidade de resíduo plástico marinho associada a cada país na última coluna, a qual totaliza aproximadamente 731 toneladas de plástico.

Tabela 3 : População costeira e produção de lixo/plástico no ano de 2010 por países do Mediterrâneo. Fonte: Marine Litter Assessment in the Mediterranean [40].

Country	Coastal population <sup>1</sup>	Waste generation rate [kg/person/day] <sup>2</sup>	% Plastic in waste stream <sup>2</sup>	% Inadequately managed waste <sup>3</sup>	Waste generation [kg/day]	Plastic waste generation [kg/day]	Inadequately managed plastic waste [kg/day] <sup>4</sup>	Plastic waste littered [kg/day] <sup>4</sup>
Albania	2 530 533	0,77	9	45	1 948 510	174 392	77 897	3 488
Algeria	16 556 580	1,2	12	58	19 867 896	2 374 214	1 378 693	47 484
Bosnia/Herzegovina	585 582	1,2	12	40	702 698	83 972	33 813	1 679
Croatia	1 602 782	2,1	12	9	3 365 842	402 218	37 053	8 044
Cyprus	840 556	2,07	12	0	1 739 951	207 924	831	4 158
Egypt	21 750 943	1,37	13	67	29 798 792	3 858 944	2 572 170	77 179
France	17 287 280	1,92	10	0	33 191 578	3 302 562	0	66 051
Greece	9 794 702	2	10	0	19 589 404	1 949 146	0	38 983
Israel	6 677 810	2,12	14	1	14 156 957	1 974 896	12 577	39 498
Italy	33 822 532	2,23	6	0	75 424 246	4 487 743	0	89 755
Lebanon	3 890 871	1,18	8	34	4 591 228	365 003	123 700	7 300
Libya	4 050 128	1,2	12	23	4 860 154	580 788	132 985	11 616
Malta	404 707	1,78	12	6	720 378	86 085	5 456	1 722
Monaco	34 050	2,1	12	0	71 505	8 545	0	171
Montenegro	260 336	1,2	12	30	312 403	37 332	11 353	747
Morocco	17 303 431	1,46	5	66	25 263 009	1 250 519	824 650	25 010
Gaza	3 045 258	0,79	8	6	2 405 754	191 257	11 515	3 825
Slovenia	336 594	1,21	12	1	407 279	48 670	550	973
Spain	22 771 488	2,13	13	0	48 503 269	6 281 173	0	125 623
Syria	3 621 997	1,37	13	65	4 962 136	642 597	419 763	12 852
Tunisia	7 274 973	1,2	12	60	8 729 968	1 043 231	621 077	20 865
Turkey	34 042 862	1,77	12	16	60 255 866	7 200 576	1 187 323	144 012
Total/mean	208 519 478	2	11	23	360 939 138	36 560 188	7 451 413	731 036

Uma pesquisa realizada pela *Hellenic Marine Environment Protection Association (HELMEPA)* através de embarcações numa área de aproximadamente 173 km<sup>2</sup> do Mar Mediterrâneo, principalmente na região leste, observou que os números de resíduos plásticos representavam 83% do total de itens classificados como lixo marinho. Baseado em extrapolações de peso, a quantidade média de lixo marinho foi estimada em 230,8 kg/km<sup>2</sup>, com concentração máxima de 2627 kg/km<sup>2</sup> [40].

#### 4.2 DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE RECOLHA E TRATAMENTO DO LIXO

Os dois equipamentos principais para a operação da embarcação em questão são o sistema de coleta dos resíduos marinhos e a tecnologia capaz de realizar o tratamento e conversão do lixo recolhido em energia ou combustível para o navio. Ambos os sistemas ainda estão em processo de desenvolvimento ou em fases iniciais de operação, portanto ainda não são tecnologias consolidadas no mercado, apenas se baseiam em sistemas já existentes que precisam ter sua escala alterada de modo a desempenharem seus objetivos eficientemente a bordo de um navio.

Uma descrição dos sistemas de recolha e tratamento indicados para uso no navio a ser projetado será apresentada neste capítulo.

#### 4.2.1 SISTEMA DE RECOLHA

O sistema de coleta dos resíduos deve ser capaz de recolher o lixo acumulado na superfície do mar, sem afetar negativamente a vida marinha. No momento não é exigido que tal sistema seja capaz de realizar a coleta em profundidade, pois numa primeira fase, a recolha superficial já será responsável por reduzir os níveis de lixo marinho.

Como apresentado no terceiro capítulo, recentemente foi instalado no Oceano Pacífico um equipamento desenvolvido pela *The Ocean Cleanup*, com o intuito de concentrar o lixo marinho para que posteriormente a coleta possa ser realizada com maior eficiência. Esse sistema é a prova prática da necessidade existente em se concentrar o plástico antes de se realizar a recolha, pois sua concentração em alto mar pode ser muito dispersa, portanto uma parceria com tal sistema seria de grande utilidade. No entanto também é preciso que o navio tenha um sistema próprio de coleta embarcado, possibilitando que esta seja realizada em conjunto com o sistema de concentração da *Ocean Cleanup*, ou até mesmo de forma completamente independente.

O sistema de coleta é altamente influenciado pelo tipo da embarcação, podendo este ser através de tapetes rolantes em aberturas no casco ou em sistemas que funcionam como redes de pesca, no entanto o uso de redes convencionais ou gruas de pequena dimensão para realizar a recolha é altamente desaconselhável, devido a sua alta possibilidade de afetar os animais marinhos durante seu processo de utilização.

A figura 32 apresenta um possível sistema composto por tapetes rolantes, enquanto a figura 33 exemplifica um sistema com bolsa de coleta:



Figura 32: Sistema de coleta por tapetes rolantes. Fonte: <https://getboat.com/de/boat-news/eko-yahta-ocean-saviour-vo-spasenie-okeana-ot-musora>



Figura 33: Bolsa de coleta para recolha de resíduos. Fonte: <http://www.thomsea.fr/UK/hydrocarbures.awp>

Devido ao facto de a embarcação do presente projeto ser um navio monocasco, detalhe que será mais bem explorado e justificado em seções posteriores deste relatório, o sistema de recolha definido será do tipo bolsa de coleta.

Atualmente existe uma empresa francesa, chamada *Thomsea* [41], cujo produto trata-se do sistema de coleta apresentado na figura 33. Este produto encontra-se em operação atualmente e é responsável por realizar coletas e filtragem de resíduos, tanto sólidos como líquidos (derramamento de óleo) em alto mar, regiões costeiras e rios, possuindo dois tipos de configurações, uma para coleta máxima de 2 toneladas e outra para 8 toneladas, sendo capaz de coletar inclusive resíduos a até 70 cm abaixo da superfície marinha. No entanto este sistema ainda possui algumas limitações como a velocidade do navio durante a operação que deve se limitar a 2 nós (1,03 m/s), o navio deve ser de pequeno a médio porte, a abertura da cesta tem no máximo 5 metros por 1,8 metros e o alcance máximo transversal é de 20 metros.

Portanto este sistema não é muito prático para ser usado na embarcação foco deste projeto. Porém um empreendimento sem fins lucrativos chamado *ReCleanSea* [42], está a trabalhar para desenvolver um sistema baseado no apresentado pela *Thomsea* e de maiores dimensões. Este projeto ainda está em fase inicial, sem mesmo a existência de um protótipo atualmente, porém o seu esquema de funcionamento pode ser observado na figura 34:

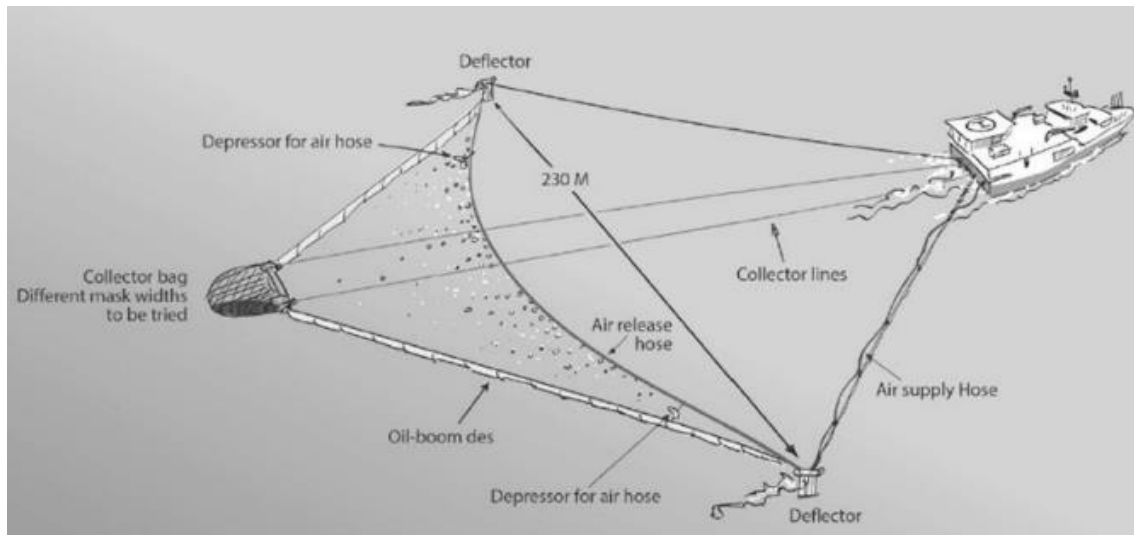


Figura 34: Sistema de coleta do projeto *ReCleanSea*. Fonte: <http://www.recleansea.org/> [42]

Esse sistema será composto por uma bolsa de coleta, defletores, mangueiras de ar e sensores, sendo todo o sistema flexível e, portanto, de fácil armazenamento, além de apresentar peso reduzido. De acordo com a informação disponível pela empresa fabricante do sistema base, essa tecnologia será capaz de realizar a coleta sem afetar a vida marinha.

No atual trabalho a tecnologia considerada presente a bordo do navio será a o sistema de coleta da *ReCleanSea*.

#### 4.2.2 TECNOLOGIA DE TRATAMENTO

Uma tecnologia extremamente necessária para obter sucesso neste empreendimento está em processo de desenvolvimento por uma subsidiária do grupo IPS a *Synecom S.R.L.*, tal tecnologia trata-se de uma estação patenteada de conversão de lixo em pequena escala através do uso da pirólise. Ela é capaz de converter os resíduos recolhidos previamente em *syngas* e *pyrolysis oil* com uma eficiência de conversão superior a 90% e com capacidade de processamento de aproximadamente 250 kg/hora.

Os detalhes de funcionamento desta tecnologia não serão aprofundados, visto que este não é o escopo principal deste trabalho, sendo apenas indicadas a seguir algumas características relevantes, que foram necessárias para o projeto naval.

Para que seja realizada a conversão do lixo, é necessário realizar um pré-tratamento dos resíduos obtidos, visto que os mesmos estarão molhados e serão majoritariamente compostos de macrolásticos. Portanto, o primeiro passo será uma operação de secagem, seguida de centrifugação, resultando na remoção de água do mar e

humidade. Em seguida o resíduo passará por um triturador e uma máquina extrusora que formará *pellets* que possam ser pirolisados.

A unidade de processamento para a conversão do lixo nos resíduos resultantes terá uma dimensão de 50 m<sup>2</sup> e a dimensão total da instalação, considerando espaço para manutenção, assim como tapetes rolantes para o transporte dos *pellets* e áreas extras como câmara de gás, unidade de refrigeração e painéis de controlo e automação, será de 100 m<sup>2</sup>. O peso de toda a instalação foi estimado pela empresa fabricante em 10 toneladas.

A eficiência de 90% do sistema de conversão indica uma produção de 10% de cinzas, porém dentro destes 90%, que representam os combustíveis biológicos produzidos, 65% será óleo de pirólise e 35% será gás de síntese.

O processo de pirólise apresenta uma produção média de gases poluentes equivalente a 56 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de plástico, a qual é 77 a 99% inferior a sistemas de produção energética através de combustíveis fósseis.

O sistema de tratamento e conversão de lixo tem capacidade de operar 24 horas por dia, salvo períodos ocasionais de manutenção, e necessita de 70 kWh de energia para iniciar o processo de queima.

### 4.3 CÁLCULOS PRELIMINARES

#### 4.3.1 CÁLCULO DOS SISTEMAS DE RECOLHA E CONVERSÃO EMBARCADOS

Após a definição do local de atuação, missão do navio e os principais equipamentos a bordo, é possível iniciar o dimensionamento do navio.

O primeiro passo foi realizar cálculos relativos ao sistema de coleta e tratamento do navio, sem considerar necessariamente as dimensões do navio. Um ponto principal para se iniciar o projeto foi a pesquisa de navios que realizem alguma operação de reboque ou coleta, mesmo que os elementos coletados não sejam especificamente lixo marinho. Um exemplo comum deste tipo de embarcação são navios pesqueiros, responsáveis por coletar diferentes espécies de animais marinhos. Estes navios costumam operar em velocidades muito inferiores à sua velocidade de cruzeiro, devido ao maior peso e resistência durante sua operação de reboque, ou seja, a sua velocidade durante a operação tipicamente está entre 3 nós (5,56 km/h) e 7 nós (12,96) km/h.

Tabela 4: Dados da localização alvo da operação

Local para a fase inicial de operação				
Região	Densidade média	Maior concentração	Resíduos entrando no mar	% de plástico
	[ton/km <sup>2</sup> ]	[ton/km <sup>2</sup> ]	[ton/ano]	
<b>Mar Mediterrâneo</b>	0,2308	2,6270	677	83%

Como apresentado anteriormente, a densidade média de resíduos no Mar Mediterrâneo é de 0,231 toneladas por quilômetro quadrado. O sistema de coleta embarcado possuirá um alcance de 230 metros e para efeitos de projeto, foi considerado que a eficiência durante a coleta é de 90%, ou seja, aproximadamente 10% do lixo na região não será coletado devido a diversos fatores, como a oscilação das ondas a dimensão reduzida de determinados resíduos, além dos períodos em que não poderá ocorrer a coleta devido a condições ambientais extremas. Com isso é possível aplicar a equação 4.1 para determinar a quantidade de resíduos que serão coletados em média a cada hora:

$$Q_h = v_{op} * c_{mr} * r * \eta_{col} \quad , \quad (4.1)$$

onde  $Q_h$  é a quantidade de resíduos coletados por hora,  $v_{op}$  é a velocidade de operação,  $c_{mr}$  é a concentração média de resíduos,  $r$  é o alcance transversal do sistema de coleta e  $\eta_{col}$  é a eficiência do sistema de coleta.

Foi considerado que o navio precisará atracar no porto e permanecer em média por três dias a cada mês, para que seja feita a retirada dos resíduos excedentes, operação a qual foi considerada uma taxa de remoção de 24 kg/s baseado no sistema de coleta *Interceptor*, apresentado no capítulo anterior, resultando, como será possível observar na tabela 6, num tempo de aproximadamente 2 horas para esvaziar os tanques de resíduos sólidos no porto. Além deste motivo, o período considerado será para a realização de possíveis manutenções, troca de tripulações e reabastecimentos. O processo de coleta, assim como a conversão do lixo em energia decorrerá durante as 24 horas do dia, resultando em média em 6,37 toneladas de resíduos coletados por dia. É normal na indústria naval considerar-se margens de segurança em muitos cálculos, portanto foi considerada uma margem em viagem de 10% para casos não previstos de avarias ou períodos sem combustível em alto mar. Com essa consideração a estimativa de resíduos coletados anualmente é de 2075,54 toneladas, valor que ultrapassa em mais de três vezes a quantidade média de microplástico que entra no Mar Mediterrâneo anualmente (677 toneladas). Portanto, caso o sistema funcione de acordo com o planejado, ele será capaz de efetivamente reduzir a quantidade de resíduos na superfície do Mar Mediterrâneo, caso a entrada dos demais resíduos não ultrapasse o dobro da taxa de entrada do microplástico.

Como indicado anteriormente, a percentagem de plástico considerada é de 83%, então a quantidade de plástico retirada anualmente é 83% de 2075,54 toneladas, o que

equivale a 1723 toneladas (2,5 vezes a quantidade média anual de microplástico que entra no Mar Mediterrâneo, devido a fontes terrestres).

Tabela 5: Estimativa da capacidade de coleta do navio

<b>Estimativa do sistema de coleta do navio</b>		
<b>Velocidade de operação do navio:</b>	3,00	nós
	1,54	m/s
	5,56	km/h
Velocidade máxima do navio:	9,00	nós
	16,67	km/h
Autonomia desejada:	30,00	dias
Concentração média de resíduos:	0,23	ton/km <sup>2</sup>
Eficiência do sistema de coleta:	90%	
<b>Informações de recolha</b>		
<b>Alcance máximo do sistema de coleta:</b>	0,23	km
<b>Quantidade de resíduos coletados por hora:</b>	0,27	ton
Tempo de coleta:	24,00	h
Tempo perdido no porto e com manutenções:	3,00	dias
Margem de segurança de viagem:	0,10	
Resíduos coletados em um dia:	6,37	ton
Resíduos coletados em uma semana:	44,59	ton
Resíduos coletados em um mês:	191,12	ton
Resíduos coletados em um ano:	2075,54	ton
<b>Características do lixo</b>		
Porcentagem de plástico entre os resíduos marinhos:	83,00%	
Massa volúmica média do lixo:	135,00	kg/m <sup>3</sup>
	0,14	ton/m <sup>3</sup>

A tabela 5 apresentada acima compila as informações descritas anteriormente sobre o sistema de coleta do navio. Além disso, no final da tabela é possível observar um valor referente à estimativa da massa volúmica do lixo. Esse valor é muito difícil de definir, pois os resíduos marinhos são compostos de diferentes tipos de material e é preciso acrescentar a este facto, a questão de que até mesmo se simplificarmos ao considerar apenas o tipo plástico como material presente, ainda temos que levar em consideração que existem diversos produtos plásticos entre o lixo marinho, como sacolas, garrafas e redes de pesca por exemplo, cuja densidade é diferente, apesar de possuírem o mesmo tipo de material. Para solucionar este problema foi utilizado como referência um artigo científico [43] onde a autora fez experiências com diferentes materiais e apresentou um valor indicativo para a densidade do plástico de 135 kg/m<sup>3</sup>.

Após a caracterização quantitativa do sistema de coleta, é possível realizar o mesmo procedimento para se caracterizar o sistema de tratamento e conversão do lixo,

baseado nas informações previamente apresentadas, acrescido de novos parâmetros obtidos através de consultas literárias.

O sistema de tratamento do lixo tem capacidade de conversão de 250 kg a cada hora, durante 24 horas com um aproveitamento de 90%. Dentro destes 90% há dois combustíveis resultantes, o óleo de pirólise e o gás de síntese, sendo que o primeiro representa 65% e o gás representa 35% dos produtos combustíveis. Portanto, ao se realizar um simples cálculo de percentagens verificamos que são produzidos aproximadamente 79 kg de gás e 146 kg de óleo, com apenas 25 kg de cinzas.

Ao considerar uma operação contínua durante as 24 horas do dia, é possível definir a capacidade diária de conversão do lixo sendo de 6 toneladas. Como apresentado na tabela 5, a quantidade de resíduos coletados num dia é de 6,37 toneladas. É necessário considerar a hipótese de não conversão de todo o lixo coletado, portanto o cenário hipotético considerado para o projeto é de que 1% do lixo marinho é de resíduos perigosos e 5% será reciclado ao invés de convertido em energia ou combustível.

O passo final da caracterização do sistema de tratamento é a definição dos espaços de armazenamento. Para isso foi considerado que o navio deve ser capaz de armazenar em seus tanques 30 dias de combustíveis e resíduos, no entanto não é necessário dimensionar tanques capazes de armazenar 30 dias dos resíduos coletados, sem considerar a sua conversão, visto que este é um caso extremamente improvável de se acontecer e exigiria um volume extremamente elevado para o tanque em questão, portanto as necessidades base para o dimensionamento dos tanques são:

- 30 dias de autonomia;
- Margem de segurança de 15% para sobredimensionamento;
- Capacidade de armazenamento de 100% dos lixos perigosos no período de 30 dias;
- Capacidade de armazenamento de 100% dos lixos para reciclagem no período de 30 dias;
- Capacidade de armazenamento de 40% do lixo coletado no período de 30 dias;
- Capacidade de armazenamento de 100% das cinzas produzidas em 30 dias;
- Capacidade de armazenamento de 100% do óleo produzido em 30 dias;
- Capacidade de armazenamento de 100% do gás produzido e comprimido por 30 dias.

Para obter os valores volumétricos apresentados na tabela 6, foi preciso estimar a densidade dos combustíveis produzidos. A densidade do gás de síntese é determinada pela percentagem volumétrica de cada gás componente e suas respectivas densidades. Normalmente o gás de síntese é composto por H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> e CO, no entanto os seus elementos podem variar, assim como suas proporções, tornando a determinação de um valor para sua densidade, sem saber sua composição, tarefa difícil de realizar, portanto obteve-se um valor de referência de 1,22 kg/m<sup>3</sup> sugerido por [44]. No

entanto, dimensionar um tanque capaz de armazenar todo este gás em seu estado natural não é prático, visto que seria necessário um tanque com mais de 53 mil  $m^3$  para armazenar todo o gás produzido em 30 dias. A solução foi considerar um sistema de compressão do gás de síntese, tornando a sua densidade equivalente a  $244 \text{ kg}/m^3$  ao se comprimir o gás a aproximadamente 200 bar, respeitando uma proporção obtida na referência [45].

Além das densidades do gás e dos resíduos já apresentados, é necessário determinar a densidade do óleo de pirólise e das cinzas produzidas. O óleo de pirólise, assim como ocorre no gás de síntese, não possui sua composição definida de forma fixa, pois depende do material biológico que dá origem a este combustível. No caso estudado já foi demonstrado que a maioria dos resíduos convertidos será de origem plástica, conseqüentemente, a densidade a considerar tem que ser referente ao óleo produzido com este tipo de material. Kalargaris [46] estuda a performance do óleo de pirólise produzido a partir de plástico em motores diesel e, de acordo com o autor, a sua massa volúmica é de  $981,3 \text{ kg}/m^3$ , valor adotado neste estudo.

Finalmente, para o dimensionamento do tanque de cinzas (10% do resultado do sistema de conversão) foi utilizado um novo artigo [47] que propõe métodos de medição de elementos considerados sobras em processos como a pirólise. Nesse artigo, o autor afirma que a densidade em questão varia entre  $250$  e  $600 \text{ kg}/m^3$ , dependendo do material de origem. Foi aqui considerado o menor valor, pois este possibilita sobrestimar à dimensão do tanque.

Com estes parâmetros definidos é possível construir a tabela 6 e com ela concluir que serão produzidos 146 kg de óleo de pirólise e 79 kg de gás de síntese a cada hora.

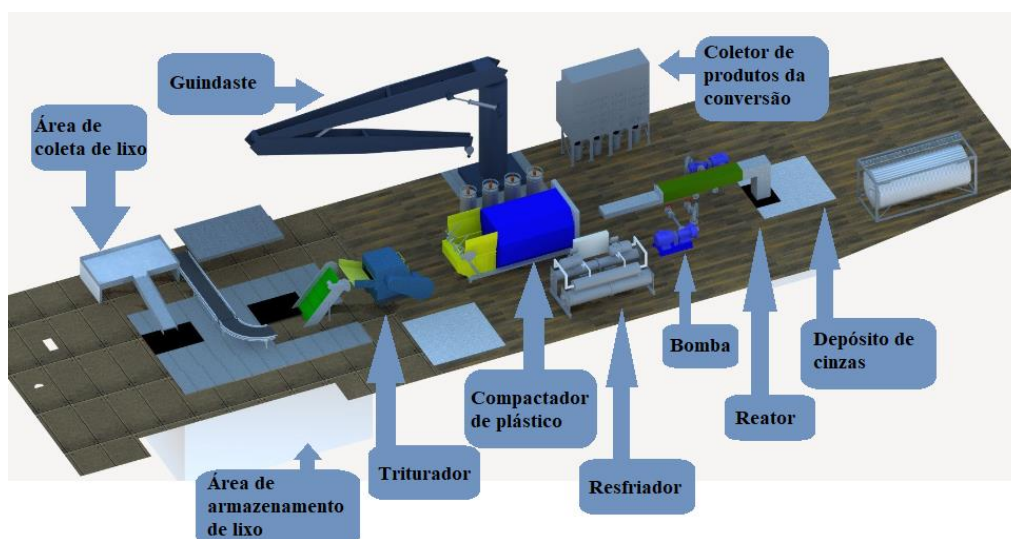


Figura 35: Esquema simplificado da unidade de conversão do lixo.



Figura 36: Modelo do barco. Fonte: <https://www.icollect.earth/> [14]

Tabela 6: Definição do sistema de conversão e dimensionamento dos tanques.

<b>Sistema de conversão</b>		
Capacidade	250.00	kg/h
	0.25	ton/h
Período de operação	24.00	h
Area	100.00	m <sup>2</sup>
Energia necessária para operação do sistema de tratamento e conversão de resíduos	70.00	kWh
Peso	10.00	ton
Taxa de conversão	Percentagem	
	90.00%	
Saídas do sistema	Combustíveis biológicos	Percentagem
	Gás de síntese	35.00%
	Óleo de pirólise	65.00%
Massa volúmica do gás	1.22	kg/m <sup>3</sup>
Massa volúmica do gás comprimido	244.00	kg/m <sup>3</sup>
Massa volúmica do óleo	981.30	kg/m <sup>3</sup>
Massa volúmica das cinzas	250.00	kg/m <sup>3</sup>
Produção horária de gás de síntese	0.079	ton/h
Produção horária de óleo de pirólise	0.146	ton/h
<b>Classificação do lixo</b>		
Capacidade de conversão	6.00	ton/dia
Resíduos coletados	6.37	ton/dia
Resíduos perigosos	0.06	ton/dia
Resíduos recicláveis	0.32	ton/dia
Resíduo a ser tratado e convertido	5.99	ton/dia
<b>Dimensionamento dos porões de carga</b>		
Período de acumulação	30.00	dias
Tanque de resíduos coletados	614.00	m <sup>3</sup>
Tanque de resíduos perigosos	17.00	m <sup>3</sup>
Tanque de resíduos recicláveis	82.00	m <sup>3</sup>
Dimensão total dos tanques de resíduos	713.00	m <sup>3</sup>
Taxa de remoção de resíduos no porto	24.00	kg/s
Tempo necessário para esvaziar os porões	2.00	h
Tanque de cinzas	83.00	m <sup>3</sup>
Tanque de óleo de pirólise	124.00	m <sup>3</sup>
Tanque de gás de síntese	268.00	m <sup>3</sup>
Volume total de armazenamento	1188.00	m <sup>3</sup>

#### 4.3.2 ANÁLISE DE EMBARCAÇÕES SEMELHANTES

Após a definição dos principais sistemas que estarão a bordo da embarcação para seu correto funcionamento, é preciso idealizar um navio capaz de abrigar os equipamentos citados, além de se realizar a operação para o qual será projetado.

O primeiro passo é definir o tipo de casco do navio. Para isso foi considerado com fator principal o custo, visto que o primeiro modelo será construído a partir de um navio existente e que funcionará mais como um protótipo para testar em cenários reais de operação a tecnologia embarcada. Esse critério fundamental do custo faz com que apesar de um navio do tipo catamarã apresentar maior eficiência devido à sua estabilidade, espaço de convés e sistema de recolha por tapetes rolantes, seja preferível utilizar um navio com monocasco para a primeira versão, pois navios catamarãs costumam apresentar um custo 25% superior aos monocascos quando novos e 50% superior em embarcações usadas.

Com o formato do casco definido é preciso então, definir o tipo de navio que servirá de base para a embarcação projetada. Alguns navios que realizam operações semelhantes são do tipo pesqueiro ou navios de apoio *offshore*, como *Platform Supply Vessel (PSV)* e o *Anchor Handling Tug Supply (AHTS)*. Porém além do tipo de operação ser semelhante, é preciso que o navio possua uma ampla área de convés, pois o convés principal será o local de instalação de uma área com formato de armazém que irá conter a unidade de conversão dos resíduos, além do sistema de coleta e demais áreas importantes como um laboratório de pesquisa. Com esta consideração é necessário excluir os navios pesqueiros, pois estes apresentam diferentes formatos, alguns sem espaço livre no convés principal, restringindo desta forma as opções possíveis. A partir desta análise foi definido que os tipos de navio considerados como base serão o AHTS e o PSV, que possuem basicamente o mesmo formato de casco. Um exemplo de AHTS pode ser observado na figura 37:



Figura 37: Embarcação do tipo AHTS. Fonte: <https://www.marineinsight.com/types-of-ships/features-applications-and-limitations-of-anchor-handling-tug-supply-vessels-ahts/>

Um esquema dos principais parâmetros de um navio e suas respectivas nomenclaturas encontra-se representado na figura 38:

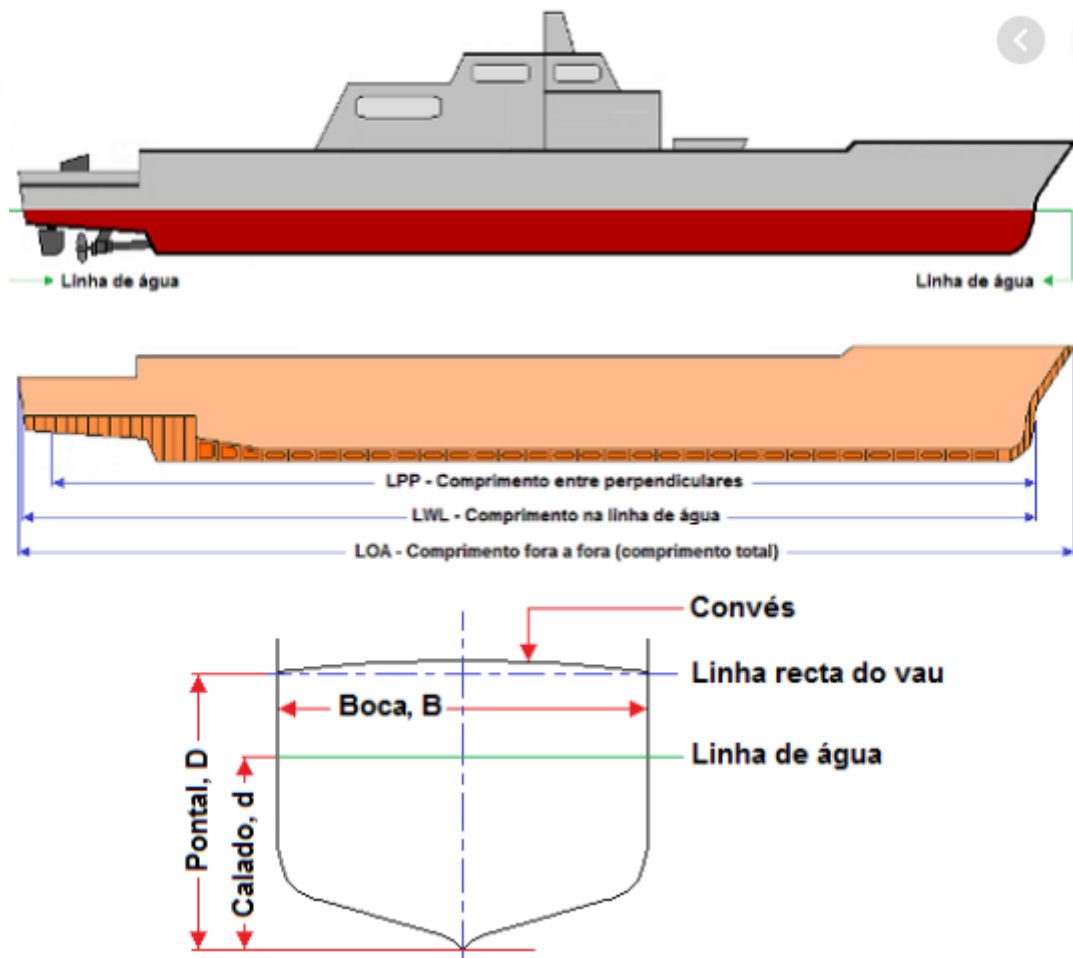


Figura 38: Esquema dos principais parâmetros de um navio. Fonte: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/projecto-de-defensas/principais-caracteristicas-dos-navios/>

Com o tipo de embarcação definido foi possível realizar uma pesquisa de navios semelhantes e compilar as informações fornecidas pelos fabricantes na tabela 7:

Tabela 7: Navios semelhantes

Navio	Tipo	comprimento (LOA) [m]	Largura (boca) [m]	Altura do casco (pontal) [m]	Velocidade máxima [nós]	Velocidade de cruzeiro [nós]	Area de convés [m <sup>2</sup> ]	Altura submersa máxima (calado) [m]	Altura submersa de projeto (calado) [m]	Porte bruto [t]
POSH CONSTANT	AHTS	74,5	17,2	8,0	12,0	10,0	500,0	5,5	6,8	2564,0
POSH COMANDER	AHTS	75,3	18,0	8,1	12,0	10,0	516,0	6,0	6,6	3186,0
POSH RAPTOR	AHTS	70,3	16,6	7,2	13,5	10,0	475,0	4,5	5,9	2350,0
POSH DARING	AHTS	81,0	16,8	7,5	12,0	10,0	650,0	6,3	6,3	3083,0
BOURBON ARCTIC	AHTS	93,6	24,0	9,8	16,0	8,0	780,0		7,8	4129,0
BOURBON ARGOS	AHTS	68,6	15,4	7,0	14,0	10,0	420,0		6,0	2100,0
BAHTERA TEGUH	AHTS	64,8	16,0	5,8	14,0	9,0	420,0		4,9	1611,0
BOURBON LIBERTY	AHTS	59,8	15,0	5,5	13,5	10,0	331,0	4,3	4,9	1460,0
BOS TURMALINA	AHTS	80,4	18,0		12,0	10,0	465,0		6,6	2800,0
BOURBON ALEXANDRE	AHTS	67,0	15,4	7,0	14,0	9,0	420,0		6,0	2100,0
BOURBON SURF	AHTS	87,7	18,0	8,0	18,0	12,0	500,0	6,0	6,6	3117,0
ELANG LAUT 1	AHTS	75,4	16,8		12,0	10,0	518,0		6,1	2181,0
FAR SAGARIS	AHTS	87,4	21,0		12,0	10,0	754,7		7,8	3912,0
GEONISIO BARROSO	AHTS	75,6	18,0	8,0	16,0	13,0	459,0		6,6	2240,0
GOREN	AHTS	74,5	18,0	8,0	14,0		550,0	5,5	6,3	2400,0
LUZOLO	AHTS	69,7	17,2	7,2	16,0	9,0	500,0	5,2	6,1	2320,0
MMA CAVALIER	AHTS	70,1	17,0	7,5	13,6	12,0	500,0		6,0	2515,0
M/V PACIFIC DEFIANCE	AHTS	92,0	22,0	9,0	16,0	10,0	650,0	5,5	7,5	4523,0
SIEM	AHTS	91,0	22,0	9,6	18,0	10,0	813,0		8,0	4161,0
CBO Chiara	AHTS	80,4	18,0	8,0			695,0		6,6	2721,0
Armada Tuah	AHTS	72,5	17,0	7,5	14,5		502,0	6,5		2940,0
Farstad Lady Caroline	AHTS	75,8	17,2		12,0	10,0	509,8		6,8	2656,0
ALCATRAZ	PSV	89,5	16,0	7,5	13,0		840,0	6,2		4587,0
BATUÍRA	PSV	87,4	16,0	7,5	13,0		848,0	6,2		4557,0
BEAUCEPHALUS (CRISTAL)	PSV	84,0	17,6	7,7	14,5		812,0	6,5		4097,0
Bourbon Mistral	PSV	88,8	19,0	8,0	15,5		985,0	6,6		4779,0
Bourbon Peridot	PSV	91,1	19,0	8,0	15,2		1004,0	6,5		4861,0
BRAM BOA VISTA	PSV	92,6	18,3	7,9	11,1		1000,0	6,4		5176,0
BRAM BRAVO	PSV	92,6	18,3	7,9	11,1		1000,0	6,4		4998,0
BRAM BRUCE KAY	PSV	92,6	18,3	7,9	11,1		1000,0	6,4		5176,0
BRAM BUCCANEER	PSV	92,6	18,3	7,9	11,1		1000,0	6,4		5176,0
CBO ARPOADOR	PSV	88,8	19,0	8,0	14,0		865,0	6,0		4750,0
CBO COPACABANA	PSV	88,8	19,0	8,0	14,0		865,0	6,5		4750,0
CBO IPANEMA	PSV	88,8	19,0	8,0	14,0		866,0	6,5		4750,0
Far Symphony	PSV	86,2	19,0	8,0	15,0		960,0	6,7		4927,0
HAVILA FAITH	PSV	82,9	19,0	7,6	14,0		902,0	6,3		4679,0
HAVILA PRINCESS	PSV	73,4	16,6	7,6	11,5		704,0	6,4		3719,0
IMT992	PSV	93,5	22,0	8,5	14,0		1075,0	6,5		4380,0
Island Patriot	PSV	86,2	19,0	8,0	13,0		960,0	6,7		4843,0
MAERSK FETCHER	PSV	82,5	18,8	7,6	11,0		907,0	6,2		4650,0
MAERSK VEGA	PSV	89,4	18,8	7,6	12,0		940,0	6,2		4131,0
Normand Mermaid	PSV	90,1	20,5	9,0	16,0		790,0	7,0		4041,0
NORMAND VESTER	PSV	84,4	18,8	7,6	11,0		956,0	6,3		4587,0
Olympic Intervention IV	PSV	95,0	20,5	9,0	15,3		940,0	7,0		4195,0
PRION	PSV	89,5	16,0	7,5	13,0		840,0	6,2		4587,0
SANTOS SERVICE	PSV	85,3	18,3	7,3	12,0		985,0	6,2		4727,0
SANTOS SUPPLIER	PSV	84,4	18,3	7,3	12,0		985,0	6,2		4779,0
SEA BRASIL	PSV	87,9	19,0	8,0	11,7		1000,0	6,6		4700,0
SIEM ATLAS	PSV	87,9	19,0	8,0	15,0		1000,0	6,6		4700,0
SIEM SUPPLIER	PSV	83,7	19,7	7,5	12,0		912,0	6,1		4308,0
STARNAV CENTAURUS	PSV	90,0	19,0	7,8	10,0		1000,0	6,3		4690,0
STARNAV REGULUS	PSV	90,0	19,0	7,8	10,0		1000,0	6,3		5100,0
STERNA	PSV	87,6	16,0	7,8	13,0		840,0	6,2		4547,0
TAGAZ	PSV	89,5	16,0	7,5	13,0		840,0	6,2		4587,0
TALHA-MAR	PSV	87,4	16,0	7,5	12,7		848,0	6,0		4393,0
THOR SUPPLIER	PSV	84,7	18,3	7,3	12,0		985,0	6,2		4725,0
TORDA	PSV	87,4	16,0	7,5	12,7		848,0	6,0		4394,0
Troms Artemis	PSV	85,0	20,0	8,6	12,0		940,0	7,2		5549,0
Troms Capella	PSV	86,6	19,0	8,0	11,0		992,0	6,6		4700,0
Troms Lyra	PSV	81,7	18,0	7,8	12,0		842,0	6,5		3653,0
Troms Sirius	PSV	93,5	19,0	8,0	12,0		910,0	6,5		4868,0
UP AGUA MARINHA	PSV	84,6	16,6	7,8	15,0		844,0	6,4		4223,0
UP ESMERALDA	PSV	84,6	16,6	8,0	15,0		844,0	6,0		4313,0
UP TURQUOISE	PSV	87,4	19,0	8,0	12,0		1020,0	6,7		5261,0

Como observado na tabela 7, as informações dispostas pelos fabricantes diferem o que representa uma ausência de determinados parâmetros para alguns navios semelhantes, para resolver este problema foi realizada uma limpeza e análise dos dados obtidos, utilizando a linguagem *Python* e os chamados *Jupyter notebooks*. Os códigos de programação encontram-se no anexo.

O passo mais importante da manipulação foi a exclusão de navios com comprimento superior a 75 metros, pois o navio projetado deverá ter dimensões reduzidas, de modo a apresentar uma menor resistência a navegação e menor custo de aquisição e conversão do casco. Contudo, a dimensão mínima considerada foi de 50 metros, visto que praticamente não existem embarcações AHTS com comprimentos inferiores a este valor.

Na indústria marítima, os parâmetros iniciais são baseados em análises de navios semelhantes, através do uso de regressões lineares, de modo a simplificar a obtenção dos dados preliminares. Com isso foi possível obter os gráficos apresentados na figura 39:

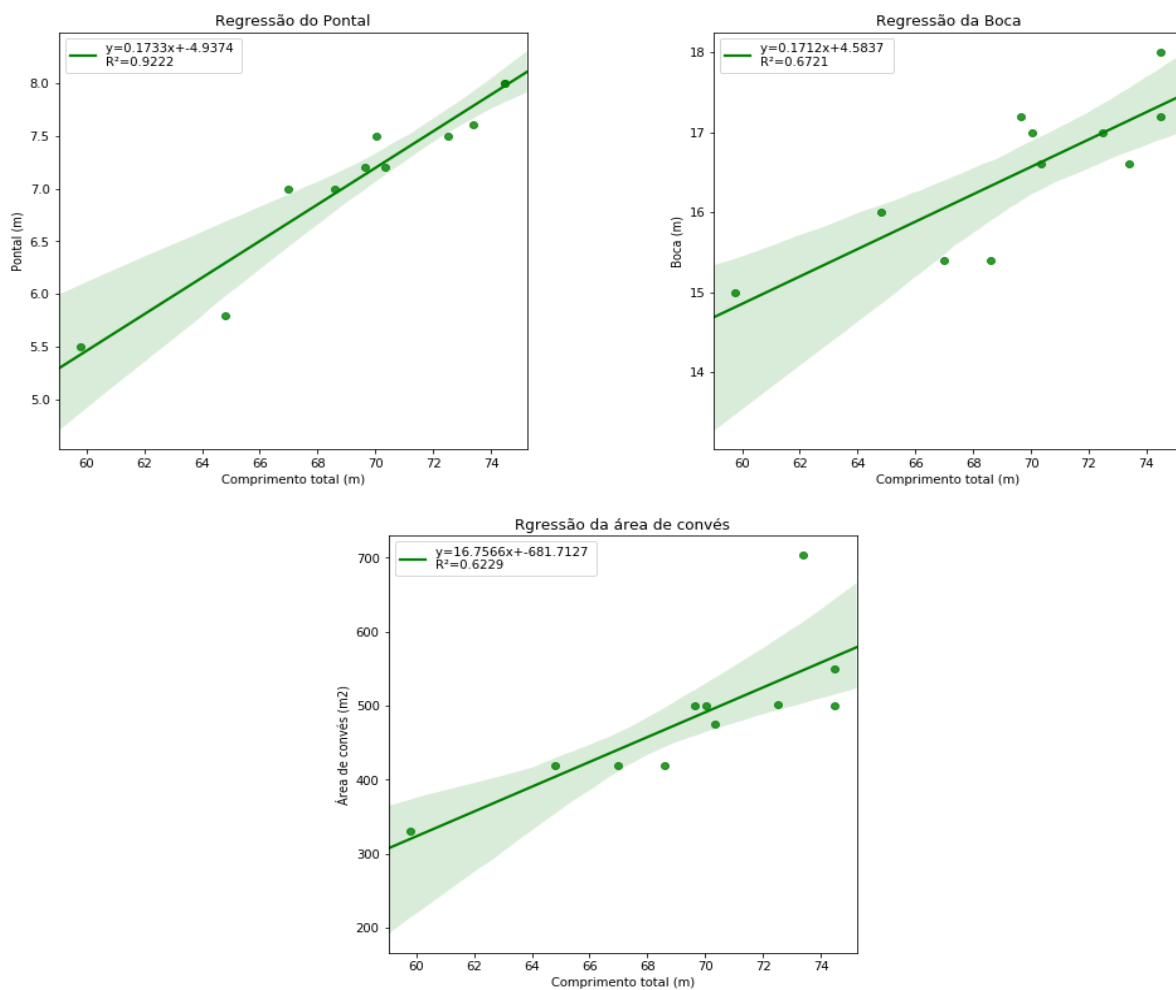


Figura 39: Regressão linear dos parâmetros chave

A partir das regressões pode-se obter o valor mínimo e máximo do pontal de 5,6 m e 8,2 m, assim como estes mesmos valores referentes à boca, que são de 11,8m e 16,3m. Além disso, foi obtido o rácio máximo entre o calado e o pontal, o qual é de 0,63.

### 4.3.3 DIMENSIONAMENTO INICIAL DO NAVIO

Foi desenvolvida uma folha de cálculo onde os limites obtidos na seção anterior referentes a alguns parâmetros do navio foram usados como restrições, durante a aplicação da ferramenta *solver* presente no *software Excel*. Essa ferramenta trata-se de um otimizador, que busca o valor máximo ou mínimo de uma célula denominada como célula objetivo, sujeita a restrições definidas em outras células. O valor objetivo é obtido ao se alterar as células com variáveis livres, respeitando o que foi definido nas células de restrição.

Mesmo um projeto preliminar de um navio possui grande complexidade. Portanto, é necessário respeitar diversos regulamentos, principalmente no que se refere à definição da borda livre mínima (altura mínima entre o nível do convés principal e a superfície da água) e cálculos de equilíbrio e estabilidade. Portanto, devido ao alto nível de complexidade, extensa quantidade de parâmetros calculados e o facto de o foco da tese encontrar-se no uso de energias alternativas a bordo do navio, não serão apresentados de forma detalhada os cálculos para cada parâmetro do navio, mas apenas serão apresentados os valores principais obtidos pelo *solver*, assim como um pequeno número de equações que representam os parâmetros chave do projeto. O método de optimização utilizado pelo *solver* foi o *Generalized Reduced Gradient (GRG) Nonlinear*, método aplicável em casos ligeiramente não-lineares.

Nesta seção serão apresentados os resultados gerais do *solver*, enquanto que na próxima se aborda em maior detalhe a análise energética do navio.

Primeiramente é necessário definir as variáveis de restrição, para isso foi utilizado entre outros os resultados obtidos na análise de regressão a partir dos navios semelhantes, resultando na tabela 8:

Tabela 8: Variáveis de restrição para a aplicação do *solver*.

Variáveis de restrição				
50	<=	Comprimento total (LOA) [m]	<=	60
11,8	<=	Boca (B) [m]	<=	16,3
5,6	<=	Pontal (D) [m]	<=	8,2
8	<=	Velocidade máxima (Vs) [kts]	<=	10
0,5	<=	Rácio calado-pontal (T/D) [-]	<=	0,63
		Altura metacêntrica (GM) [m]	>=	1
		Área de convés (A) [m <sup>2</sup> ]	>=	500
0,15	<=	Número de Froude	<=	0,3
0,6	<=	Coefficiente de bloco	<=	0,8
		Capacidade de carga [ton]	>=	1575
		Porte bruto (DWT) [ton]	>=	1750
		Rácio comprimento-boca (LOA/B) [-]	>=	4

Além dos valores de comprimento, boca, pontal e rácio calado-pontal, definidos a partir da análise de semelhantes, foram necessárias outras variáveis de restrição para que o resultado da função objetivo apresentasse um valor mais realista.

A velocidade máxima, a área de convés, a capacidade de carga, o porte bruto e o rácio comprimento-boca foram definidos ao se observar valores comuns em embarcações semelhantes e que satisfazem a missão do navio em questão.

Em arquitetura naval existe um elemento geométrico denominado de metacentro, o qual é um ponto virtual, cuja posição determina a estabilidade de corpos flutuantes.

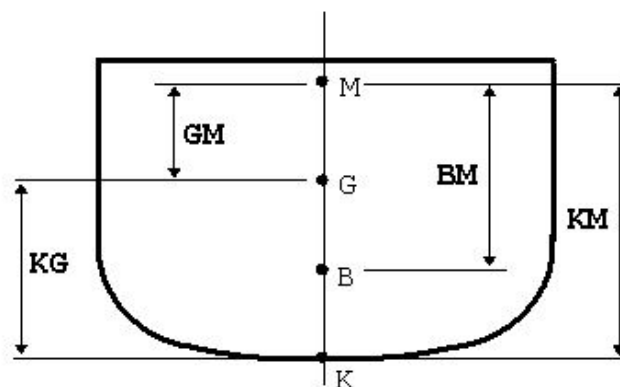


Figura 40: Corte esquemático da seção mestra de um navio, com os parâmetros geométricos de estabilidade. Fonte: <https://fas.org/man/dod-101/navy/docs/swos/dca/stg4-01.html>

Para uma embarcação estável é preciso que em seu projeto o navio possua o metacentro alinhado verticalmente com a altura do centro de gravidade do navio e

que este elemento esteja acima do centro de gravidade no eixo vertical, possibilitando um momento restaurador em caso de oscilações do casco em função das ondas do mar. A altura metacêntrica superior a 1 m é uma recomendação comum na indústria naval, para que o navio apresente boas condições de equilíbrio e estabilidade,

$$GM = KM - KG , \quad (4.2)$$

onde GM é a altura metacêntrica, KG é a altura do centro de gravidade e KM é a distância vertical entre a quilha do navio (ponto mais baixo do casco) e o metacentro,

$$KM = T * (0,9 - 0,3 * C_m - 0,1 * C_b) + \frac{(3 * C_{wp} - 1) * B^2}{24 * C_b * T} , \quad (4.3)$$

em que T é o calado,  $C_m$  é o coeficiente de seção mestra (coeficiente de forma igual ao rácio entre a área da parte imersa da seção transversal na metade do comprimento e a área do retângulo a ela circunscrito),  $C_b$  é o coeficiente de bloco (rácio entre o volume do casco submerso e o paralelepípedo a ele circunscrito),  $C_{wp}$  é o coeficiente de linha de água (equivalente aos demais coeficientes de forma, porém relativo à área da linha de água na altura do calado) e B é a boca da embarcação.

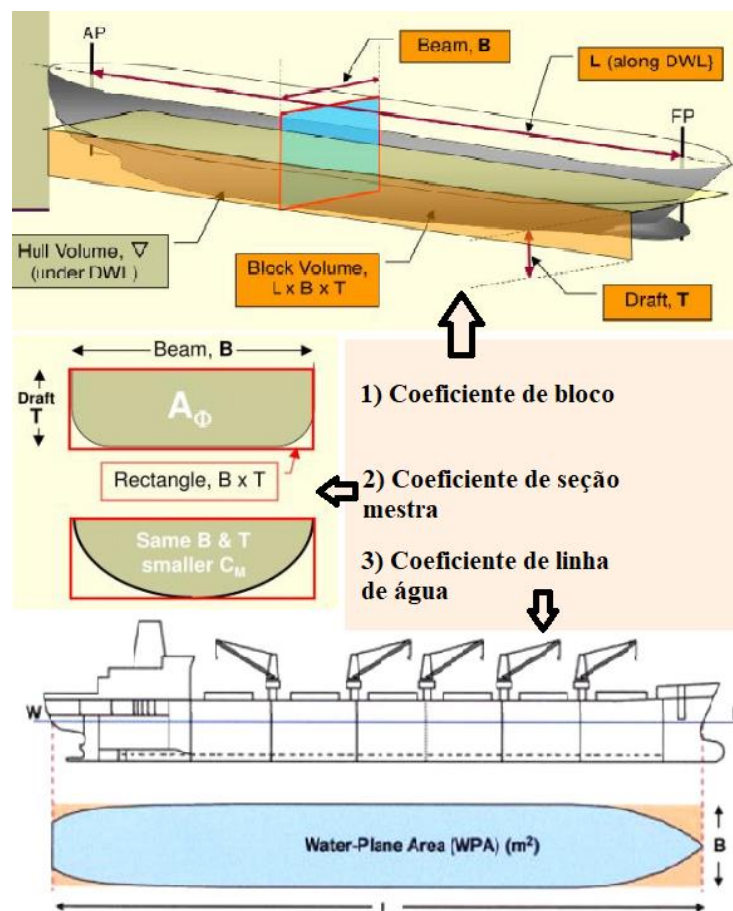


Figura 41: Representação dos parâmetros de forma de um navio. Fonte: <https://www.slideserve.com/cirila/ship-form> & <http://marinegyaan.com/what-is-coefficient-of-finess-of-waterplane-area/>

$$KG = C_{kg} * D + \frac{\nabla_A * \nabla_{DH}}{Lpp * B} \quad (4.4)$$

A equação 4.4 é composta pelo  $C_{kg}$ , que se trata de um coeficiente que varia em função do tipo de embarcação (0,52 a 0,8), D é o pontal do navio, Lpp é o comprimento entre as perpendiculares virtuais do navio, B é a boca,  $\nabla_A$  é o volume da superestrutura e  $\nabla_{DH}$  é o volume das demais estruturas de convívio no convés.

O número de *Froude* é de extrema importância na área hidrodinâmica e hidráulica, representa o rácio entre a força inercial e a força gravitacional. Para cascos de deslocamento como é o caso do navio tema deste trabalho, esse indicador é importante para relacionar a velocidade do navio com sua resistência de navegação. Durante a operação de coleta, a velocidade será muito reduzida, o que naturalmente irá apresentar um pequeno valor para o número de *Froude* e conseqüentemente uma baixa resistência hidrodinâmica, no entanto é preciso avaliar o seu valor para a condição de velocidade máxima, a qual em cascos de deslocamento é considerada alta se estiver acima de 0,3 e baixa abaixo de 0,15. Estes foram, portanto, os valores limites considerados. O seu cálculo pode ser expresso pela equação 4.5, que contém a velocidade ( $v$ ), o comprimento total (LOA) e a aceleração da gravidade ( $g$ ), resultando no número adimensional de *Froude* ( $Fr$ ).

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{(LOA * g)}} \quad (4.5)$$

O coeficiente de bloco pode ser estimado inicialmente como uma função do número de *Froude*, como apresentado na equação 4.6:

$$C_b = -4,22 + 27,8 * \sqrt{Fr} - 39,1 * Fr + 46,6 * Fr^3 \quad (4.6)$$

As variáveis livres, que representam os valores definidos pelo próprio *software*, em busca da função objetivo e respeitando os limites estipulados pela tabela 8, podem ser observados na tabela 9, com os valores já determinados.

Tabela 9: Variáveis modificadas automaticamente pelo *software*.

Variáveis livres		
Comprimento (LOA)	[m]	59,08
Pontal (D)	[m]	7,50
Boca (B)	[m]	14,77
Relação T/D	[ - ]	0,63
Velocidade máxima	[kts]	9,00
	[m/s]	4,63

Para se obter estes valores foi definido como função objetivo o custo do navio, porém esse custo é apenas representativo, visto que seria o custo de construção de um novo navio, no entanto a primeira versão do navio será obtida a partir da conversão de uma embarcação já existente. O cálculo pode ser baseado neste custo de referência, pois a aquisição e conversão de um navio possui uma relação de proporcionalidade com a construção de uma nova embarcação, ou seja, quanto menor for o preço do navio construído, menor será o preço de um navio convertido, baseado no mesmo projeto. Portanto o resultado desejado pela função objetivo é o valor mínimo do custo, que se encontra na tabela 10.

Tabela 10: Função objetivo

<b>Variáveis objetivo</b>		
Custo	[mi €]	20,24

A tabela 11, composta por valores dependentes das variáveis livres, foi obtida com a aplicação das fórmulas encontradas em regulamentos e literaturas de um projeto naval no otimizador do *Excel*, e contém, portanto, todos os parâmetros principais do navio.

Na tabela 11 é possível observar que os parâmetros com restrição respeitaram os valores limites e que tanto a capacidade de carga quanto o volume submerso são muito superiores aos necessários, visto que a capacidade de carga de 1609 ton é muito superior ao peso máximo de resíduos acumulados em 30 dias de 304 ton, enquanto o volume da embarcação de 3228 m<sup>3</sup> também apresenta um valor muito superior à necessidade de 1188 m<sup>3</sup> para o armazenamento de resíduos e combustíveis, indicando assim a existência de dimensão suficiente para abrigar mais sistemas, como possíveis baterias para armazenamento de energia ou locais para recepção de investidores e pesquisa laboratorial, assim como a possibilidade em termos de carga de se instalar equipamentos extremamente pesados como turbinas eólicas.

Tabela 11: Parâmetros do navio

Variáveis dependentes		
Aceleração da gravidade (g)	[m/s <sup>2</sup> ]	9.81
Massa volúmica da água do mar ( $\rho$ )	[kg/m <sup>3</sup> ]	1025.00
Comprimento entre perpendiculares (Lpp)	[m]	56.72
Número de Froude (Fr)	[-]	0.19
	[-]	0.06
Coeficiente de bloco (Cb)	[-]	0.78
Volume	[m <sup>3</sup> ]	3228.36
Deslocamento ( $\Delta$ )	[ton]	3309.07
Coeficiente de seção mestra (Cm)	[-]	0.99
Coeficiente prismático (Cp)	[-]	0.79
Coeficiente de linha d'água (Cwp)	[-]	0.86
Posição longitudinal do centro de flutuação em relação a meia nau (LCB)	[m]	1.07
Velocidade operacional	[kts]	3.00
	[m/s]	1.54
Calado (T)	[m]	4.72
Rácio pontal-boca (D/B)	[-]	0.51
Rácio comprimento-boca (LOA/B)	[-]	4.00
Área do convés	[m <sup>2</sup> ]	671.95
Borda livre	[m]	1.22
Calado máximo	[m]	6.28
Resistência máxima	[kN]	34.00
Força de posicionamento dinâmico	[kN]	27.84
Potência total	[kW]	723.66
Peso leve	[ton]	1559.07
Porte bruto	[ton]	1750.00
Capacidade de carga	[ton]	1616.77
Altura metacêntrica (GM)	[m]	1.00
Comprimento da superestrutura (Lsup)	[m]	11.82
Custo final	[mi €]	20.24

#### 4.3.4 CÁLCULO DA NECESSIDADE ENERGÉTICA

O cálculo da necessidade energética do navio pode ser dividido em três partes, a primeira é o cálculo da resistência hidrodinâmica de navegação, a segunda é referente às forças ambientais que o navio deve suportar sem apresentar demasiada oscilação e a terceira parte é a necessidade elétrica dos equipamentos a bordo.

A resistência hidrodinâmica também conhecida como resistência ao avanço é a força necessária para que o navio se mova na água a velocidade constante. Para satisfazer essa força é preciso fornecer ao menos a potência efetiva, que equivale ao produto entre a velocidade do navio e sua resistência.

A resistência ao avanço é, de forma simplificada, função de cinco parâmetros:

- Velocidade do navio (V);
- Comprimento submerso do navio (Lpp);

- Massa específica ( $\rho$ );
- Viscosidade cinemática ( $\nu$ );
- Aceleração da gravidade ( $g$ ).

$$R_T = f(V, L, \rho, \nu, g) \quad (4.7)$$

Essa resistência pode ser dividida em resistência de onda e resistência friccional, as quais dependem dos números de *Reynolds* e *Froude* da embarcação.

Existem diversas formas de se estimar este valor, sendo o mais famoso o método de *Holtrop and Mennen*, que se baseia na regressão estatística de testes de modelos e testes em ambiente real de navios, sendo essa base de dados é composta por um amplo número de embarcações. Outro método existente é o *Delft Series 98*, que foi o método aplicado neste trabalho, pois está embutido no *software Delftship*. Esse método também se trata de um modelo estatístico de série sistemática, desenvolvido a partir de modelos testados em laboratórios da universidade de *Delft*, nos Países Baixos. O programa citado foi usado para a criação do modelo 3D que representa o formato inicial do casco do navio.

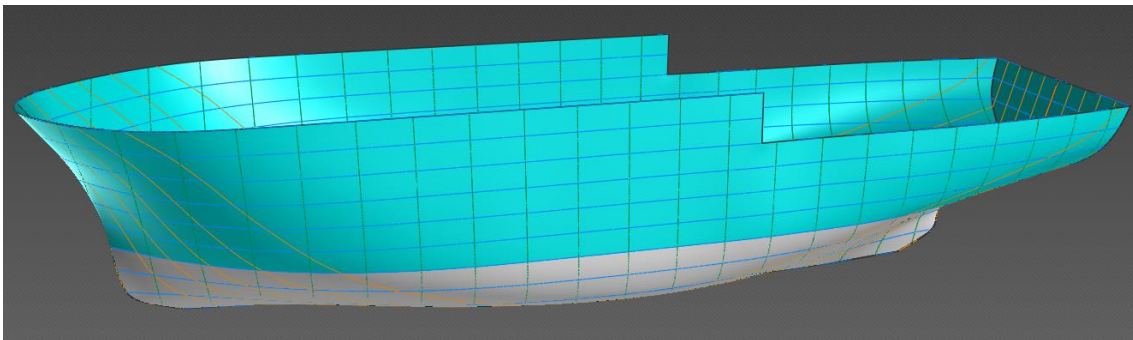


Figura 42: Modelo 3D do casco

A tabela 12 apresenta os valores de resistência obtidos pelo método citado para diferentes velocidades de navegação, sendo assim possível obter a resistência referente à velocidade de operação de 3 nós, assim como para a velocidade máxima de 9 nós.

Tabela 12: Resistências calculadas pelo método de *Delft***Delft Series ('98).**

Resistance according to Delft Series ('98)						
Speed	Speed	Froude number	Frictional resistance	Residual resistance	Total resistance	
(kn.)	(m/s)		kN	kN	kN	
0,00	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	
1,00	0,514	0,026	0,30	0,00	0,30	
2,00	1,029	0,052	1,08	0,00	1,08	
3,00	1,543	0,078	2,28	0,00	2,28	
4,00	2,058	0,104	3,89	0,00	3,89	
5,00	2,572	0,130	5,88	0,00	5,88	
6,00	3,087	0,156	8,25	0,00	8,25	
7,00	3,601	0,182	11,00	2,30	13,29	
8,00	4,116	0,208	14,10	7,53	21,63	
9,00	4,630	0,234	17,56	16,41	33,97	

Ao analisar os resultados é possível observar que a variação da velocidade é muito diferente da resistência, logo é muito importante quando se deseja reduzir o consumo de um navio, reduzir sua velocidade.

Tabela 13: Velocidade x Resistência (variação)

			Varição
<b>Velocidade [nós]</b>	3	9	200%
<b>Resistência [kN]</b>	2,28	33,97	1390%

Para se determinar a potência necessária para satisfazer essas resistências pode se utilizar a equação 4.8:

$$P_r = \frac{(V_s * R_T)}{\eta_p} * (1 + m_{sp}) \quad , \quad (4.8)$$

onde  $P_r$  é a potência necessária,  $V_s$  é a velocidade de navegação,  $R_T$  é a resistência ao avanço,  $\eta_p$  é a eficiência propulsiva e  $m_{sp}$  é uma margem de segurança de 10%, aplicada para garantir que o sistema não opere a carga máxima.

Esse cálculo é realizado para as duas velocidades consideradas e assim obtém-se:

Tabela 14: Força e potência necessárias para as velocidades definidas

<b>Velocidade máxima (9 nós)</b>		
Força necessária	[kN]	34,00
Margem de segurança	[-]	0,10
Potência necessária	[kW]	269,14
<b>Velocidade em operação de coleta (3 nós)</b>		
Força necessária	[kN]	2,16
Margem de segurança	[-]	0,10
Potência necessária	[kW]	5,68

A segunda parte do cálculo da necessidade energética, que trata das forças ambientais pode ser solucionada com base na referência [48], um regulamento com formulações a serem aplicadas para se obter a resultante das forças ambientais.

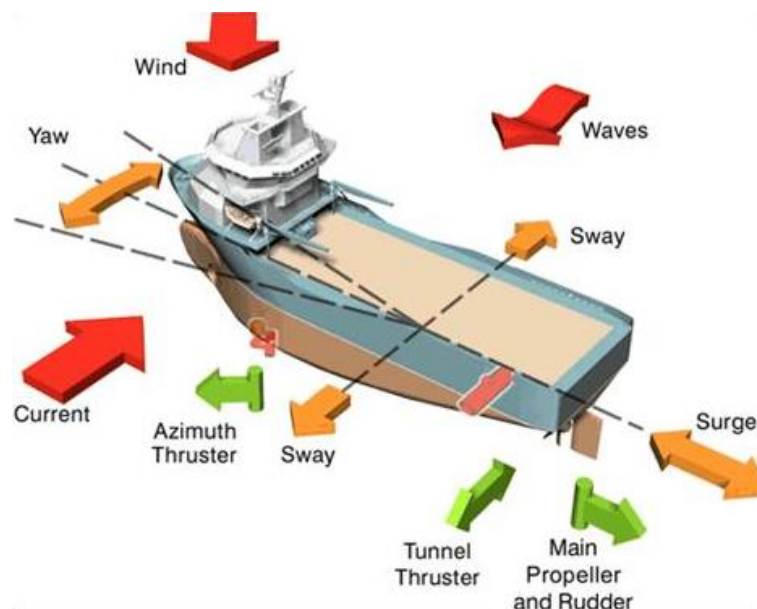


Figura 43: Sistema de posicionamento dinâmico e movimentos restringidos. Fonte: <https://www.portalmarítimo.com/2017/02/17/entenda-de-maneira-simples-como-funciona-um-sistema-de-posicionamento-dinamico/>

Para que o regulamento citado seja utilizado é preciso primeiramente obter informações de parâmetros ambientais específicos da região de operação. Esses parâmetros são a velocidade do vento, a altura de onda significativa e a velocidade da corrente oceânica. Portanto para se determinar a velocidade de corrente oceânica,  $V_c$ , utilizou-se a referência [49] que analisa os padrões de circulação no Mar Mediterrâneo. Para obter a altura significativa de onda,  $H_s$ , foi necessária a consulta da referência [50], que determina esse valor a partir de modelos numéricos. Quanto à velocidade do vento, foi utilizada a base de dados ERA5, onde se observou que, apesar

de a velocidade máxima do vento na região ser de aproximadamente 24 m/s, 95% das velocidades representadas no modelo de reanálise para um ano meteorológico típico são inferiores a 12 m/s, então este foi o valor considerado como velocidade máxima do vento na região. Este é, portanto, o valor limite de velocidade do vento em que a embarcação é capaz de operar com segurança. Para valores até 15 m/s é possível realizar a coleta dos resíduos. E em velocidades extremas (superiores a 20 m/s) ainda é possível navegar. No entanto o sistema de posicionamento dinâmico, em velocidades acima de 12 m/s, não é capaz de manter os movimentos dinâmicos do navio em valores aceitáveis para se realizar a conversão do lixo com segurança e precisão.

Tabela 15: Parâmetros ambientais no Mar Mediterrâneo

<b>Características ambientais da região</b>		
<b>Mar Mediterrâneo</b>		
Velocidade máxima do vento	[m/s]	12,00
Velocidade média do vento	[m/s]	6,00
Velocidade da corrente oceânica	[m/s]	0,10
Altura de onda significativa	[m]	0,82

Com esses dados e com as indicações do regulamento utilizado [48] é possível calcular três forças diferentes:

- Força do vento:

$$F_w = C_w * \sum(C_s * C_h * A_v) * V_w^2 \quad , \quad (4.9)$$

onde as variáveis e seus valores para o caso estudado se encontram na tabela 16:

Tabela 16: Parâmetros e definição da força do vento

$C_w$ : (coeficiente empírico de vento) =	0.62	$N*s^2/m^4$
$C_s$ (coeficiente de forma) =	1.00	
$C_h$ (coeficiente de altura) =	1.00	
$A_v$ (área vélica) =	263.13	m <sup>2</sup>
$V_w$ (velocidade do vento) =	12.00	m/s
<hr/>		
<b><math>F_w</math> (força do vento)</b>	<b>23.30</b>	<b>kN</b>
	<b>2.38</b>	<b>tonf</b>

Os coeficientes são obtidos no regulamento de estruturas *offshore* [48], como apresentado na figura 44:

Exposed Area	$C_s$
Cylindrical shapes	0.50
Hull (surface above waterline)	1.00
Deck house	1.00
Isolated structural shapes (cranes, channels, beams, angles)	1.50
Under deck areas (smooth surfaces)	1.00
Under deck areas (exposed beams and girders)	1.30
Rig derrick	1.25

Height of area centroid above water level		
Feet Over—Not Exceeding	Meters Over—Not Exceeding	$C_h$
0 — 50	0 — 15.3	1.00
50 — 100	15.3 — 30.5	1.10
100 — 150	30.5 — 46.0	1.20
150 — 200	46.0 — 61.0	1.30
200 — 250	61.0 — 76.0	1.37

$C_w = (0.615 \text{ Nsec}^2/\text{m}^4)$

Figura 44: Coeficientes referentes a força do vento. Fonte: API, A. P. (1987). API RP 2P, Recommended Practice for the Analysis of Spread Mooring System for Floating Drilling Units [48]

- Força de corrente:

$$F_{ay} = C_{ay} * S * V_c^2, \quad (4.10)$$

onde as variáveis e seus valores para o caso estudado se encontram na tabela 17:

Tabela 17: Parâmetros e definição da força de corrente

$C_{ay}$ (coeficiente empírico de corrente)	72.37	$\text{N*s}^2/\text{m}^4$
S (área da superfície molhada)	1240.38	$\text{m}^2$
$V_c$ (Velocidade de corrente)	0.10	m/s
<b><math>F_{ay}</math> (força de corrente)</b>	<b>0.90</b>	<b>kN</b>
	<b>0.09</b>	<b>tonf</b>

Segundo o regulamento utilizado como base [48], o coeficiente empírico de corrente é de  $72,37 \text{ N*s}^2/\text{m}^4$  e a área da superfície molhada é obtida através da equação 4.11.

$$S = L(2T + B) \sqrt{C_m(0,453 + 0,4425C_b - 0,2862C_m - \frac{0,003467*B}{T} + 0,3696C_{wp})} \quad (4.11)$$

- Força de onda:

$$F_{mdy} = F_{mdy\ ref} * \left(\frac{L}{L_{ref}}\right)^2, \quad (4.12)$$

onde as variáveis e seus valores para o caso estudado se encontram na tabela 18, e os dados de referência são fornecidos pela figura 45:

Tabela 18: Parâmetros e definição da força de onda

H <sub>s</sub> (Altura significativa de onda)	0.82	m	2.69	pés
L <sub>ref</sub> (Comprimento de	121.92	m	400.00	pés
L (Comprimento)	59.08	m	193.84	pés
H <sub>s ref</sub> (Altura significativa de	1.69	m	5.55	pés
F <sub>mdy ref</sub> (força de onda de referência)			3.48	Kips
			<b>0.82</b>	<b>Kips</b>
<b>F<sub>mdy</sub> (Força de onda)</b>			<b>3.64</b>	<b>kN</b>
			<b>0.37</b>	<b>tonf</b>

Para se obter o valor da altura significativa de onda de referência é necessário utilizar a equação 4.13:

$$H_{s\ ref} = H_s * \left(\frac{L_{ref}}{L}\right) \quad (4.13)$$

Após calculado esse valor de referência é utilizado um gráfico, com relações previamente calculadas e modeladas para uma embarcação de referência, como indicado em [48], para se obter a força de onda para o caso de referência.

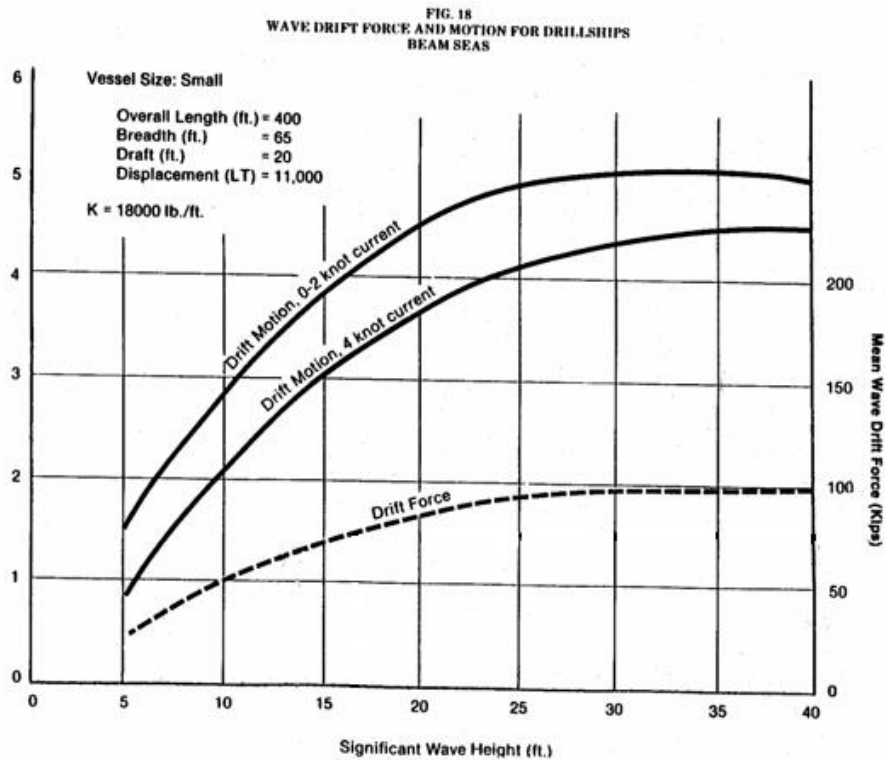


Figura 45: Gráfico da relação altura de onda e força de onda para uma embarcação de referência com 400 pés de comprimento. Fonte: API, A. P. (1987). API RP 2P, Recommended Practice for the Analysis of Spread Mooring System for Floating Drilling Units [48]

Ao juntarmos os valores obtidos para cada força, obtém-se que a força ambiental resultante é de 27,84 kN.

Tabela 19: Resultante das forças ambientais

Forças Ambientais		
Vento	23,30	kN
Corrente	0,90	kN
Onda	3,64	kN
<b>Total</b>	<b>27,84</b>	<b>kN</b>

O cálculo da potência nesse caso é diferente do realizado para propelir o navio, portanto para realizar a conversão da força obtida para a potência será usada uma informação disponibilizada pela Petrobras de que a correlação entre potência e empuxo para um *tunnel thruster* (impelidor instalado na proa do navio de modo a equilibrar as forças transversais e manter a embarcação com o mínimo de movimentos laterais e transversais) é de 80 kW/ton. Conseqüentemente a necessidade de potência, considerando uma margem de 10% é de 249,75 kW.

Tabela 20: Força e potência devido as forças ambientais

Força ambiental total	[kN]	27,84
Margem	[-]	0,10
Necessidade propulsiva	[kW]	249,75

O último passo é compilar os resultados energéticos obtidos relacionados à propulsão e adicionar demais equipamentos embarcados que necessitam de energia.

Para se realizar esta análise o método mais seguro seria definir uma lista contendo todos os equipamentos e as energias necessárias para seu funcionamento, de acordo com o informado pelos fabricantes. No entanto na fase preliminar de um projeto naval raramente é possível realizar este trabalho, sendo possível apenas realizar uma estimativa dos equipamentos e os referentes consumos energéticos. Para esta tarefa foi utilizada uma tabela desenvolvida pelo Doutor Alexandre Teixeira de Pinho Alho, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), e foram realizadas alterações para que os dados representem mais especificamente o navio projetado. Nesta tabela há uma classificação da demanda energética em função do tipo de operação, as classificações para este trabalho são:

- Navegação à máxima velocidade;
- Navegação em operação de coleta;
- Navio ancorado no porto.

A tabela é dividida em 13 grupos, sendo os 11 primeiros, equipamentos comuns em diversas embarcações, o grupo 12 contém os sistemas principais e específicos do navio projetado, isto é o sistema de conversão de lixo, o sistema de compressão de gás e a unidade de coleta. Todos os valores foram estimados pelas empresas parceiras ao projeto e serão reanalisados quando os sistemas estiverem operacionais. O último grupo refere-se aos equipamentos de propulsão e os impelidores frontais.

Devida à grande dimensão da tabela, apenas os dois últimos grupos e o resumo da tabela serão apresentados.

Tabela 21: Demanda energética do grupo 12, composto pelos equipamentos específicos

Group Nº 12		Preferential state	Number of installed units	Nominal power	Load factor	Power absorbed	At sea				Anchored at port			
Specific equipments							Navigation		Collecting operation		Number of operating units	Power absorbed	Number of operating units	Power absorbed
Description							Number of operating units	Power absorbed bed	Number of operating units	Power absorbed bed				
				kW		kW		kW		kW		kW		
	Waste-to-energy	-	1	70.0	1.00	70.0	1	70.0	1	70.0	0	0.0		
	Syngas compressor	-	2	60.0	1.00	60.0	1	60.0	1	60.0	0	0.0		
	Collecting unit	-	1	20.0	1.00	20.0	1	20.0	1	20.0	0	0.0		
TOTAL POWER ABSORBED							150.0		150.0		0.0			
SIMULTANEITY FACTOR							1.0		1.0		1.0			
TOTAL POWER TO CONSIDER							150.0		150.0		0.0			

Tabela 22: Demanda energética do grupo 13, composto pelos propulsores

Group Nº 13		Preferential state	Number of installed units	Nominal power	Load factor	Power absorbed	At sea				Anchored at port			
Propellers							Navigation		Collecting operation		Number of operating units	Power absorbed	Number of operating units	Power absorbed
Description							Number of operating units	Power absorbed bed	Number of operating units	Power absorbed bed				
				kW		kW		kW		kW		kW		
	Bow Thruster	-	2	124,9	0,90	112,4	0	0,0	2	224,8	0	0,0		
	Aziimuths (Maximum speed)	-	2	134,6	0,90	121,1	2	242,2	0	0,0	0	0,0		
	Propeller (Colecting speed)	-	1	5,7	0,90	5,1	0	0,0	1	5,1	0	0,0		
TOTAL POWER ABSORBED							242,2		229,9		0,0			
SIMULTANEITY FACTOR							1,0		1,0		1,0			
TOTAL POWER TO CONSIDER							242,2		229,9		0,0			

Tabela 23: Resumo do balanço energético

Summary				
Group	Energy demand summary	At sea		Anchored at port
		Navigation	Collecting operation	
1	Engine room (Continuous service)	56,5	56,5	23,2
2	Engine room (Intermittent service)	1,3	1,3	0,0
3	Engine room (Several equipments)	9,6	8,2	8,2
4	Air conditioning / ventilation / heating	13,1	12,3	8,6
5	Fridge and provisions (equipments)	2,5	2,5	2,5
6	Other machines/equipments	63,5	63,5	0,0
7	Kitchen	24,1	24,1	24,1
8	Laundry	3,3	3,3	0,0
9	Workshops	7,7	7,7	0,0
10	Lightning	32,0	32,0	32,0
11	Nautical and navigation auxiliary equipments	9,2	8,7	6,8
12	Specific equipments	150,0	150,0	0,0
13	Propellers	242,2	229,9	0,0
<b>Total</b>	<b>Sum of the energy demand for all groups</b>	<b>615,1</b>	<b>600,0</b>	<b>105,3</b>

A tabela 23 indica que o maior consumo energético ocorre quando é necessário navegar na velocidade máxima. O consumo elevado no caso da navegação em operação de coleta deve-se ao facto da consideração de que o navio deve manter ligados os propulsores frontais para restringir os movimentos e assim não afetar negativamente a unidade de conversão do lixo. Porém caso se verifique nos períodos de teste que é possível realizar a operação de conversão sem o uso dos propulsores, essa demanda energética reduziria de 600 kW para aproximadamente 375,2 kW, uma redução superior a 35% na necessidade de potência horária.

#### 4.4 AVALIAÇÃO DOS RECURSOS EÓLICO E SOLAR

A produção de energia principal do barco será através da utilização dos combustíveis biológicos resultantes do processo de conversão do lixo. Porém a ideia do trabalho é utilizar também a energia solar como fonte extra de energia e ainda existe a possibilidade de se adicionar elementos estruturais no casco, como asas laterais para proporcionar mais espaço e assim possibilitar o uso de elementos que produzam energia oriunda do vento.

Com esse intuito é necessário realizar os devidos estudos meteorológicos na região do Mar Mediterrâneo, a fim de avaliar os recursos existentes tanto solares quanto eólicos. Para esse estudo foi primeiramente determinado um ano típico meteorológico a partir de séries temporais pontuais e posteriormente foram utilizadas as ferramentas de reanálise MERRA-2 e ERA5 para possibilitar inclusive uma análise comparativa entre as ferramentas.

##### 4.4.1 DEFINIÇÃO DO ANO TÍPICO METEOROLÓGICO

Inicialmente foram obtidas séries temporais a partir da plataforma *online* SODA (*Solar Radiation Data*) [51], estas séries foram produzidas a partir do sistema de reanálise MERRA-2, porém com a adição da irradiação global horizontal, resultando em séries temporais referentes a cada ponto geográfico, contendo os seguintes parâmetros:

- Data;
- Tempo universal;
- Temperatura a 2 metros de altitude;
- Humidade relativa;
- Pressão ao nível do mar;
- Velocidade do vento a 10 metros de altitude;
- Direção do vento a 10 metros de altitude;
- Precipitação;
- Queda de neve;
- Profundidade de neve;

- Irradiação de onda curta (irradiação horizontal global)

As unidades de medida de todos os parâmetros encontram-se no sistema internacional e todos estes dados puderam ser recuperados em formato de arquivo CSV.

Foram coletados os dados referentes a 165 pontos, sendo parte deles numa região mais a sul no Mar Mediterrâneo e outra mais a norte do mesmo mar. O período extraído foi de 15 anos, a partir do ano 2000 até 2015, sendo a resolução espacial dos dados de 0,5° e o passo temporal de uma hora.



Figura 46: Pontos selecionados para a obtenção das séries temporais.

<b>Local de estudo: Norte do Mar Mediterrâneo</b>	<b>Local de estudo: Sul do Mar Mediterrâneo</b>
<b>Período:</b> 2000 : 2015	<b>Período:</b> 2000 : 2015
<b>Passo temporal:</b> 1 hour	<b>Passo temporal:</b> 1 hour
<b>Pontos:</b> 60	<b>Pontos:</b> 105
<b>Latitude:</b> 40.5 : 43	<b>Latitude:</b> 33 : 36
<b>Longitude:</b> 3.5 : 8	<b>Longitude:</b> 15 : 22
<b>Passo espacial:</b> 0.5°	<b>Passo espacial:</b> 0.5°

Figura 47: Resumo das séries temporais

Após obter os 165 arquivos foi possível iniciar uma análise utilizando *Jupyter Notebooks* e a linguagem *Python*. A tabela 24 apresenta as 15 primeiras linhas de dados obtidos em um dos arquivos CSV referidos.

Tabela 24: Seção inicial da tabela com a série temporal em um ponto geográfico.

	Date	UT time	Temperature	Relative Humidity	Pressure	Wind Speed	Wind Direction	Rainfall	Snowfall	Snow depth	Short-wave irradiation
0	2000-01-01	01:00	285.48	61.36	1025.78	4.42	274.13	0.000009	0.0	0.0	0.0000
1	2000-01-01	02:00	285.56	61.59	1025.64	4.49	272.67	0.000010	0.0	0.0	0.0000
2	2000-01-01	03:00	285.66	61.99	1025.59	4.53	274.12	0.000014	0.0	0.0	0.0000
3	2000-01-01	04:00	285.76	62.88	1025.44	4.70	280.87	0.000033	0.0	0.0	0.0000
4	2000-01-01	05:00	285.85	64.25	1025.42	4.81	291.43	0.000213	0.0	0.0	0.0000
5	2000-01-01	06:00	285.94	65.66	1025.73	4.79	305.51	0.001225	0.0	0.0	0.0000
6	2000-01-01	07:00	285.98	67.42	1026.14	4.83	321.37	0.001327	0.0	0.0	0.0000
7	2000-01-01	08:00	285.94	69.71	1026.42	4.98	336.60	0.003394	0.0	0.0	24.1609
8	2000-01-01	09:00	285.74	73.34	1026.96	5.30	351.13	0.057962	0.0	0.0	122.9623
9	2000-01-01	10:00	285.34	77.20	1027.67	5.66	2.63	0.049860	0.0	0.0	256.2497
10	2000-01-01	11:00	285.14	78.86	1028.02	5.72	9.43	0.023153	0.0	0.0	368.1997
11	2000-01-01	12:00	285.07	78.83	1027.65	5.54	11.39	0.009757	0.0	0.0	419.9748
12	2000-01-01	13:00	285.08	78.17	1027.17	5.31	11.15	0.003212	0.0	0.0	425.7499
13	2000-01-01	14:00	285.17	77.06	1026.95	5.08	11.05	0.001186	0.0	0.0	362.9249
14	2000-01-01	15:00	285.27	75.92	1026.91	4.73	12.30	0.000355	0.0	0.0	250.2499

A análise foi dividida inicialmente em região norte e sul e os arquivos para cada região foram unidos e transformados em um único arquivo com todos os pontos estudados para cada região. Uma limpeza dos dados foi necessária, pois neste estudo os parâmetros mais importantes são apenas a velocidade do vento e a irradiação de onda curta, então todas as demais colunas foram eliminadas.

O ano meteorológico típico (TMY) é apenas um ano que represente de forma mais próxima os comportamentos apresentados num prazo de tempo maior, como neste caso de 15 anos. Foi necessário obter um ano típico neste trabalho para que pudessem ser utilizadas as ferramentas de reanálise, pois as plataformas nas quais os sistemas de reanálise estão inseridos apresentam um valor limite em relação ao tamanho da base de dados que é possível transferir, obrigando que seja realizada uma redução temporal e de parâmetros da amostra. Outro fator que também influencia a necessidade da definição de um ano meteorológico típico é o tempo necessário para se recuperar os dados dos sistemas de reanálise: quanto maior o volume de dados, maior será o tempo necessário para obtê-los.

Para se definir o ano típico meteorológico foram utilizadas como base indicações feitas pelo NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) [52]. Os cálculos utilizados foram baseados no *Sandia Method*, com algumas modificações para tornar o modelo mais apropriado para o presente trabalho. No método original são estipulados valores de pesos para cada parâmetro, como indica a tabela 25:

Tabela 25: Valores de peso em dois métodos base. Fonte: Wilcox S.; Marion W. (2008) User's Manual for TMY3 Data Sets [52].

**Table 2-1. Weighting values for FS statistics**

Index	Sandia Method	NSRDB TMY
Max Dry Bulb Temp	1/24	1/20
Min Dry Bulb Temp	1/24	1/20
Mean Dry Bulb Temp	2/24	2/20
Max Dew Point Temp	1/24	1/20
Min Dew Point Temp	1/24	1/20
Mean Dew Point Temp	2/24	2/20
Max Wind Velocity	2/24	1/20
Mean Wind Velocity	2/24	1/20
Global Radiation	12/24	5/20
Direct Radiation	Not Used	5/20

Nesta tese foram considerados por motivo de simplificação apenas três parâmetros, a irradiação global e as velocidades média e máxima do vento.

O método *Sandia* é uma abordagem empírica que seleciona meses individuais de diferentes anos do período registrado. Por exemplo, no caso presente em que o período é de 15 anos, todos os meses de janeiro são analisados e aquele considerado mais típico é selecionado para ser incluído no TMY. Esse processo é repetido para todos os meses do ano, e em seguida os 12 meses típicos selecionados são concatenados para formar um ano completo.

Para a seleção do mês típico, o método original usa nove índices diários, porém no caso deste trabalho serão usados apenas três.

- Irradiação solar;
- Velocidade máxima do vento;
- Velocidade média do vento.

A seleção final do mês inclui a média mensal e a persistência dos padrões climáticos. O processo realizado inclui o cálculo das funções de distribuição cumulativa (CDFs) referente a cada índice para cada mês, tanto para os anos individuais quanto para o longo prazo. É feita então uma comparação entre os CDFs obtidos para o longo prazo e para os meses de anos individuais, utilizando as seguintes estatísticas de Finkelstein-Schafer (FS) [53] para cada índice.

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n}, \quad (4.14)$$

onde  $\delta_i$  é a diferença absoluta entre a CDF de longo prazo e a CDF do mês candidato em  $x_i$  (valor de cada índice individual, ou seja, valor do eixo x para gerar a curva de CDF) e  $n$  é o número de leituras diárias em um mês.

Para exemplificar o processo realizado, a figura 48 apresenta gráficos referentes a três meses distintos. Para cada mês é possível ver a curva que representa o CDF de longo prazo e mais duas curvas, uma tracejada vermelha que representa o pior ano possível para ser incluído no TMY e uma curva pontilhada verde que representa o ano escolhido para ser incluído no TMY, para esse determinado mês. Cada um dos três gráficos presentes na figura apresenta apenas um índice, sendo eles respetivamente o comportamento médio da irradiação horizontal global diária, o comportamento da velocidade média do vento e o comportamento da velocidade máxima do vento, respetivamente.

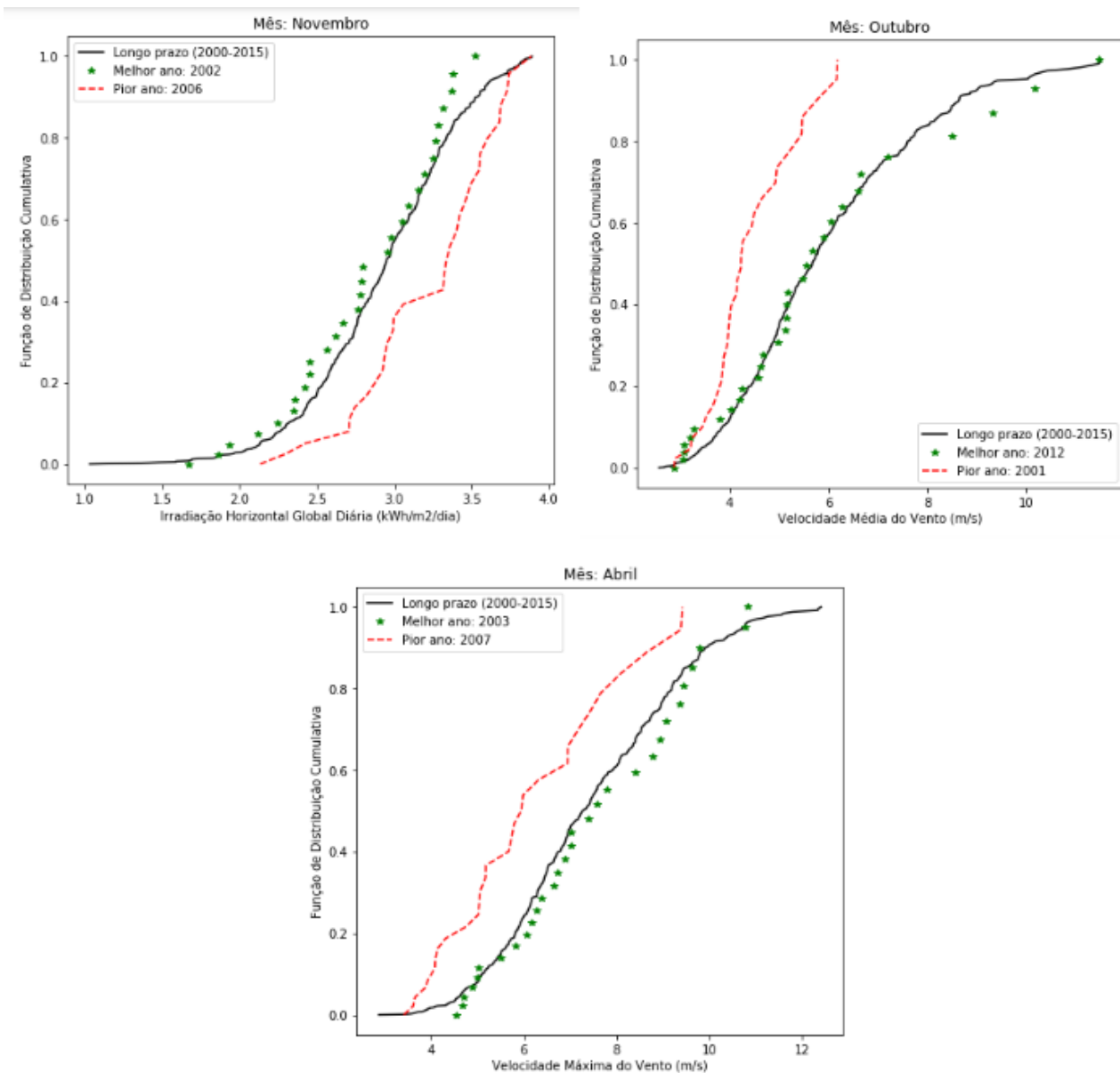


Figura 48: Gráficos comparativos de CDF para diferentes meses e parâmetros

Com os CDFs calculados e com a aplicação da fórmula de *Finkelstein-Schafer*, foi possível aplicar os pesos definidos para cada índice e com isso gerar os resultados exemplificados nos gráficos presentes na figura 48. É necessário ressaltar que, como o resultado se baseia numa média ponderada entre os índices, pode haver casos em que o comportamento de determinado parâmetro, como a velocidade média do vento no ano selecionado para o TMY num mês específico, não representa o melhor comportamento. No entanto, se considerarmos a figura global com a união de forma ponderada dos três índices escolhidos o melhor comportamento é de facto representado.

Para se observar a influência dos pesos dados a cada parâmetro, foram definidos três TMY distintos, onde se variaram as proporções dos parâmetros, resultando nos valores indicados na tabela 26.

Tabela 26: TMY em função dos pesos de cada parâmetro

		Comparação do Ano Meteorológico Típico em Função do peso dos parâmetros		
		Cenário utilizado	Priorização do recurso eólico	Priorização do recurso solar
Pesos	Irradiação solar	0,5	0,3	0,7
	Velocidade média do vento	0,25	0,35	0,15
	Velocidade máxima do vento	0,25	0,35	0,15
Meses	Janeiro	2014	2014	2014
	Fevereiro	2001	2001	2006
	Março	2010	2010	2010
	Abril	2003	2003	2003
	Maio	2014	2005	2014
	Junho	2004	2004	2009
	Julho	2005	2005	2005
	Agosto	2013	2013	2007
	Setembro	2000	2010	2000
	Outubro	2012	2012	2012
	Novembro	2002	2002	2002
	Dezembro	2007	2007	2007

Observa-se que ao aumentar o peso do recurso eólico apenas dois meses foram alterados, enquanto três meses sofreram alterações ao aumentar o peso do recurso solar.

Por apresentar um maior equilíbrio em relação às proporções de cada parâmetro, neste trabalho considerou-se como ano típico meteorológico, o resultado obtido com os seguintes pesos:

- Irradiação solar: peso = 0,5;
- Velocidade média do vento: peso = 0,25;
- Velocidade máxima do vento: peso = 0,25.

Com o resultado obtido foi possível criar um novo arquivo CSV contendo apenas os dados médios de todos os pontos geográficos analisados num ano, que representa o ano típico meteorológico, de acordo com os anos indicados na primeira coluna de valores da tabela 26.

#### 4.4.2 ANÁLISE DE ENERGIA SOLAR

Após obter o ano meteorológico típico (TMY) foi possível iniciar os estudos referentes ao recurso solar.

Foram realizadas análises do recurso solar através de três ferramentas distintas:

- Base de dados a partir de série temporal, referente ao TMY;
- Dados meteorológicos referentes ao TMY obtidos pelo sistema de reanálise MERRA-2;
- Dados meteorológicos referentes ao TMY obtidos pelo sistema de reanálise ERA5.

Todas as três análises foram realizadas utilizando *Python* e os códigos estão presentes nos anexos. A primeira análise apresentada refere-se aos dados presentes nas séries temporais.

A figura 49 apresenta um gráfico de barras, composto pela irradiação global horizontal total de cada mês, formando a representação do período anual estudado.

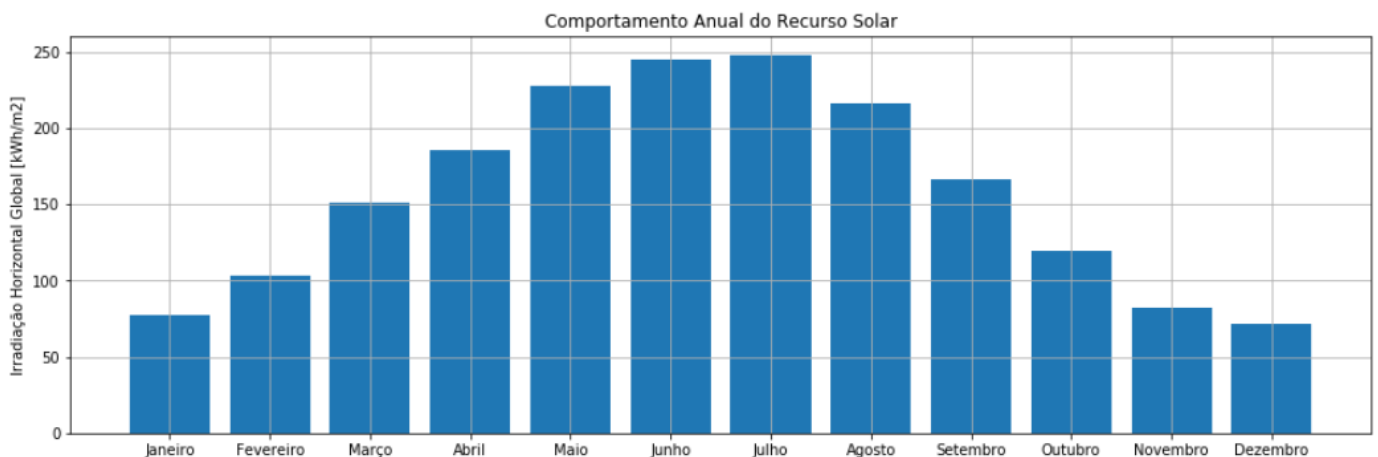


Figura 49: Histograma da irradiação global anual, baseada nas séries temporais

A partir deste arquivo compilado de séries temporais num TMY foi obtido que a irradiação anual sobre o mar mediterrâneo é de 1894,03 kWh/m<sup>2</sup>, a irradiação média mensal é de 157,84 kWh/m<sup>2</sup> e os valores em termos mensais, mínimo e máximo ocorrem respectivamente nos meses de dezembro e julho, com valores de

71,38kWh/m<sup>2</sup> e 247,91kWh/m<sup>2</sup>. O valor de irradiação total para cada mês encontra-se na tabela 27:

Tabela 27: GHI mensal baseado na análise de séries temporais simples

	Month	GHI [kwh/m2]
0	1	77.054392
1	2	103.114173
2	3	151.583404
3	4	185.661520
4	5	227.885678
5	6	244.577563
6	7	247.910974
7	8	216.661828
8	9	166.216291
9	10	119.366333
10	11	82.621090
11	12	71.374527

Antes de se iniciar a análise utilizando as duas outras ferramentas apontadas, foi definido um sistema base para servir de referência como produção de energia solar.

Foi definido que anteriormente que a área de convés do barco é de aproximadamente 672 m<sup>2</sup> e pretende-se instalar um armazém em seu convés principal para abrigar a unidade de conversão do lixo que possuirá uma dimensão de 100 m<sup>2</sup>. Além disso, não é aconselhável que 100% da área de convés seja coberta, pois assim restringiríamos a capacidade de instalação de equipamentos como turbinas eólicas. Considerando que a largura da embarcação é um pouco superior a 14 metros, decidiu-se manter dois metros de espaço livre próximo a cada borda e limitar a área superior do armazém em 400 m<sup>2</sup>, sendo 10 metros de largura.

Para certificar-se de que os painéis fotovoltaicos sobre o armazém não sofreriam demasiadas perdas por sombreamento, foi feita uma análise trigonométrica, com o intuito de se obter a distância mínima que deve haver entre a superestrutura e o início do armazém. Foram considerados dois casos, ambos com a embarcação virada a sul. No primeiro caso a localização considerada é no norte do Mar Mediterrâneo próximo à cidade de Veneza na Itália, e no segundo a localização utilizada foi no sul do Mar Mediterrâneo, próximo à cidade de Alexandria no Egito.

Para cada localização citada, foi obtida através do *software PVSyst*, uma carta solar, em que foram coletados os dados de altura solar e azimute, para o dia mais curto do

ano no hemisfério norte (22 de dezembro). Os horários selecionados representam a maior parcela do recurso solar nestas duas condições, sendo entre 9h e 15h na região norte do Mar Mediterrâneo e 8h e 16h na região sul do Mar Mediterrâneo, como apresentado nas figuras 50 e 51, respetivamente.

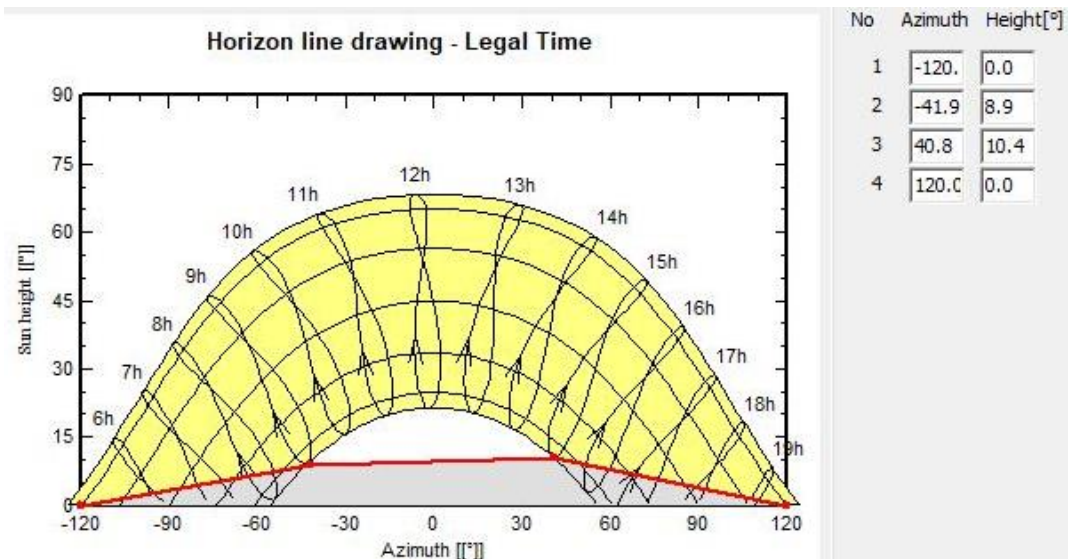


Figura 50: Carta Solar em um ponto no norte do Mar Mediterrâneo.

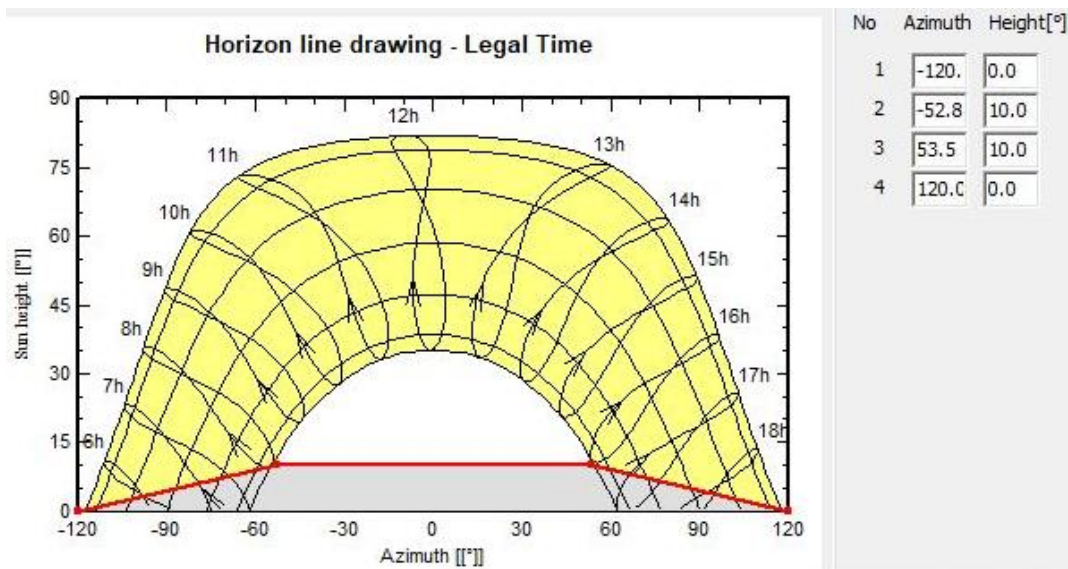


Figura 51: Carta Solar em um ponto no sul do Mar Mediterrâneo

Possuindo os ângulos de altura e de azimute, foram realizadas duas relações trigonométricas, primeiramente usando apenas a diferença de altura entre a superestrutura e o armazém, e a altura solar, como esquematizado na figura 52.

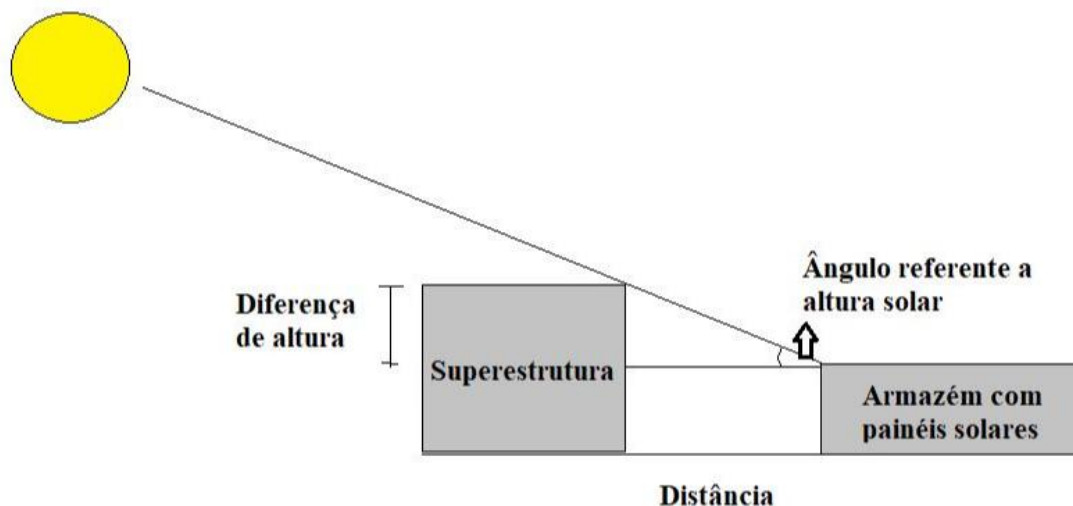


Figura 52: Esquema trigonométrico para cálculo do sombreamento.

A distância obtida nesta relação trigonométrica possui uma inclinação em relação à direção sul, tal inclinação é indicada pelo ângulo de azimute. Ao relacionar o azimute com a distância já obtida, pode-se calcular a distância mínima efetiva entre a superestrutura e o armazém. Os resultados estão apresentados na tabela 28.

Tabela 28: Cálculo de distância em função do sombreamento.

<b>Altura da superestrutura</b>			6	m	
<b>Comprimento livre do convés</b>			47,26	m	
<b>Altura de instalação dos painéis</b>			4,5	m	
<b>Região sul do Mar Mediterrâneo</b>			<b>Região norte do Mar Mediterrâneo</b>		
<b>Horário</b>	<b>8 horas</b>		<b>Horário</b>	<b>9 horas</b>	
<b>Altura solar</b>	10	graus	<b>Altura solar</b>	8,9	graus
<b>Distância com inclinação</b>	8,51	m	<b>Distância com inclinação</b>	9,58	m
<b>Azimuth solar</b>	52,8	graus	<b>Azimuth solar</b>	41,9	graus
<b>Distância longitudinal</b>	6,78	m	<b>Distância longitudinal</b>	6,40	m
<b>Horário</b>	<b>16 horas</b>		<b>Horário</b>	<b>15 horas</b>	
<b>Altura solar</b>	10	graus	<b>Altura solar</b>	10,4	graus
<b>Distância com inclinação</b>	8,51	m	<b>Distância com inclinação</b>	8,17	m
<b>Azimuth solar</b>	53,5	graus	<b>Azimuth solar</b>	40,8	graus
<b>Distância longitudinal</b>	6,84	m	<b>Distância longitudinal</b>	5,34	m

Portanto, considerando que o comprimento livre do convés é de 47,26 m e maior distância obtida é de 6,84 m, é aceitável a utilização de um armazém com 40 m de comprimento.

Com essa área e com a seleção de um painel fotovoltaico de referência [54] fornecido pela *Canadian Solar*, com 144 células e alta eficiência de 360 W, com as características apresentadas na figura 53, foi possível obter a quantidade de painéis a serem instalados, a eficiência e o pico de capacidade do sistema.

**ELECTRICAL DATA | STC\***

CS3U	345P	350P	355P	360P
Nominal Max. Power (Pmax)	345 W	350 W	355 W	360 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	39.0 V	39.2 V	39.4 V	39.6 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.86 A	8.94 A	9.02 A	9.10 A
Open Circuit Voltage (Voc)	46.4 V	46.6 V	46.8 V	47.0 V
Short Circuit Current (Isc)	9.43 A	9.51 A	9.59 A	9.67 A
Module Efficiency	17.39%	17.64%	17.89%	18.15%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C			
Max. System Voltage	1000 V (IEC / UL) or 1500 V (IEC / UL)			
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC 61730)			
Max. Series Fuse Rating	30 A			
Application Classification	Class A			
Power Tolerance	0 ~ + 5 W			

\* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m<sup>2</sup>, spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

**MECHANICAL DATA**

Specification	Data
Cell Type	Poly-crystalline, 156.75 × 78.38 mm
Cell Arrangement	144 [2 × (12 × 6)]
Dimensions	2000 × 992 × 40 mm (78.7 × 39.1 × 1.57 in)
Weight	22.6 kg (49.8 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame	Anodized aluminium alloy, crossbar enhanced
J-Box	IP68, 3 diodes
Cable	4.0 mm <sup>2</sup> & 12 AWG
Cable Length	1670 mm (65.7 in)
Connector	T4 (IEC / UL)
Per Pallet	27 pieces
Per Container (40' HQ)	594 pieces

Figura 53: Características do painel fotovoltaico considerado. Fonte: <https://www.canadiansolar.com/solarPanels/detail/29> [54]

O número de painéis que podem ser instalados acima do armazém é de 201 painéis, fornecendo 72,36 kWp de potência, esses painéis serão dispostos completamente horizontais, pois o barco não permanecerá na mesma posição então fixar uma inclinação para o painel não trará vantagens ao sistema.

Para o cálculo da energia produzida por este sistema foi utilizada uma equação simplificada definida em [55].

$$E_{ps} = \frac{GHI * \eta_{ps}}{Sf} * A_{ps} \quad , \quad (4.15)$$

onde  $E_{ps}$  é a energia produzida pelos painéis,  $GHI$  é a irradiação no local,  $\eta_{ps}$  é a eficiência do painel solar,  $A_{ps}$  é a área disponível para os painéis e  $Sf$  é o fator de espaçamento (fator que relaciona a área total ocupada pelos painéis e a área conjunta de cada painel), que neste caso é igual a 1, pois os painéis estão completamente na horizontal e ocupam integralmente o espaço disponível a eles.

É preciso considerar ainda uma margem, denominada de *Performance Ratio* (PR), um coeficiente usado para avaliar a qualidade da instalação fotovoltaica. Este fornece a performance da instalação independentemente da orientação ou inclinação dos painéis, considerando as diversas perdas presentes no sistema. Um valor de referência para este índice é de 0,75 [56].

Com isso a energia gerada pelo sistema durante o ano inteiro é de 103,13 MWh e a energia produzida em cada mês pode ser observada na figura 54.

Janeiro: 4.196 MWh/mês  
Fevereiro: 5.615 MWh/mês  
Março: 8.254 MWh/mês  
Abril: 10.109 MWh/mês  
Maio: 12.408 MWh/mês  
Junho: 13.317 MWh/mês  
Julho: 13.499 MWh/mês  
Agosto: 11.797 MWh/mês  
Setembro: 9.050 MWh/mês  
Outubro: 6.499 MWh/mês  
Novembro: 4.499 MWh/mês  
Dezembro: 3.886 MWh/mês

Figura 54: Produção energética mensal do sistema fotovoltaico, baseado nas séries temporais simples.

De acordo com a base de dados gerada a partir das séries temporais, em média esse sistema é capaz de produzir 11,77 kW de potência a cada hora, no entanto é preciso reconhecer que a produção de energia solar só ocorrerá em horários específicos do dia, portanto no período da noite não ocorrerá produção de energia e em horários de pico durante a tarde a produção será muito superior ao valor médio de 11,77 kW. A diferença na produção também ocorre em função das estações do ano.

Para exemplificar a produção de energia em um período diário e também relacionando um dia de verão e inverno, foi gerado o gráfico apresentado na figura 55:

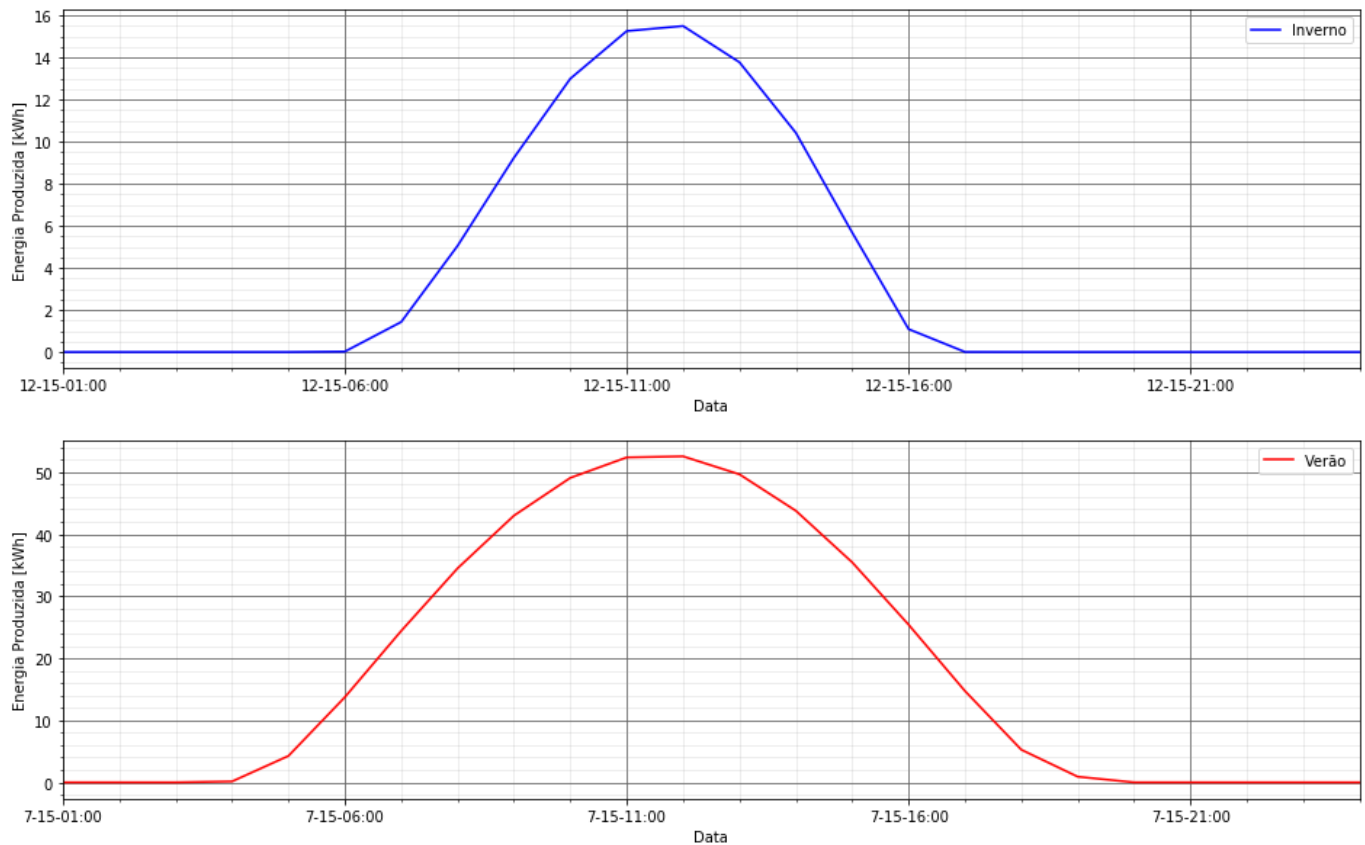


Figura 55: Gráficos em um dia de inverno e verão respectivamente, representando a energia solar produzida.

A segunda e a terceira análise realizada foram a respeito do mesmo recurso, porém, utilizando os sistemas de reanálise MERRA-2 e ERA5, respectivamente.

A primeira tarefa realizada nesta análise foi obter dados meteorológicos a partir do sistema MERRA-2 da NASA, para isso foi requisitado um acesso à plataforma online [57], onde foi acedeu-se a um *dataset* denominado de:

“MERRA-2 *tavg1\_2d\_rad\_Nx: 2d,1-Hourly,Time-Averaged,Single-level,Assimilation,Radiation Diagnostics V5.12.4*”

Foi feito um *subset* desta base de dados onde foram selecionados apenas o conjunto de meses e anos que compõem o TMY previamente definido, a dimensão espacial global e as variáveis principais selecionadas foram o fluxo de irradiação de ondas curtas na superfície (SWGDN) e o fluxo de irradiação de ondas curtas na superfície assumindo um céu limpo (SWGDNCLR). Outras variáveis foram coletadas, no entanto não foram analisadas.

Devido ao facto de os meses a serem guardados serem de anos diferentes, foi necessário realizar o procedimento de *download* de forma individual para cada mês e, além disso, no momento da recuperação dos dados a partir da base de dados cada dia do mês é transferido separadamente, exigindo que através do *Python* e utilizando uma

biblioteca desta linguagem específica para tratar dados de grandes dimensões chamada *xarray*, fossem concatenados todos os arquivos formando um único ano.

Em seguida foi necessário transferir os arquivos equivalentes, porém da reanálise ERA5. Nesse caso foi preciso usar a plataforma da *Copernicus* [58] e utilizar um *API* (*Application Programming Interface*) para se ter acesso aos dados desejados. Para fazer a requisição através do API foi necessário instalar uma biblioteca de *Python* denominada *cdsapi* e então fazer o pedido dos dados através de um código em *Python*, o qual foi responsável por reduzir os dados requisitados através de um *loop* criado para respeitar as condições de ano e mês do TMY anteriormente definido. Os parâmetros principais requisitados foram a velocidade horizontal do vento a 10 m e os dados solares equivalentes aos obtidos na reanálise MERRA-2.

A transferência deste sistema foi feita automaticamente, porém dividida em 12 arquivos, onde cada arquivo representa um mês do ano. O código utilizado encontra-se em anexo.

A figura 56 apresenta um resumo do arquivo concatenado obtido a partir do sistema ERA5:

```
<xarray.Dataset>
Dimensions:      (latitude: 721, longitude: 1440, time: 8760)
Coordinates:
  * latitude      (latitude) float32 90.0 89.75 89.5 89.25 ... -89.5 -89.75 -90.0
  * longitude     (longitude) float32 0.0 0.25 0.5 0.75 ... 359.25 359.5 359.75
  * time         (time) datetime64[ns] 2014-01-01 ... 2007-12-31T23:00:00
Data variables:
  u100           (time, latitude, longitude) float32 dask.array<chunksiz=(744, 721, 1440), meta=np.ndarray>
  v100           (time, latitude, longitude) float32 dask.array<chunksiz=(744, 721, 1440), meta=np.ndarray>
  u10n           (time, latitude, longitude) float32 dask.array<chunksiz=(744, 721, 1440), meta=np.ndarray>
  u10            (time, latitude, longitude) float32 dask.array<chunksiz=(744, 721, 1440), meta=np.ndarray>
  v10n           (time, latitude, longitude) float32 dask.array<chunksiz=(744, 721, 1440), meta=np.ndarray>
  v10            (time, latitude, longitude) float32 dask.array<chunksiz=(744, 721, 1440), meta=np.ndarray>
  lsm            (time, latitude, longitude) float32 dask.array<chunksiz=(744, 721, 1440), meta=np.ndarray>
  msdwsurf      (time, latitude, longitude) float32 dask.array<chunksiz=(744, 721, 1440), meta=np.ndarray>
  msdwsurfcs    (time, latitude, longitude) float32 dask.array<chunksiz=(744, 721, 1440), meta=np.ndarray>
  ssrdc         (time, latitude, longitude) float32 dask.array<chunksiz=(744, 721, 1440), meta=np.ndarray>
  ssrd          (time, latitude, longitude) float32 dask.array<chunksiz=(744, 721, 1440), meta=np.ndarray>
Attributes:
  Conventions:   CF-1.6
  history:       2019-10-15 21:05:43 GMT by grib_to_netcdf-2.10.0: /opt/ecmw...
```

Figura 56: Base de dados ERA5 referente ao TMY.

Com os arquivos necessários obtidos, foi possível realizar manipulações dos dados e utilizar a ferramenta de programação para se analisar o recurso solar em toda a região do Mar Mediterrâneo. Foi inclusive necessário adicionar uma nova coordenada de tempo, equivalente a coordenada de tempo original, porém com um ano de referência (1900), para que as escalas temporais dos dados estivessem dentro de um mesmo ano cronológico.

De forma semelhante ao que foi feito no caso da análise utilizando séries temporais simples, foi gerado um gráfico que representa a irradiação solar em termos anuais, porém, com quatro curvas distintas representando os resultados referentes ao sistema ERA5 e MERRA-2, incluindo também os dados para o caso de céu limpo.

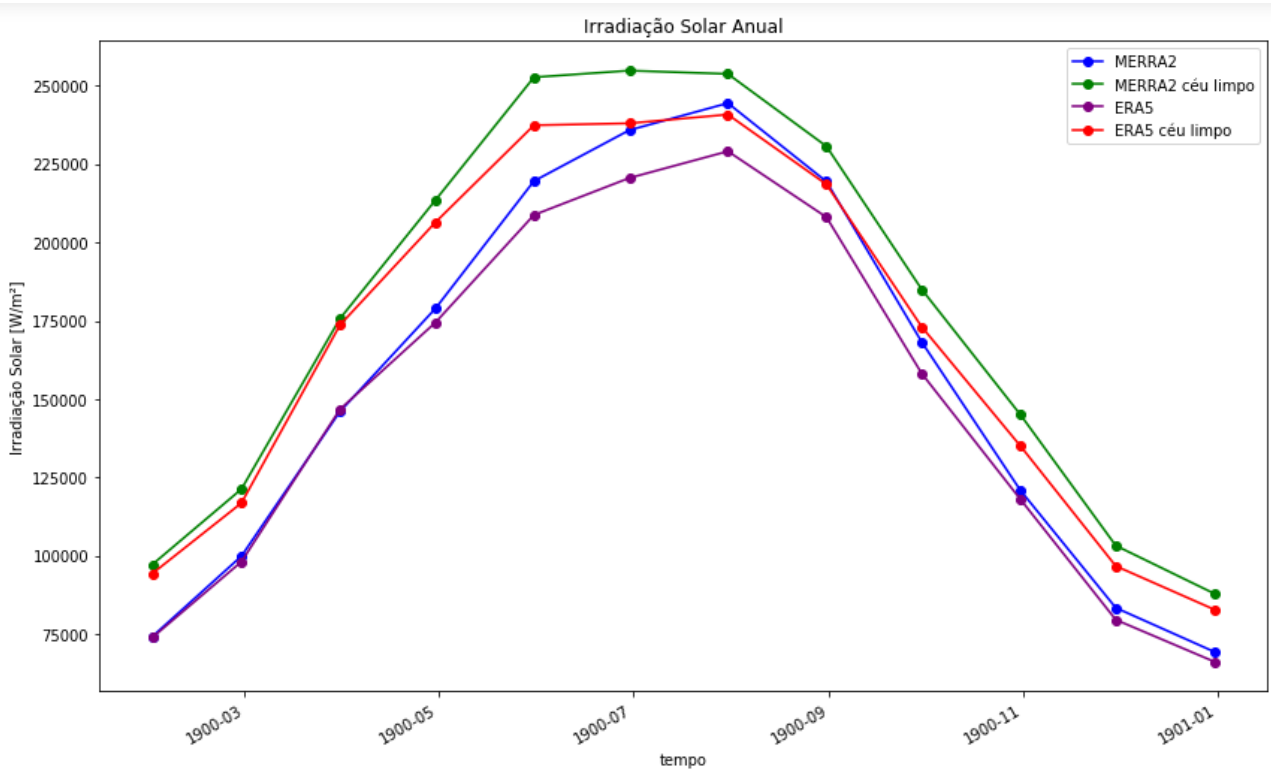


Figura 57: Gráfico anual comparativo de quatro bases de dados de reanálise

Como seria de esperar, pode ser observado na figura 57, que a irradiação solar é superior nas análises com céu limpo. Se compararmos apenas os dados referentes aos dois sistemas de reanálise sem considerarmos a condição de céu limpo, conclui-se que os valores para as duas bases de dados apresentam diferenças de resultados significativas nos meses de maior produção energética (meses de verão) e os resultados se assemelham nos demais meses.

Desconsiderando os casos de céu limpo, a irradiação anual para o sistema MERRA-2 é de 1860,10 kWh/m<sup>2</sup> e para o ERA5 é 1781,58 kWh/m<sup>2</sup>. A irradiação média mensal obtida pelo MERRA-2 e ERA5 é respectivamente, 155,01 kWh/m<sup>2</sup> e 148,47 kWh/m<sup>2</sup>.

Na figura 58 é possível visualizar a variação da irradiação em função da variação da latitude, onde se verifica que em latitudes mais próximas do equador o potencial energético é maior. Para efeitos demonstrativos a curva refere-se apenas ao resultado obtido pelo sistema ERA5 sem céu limpo.

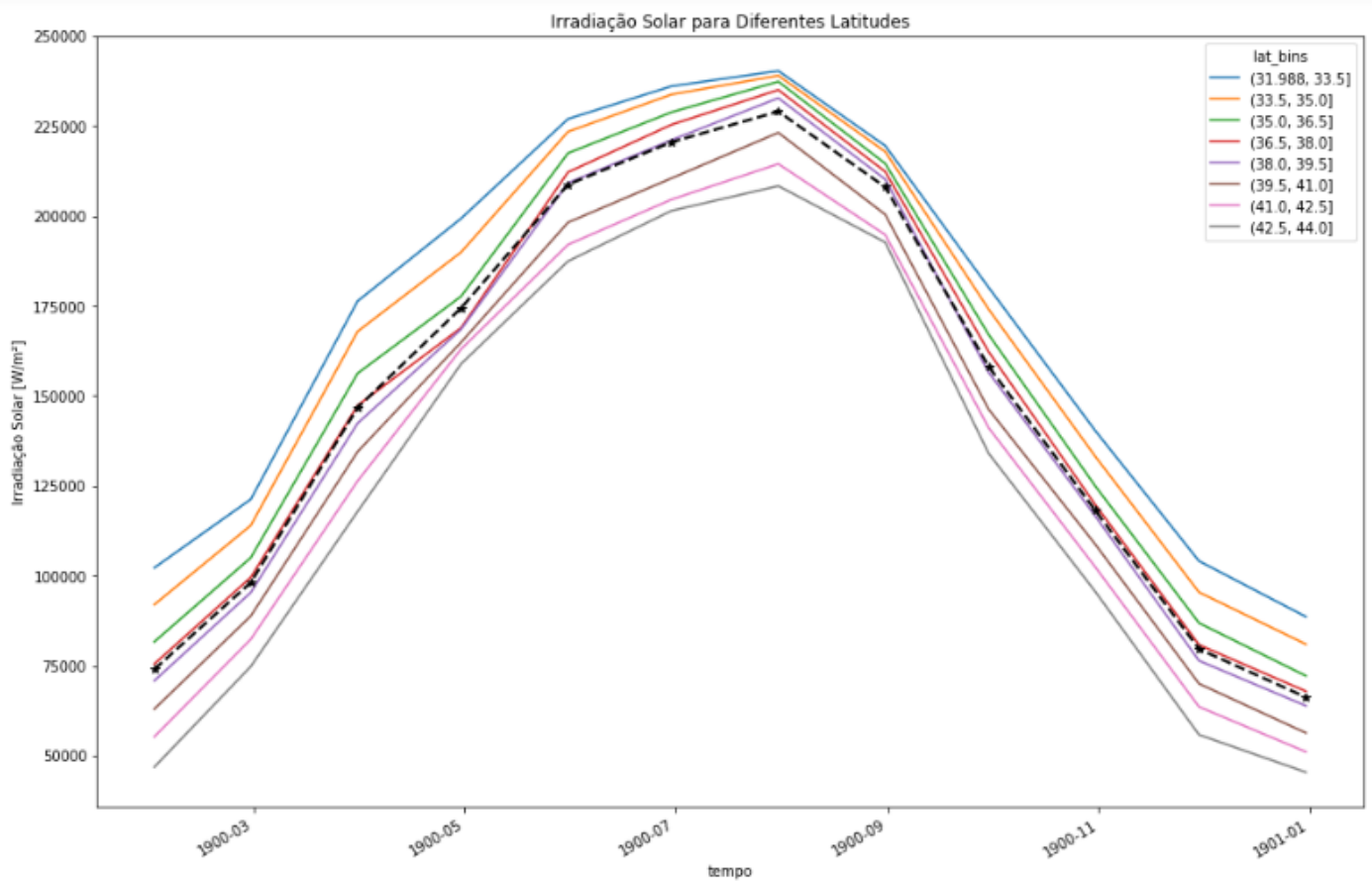


Figura 58: Variação da irradiação anual em função da latitude

Utilizando novamente a equação 4.15 e o índice PR, foi possível determinar a energia gerada para cada ferramenta de reanálise. A base de dados MERRA-2 fornece uma energia anual de 101,28 MWh e a ERA5 fornece 97,01 MWh.

Os valores mensais de produção de energia podem ser consultados na figura 59.

MERRA2 database:	ERA5 database:
Janeiro: 4.043 MWh/mês	Janeiro: 4.026 MWh/mês
Fevereiro: 5.439 MWh/mês	Fevereiro: 5.342 MWh/mês
Março: 7.952 MWh/mês	Março: 7.990 MWh/mês
Abril: 9.740 MWh/mês	Abril: 9.497 MWh/mês
Maior: 11.955 MWh/mês	Maior: 11.366 MWh/mês
Junho: 12.839 MWh/mês	Junho: 12.009 MWh/mês
Julho: 13.309 MWh/mês	Julho: 12.473 MWh/mês
Agosto: 11.946 MWh/mês	Agosto: 11.328 MWh/mês
Setembro: 9.156 MWh/mês	Setembro: 8.610 MWh/mês
Outubro: 6.583 MWh/mês	Outubro: 6.427 MWh/mês
Novembro: 4.542 MWh/mês	Novembro: 4.334 MWh/mês
Dezembro: 3.777 MWh/mês	Dezembro: 3.606 MWh/mês

Figura 59: Produção mensal de energia por fontes solares.

A energia média produzida é de 11,56 kWh de acordo com os dados da MERRA-2 e 11,07 kWh de acordo com a ERA5.

Um resumo dos resultados obtidos na análise do recurso solar encontra-se nas tabelas 29 e 30.

Tabela 29: Comparativo do recurso solar

Recurso Solar					
	Série temporal	MERRA-2	ERA-5	Diferença (Série temporal/MERRA)	Diferença (Série temporal/ERA)
Irradiação anual [kWh/m <sup>2</sup> ]	1894,03	1860,10	1781,58	1,79%	5,94%
Irradiação média mensal [kWh/m <sup>2</sup> ]	157,84	155,01	148,47		
Energia anual gerada [MWh]	103,13	101,28	97,01		
Energia média gerada por hora [kW]	11,77	11,56	11,07		

Tabela 30: Comparativo mensal da energia produzida por fontes solares

Energia solar produzida em cada mês [MWh]					
	Série temporal	MERRA-2	ERA-5	Diferença (Série temporal/MERRA)	Diferença (Série temporal/ERA)
Janeiro	4,20	4,04	4,03	3,65%	4,05%
Fevereiro	5,62	5,44	5,34	3,13%	4,86%
Março	8,25	7,95	7,99	3,66%	3,20%
Abril	10,11	9,74	9,50	3,65%	6,05%
Maior	12,41	11,96	11,37	3,65%	8,40%
Junho	13,32	12,84	12,01	3,59%	9,82%
Julho	13,50	13,31	12,47	1,41%	7,60%
Agosto	11,80	11,95	11,33	1,26%	3,98%
Setembro	9,05	9,16	8,61	1,17%	4,86%
Outubro	6,50	6,58	6,43	1,29%	1,11%
Novembro	4,50	4,54	4,33	0,96%	3,67%
Dezembro	3,89	3,78	3,61	2,80%	7,21%

#### 4.4.3 ANÁLISE DE ENERGIA EÓLICA

O procedimento que será apresentado nesta seção é muito semelhante ao realizado na seção anterior, portanto explicações referentes à obtenção dos dados não serão explicitadas, apenas os cálculos referentes especificamente ao recurso eólico.

Diferentemente do que foi feito no tópico anterior, para o recurso eólico as bases de dados usadas serão apenas as obtidas através da série temporal e do sistema de reanálise ERA5. Isso se deve ao facto de que, a baixas altitudes a velocidade do vento é altamente influenciada pelo relevo local, e o projeto proposto precisa de informações relativas apenas à região marítima do Mediterrâneo, visto que o motivo da análise é estudar a possibilidade do aproveitamento do recurso num barco, o que também limita a altura na qual a energia do vento será explorada, altura esta que foi considerada em torno de 10 metros.

Para obter resultados que representem com precisão o local alvo do projeto, deve-se excluir a área terrestre presente no Mediterrâneo e considerar apenas a velocidade do vento na região marítima, tal separação não foi possível na reanálise MERRA-2, pois na base de dados selecionada, não foi realizada a transferência da variável, denominada de FROCEAN, a qual era responsável por separar a amostra em pontos terrestres e marítimos, portanto os valores obtidos para velocidades de vento são demasiadamente reduzidos por considerarem os dados terrestres. A base de dados obtida utilizando ERA5, por sua vez, apresenta uma variável denominada *land-sea mask*, responsável por representar as regiões marítimas como zero e as terrestres com o valor um. As séries temporais foram obtidas a partir de diversos pontos geográficos, sendo todos localizados no mar, portanto os seus resultados, assim como os da reanálise ERA5 são compatíveis com o comportamento real no mar, da velocidade do vento.

A figura 60 apresenta graficamente os dados referentes ao parâmetro *land-sea mask* da base de dados ERA5, na região do Mar Mediterrâneo.

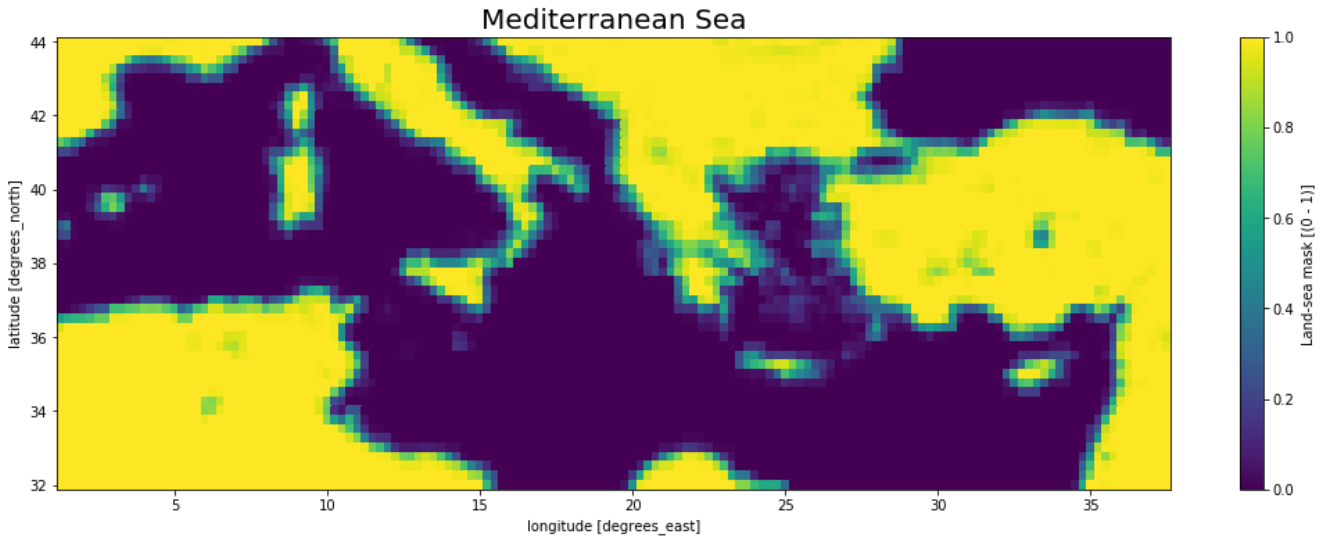


Figura 60: Vista superior parcial da região Mediterrânea.

Para o estudo utilizando a reanálise ERA5, primeiramente foi realizada uma redução da amostra, antes global, para apenas a região do Mar Mediterrâneo, posteriormente foram obtidos valores médios de velocidade em função das dimensões físicas (latitude e longitude) apenas para os pontos contidos na região marítima. Este comportamento anual médio na região do Mar Mediterrâneo foi, então, utilizado como base para os cálculos desta seção.

Também foram obtidas as curvas de distribuição Weibull para as velocidades do vento. Essa distribuição é representada pela equação 4.16:

$$\phi(v) = \frac{k}{c} * \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} * e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}, \quad (4.16)$$

onde  $\phi(v)$  é a função densidade de probabilidade,  $k$  é o parâmetro de forma,  $c$  é o parâmetro de escala e  $v$  é a velocidade do vento.

Existem diversos métodos para obter os parâmetros  $k$  e  $c$ . Neste trabalho foi utilizado o método *Energy Pattern Factor* (EPF), que pode ser representado pela equação 4.17:

$$E_{pf} = \frac{\langle v^3 \rangle}{\langle v \rangle^3}, \quad (4.17)$$

onde  $\langle v \rangle$  é a velocidade média do vento e  $\langle v^3 \rangle$  é a velocidade cúbica média do vento.

Esta equação pode ser relacionada com o parâmetro de forma ( $k$ ) como indicado na equação 4.18:

$$\frac{\langle v^3 \rangle}{\langle v \rangle^3} = \frac{\Gamma(1+3/k)}{\Gamma^3(1+1/k)}, \quad (4.18)$$

Onde  $\Gamma$  representa uma função gamma.

É possível manipular esta equação e obter a equação 4.19 para assim definir o parâmetro de forma (k).

$$k \cong 1 + \frac{3.69}{E_{pf}^2} \quad (4.19)$$

O parâmetro de escala (c) pode ser obtido através da equação 4.20:

$$c = \frac{\langle v \rangle}{\Gamma(1+1/k)} \quad (4.20)$$

Com estas equações foi possível obter os parâmetros citados, para as velocidades do vento na base de dados ERA5 e também para o caso das séries temporais. Portanto os parâmetros de forma (k) e de escala (c) para o sistema de reanálise ERA5 são, respectivamente, 3,59 e 6,52 m/s. Para o caso da análise por séries temporais simples o parâmetro de forma é igual a 2,88 e o parâmetro de escala é igual a 6,65 m/s.

Um gráfico de frequência de ocorrências foi criado utilizando as séries temporais simples e ERA5. Eles podem ser observados respectivamente nas figuras 61 e 62, juntamente com as curvas de distribuição Weibull:

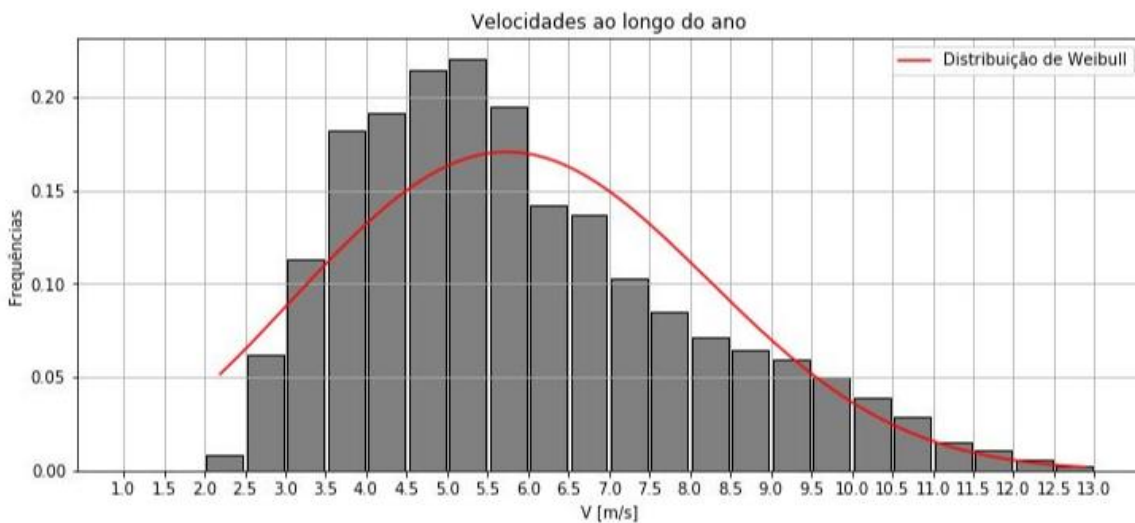


Figura 61: Frequência de ocorrência das velocidades de vento retirada da base de dados de séries temporais.

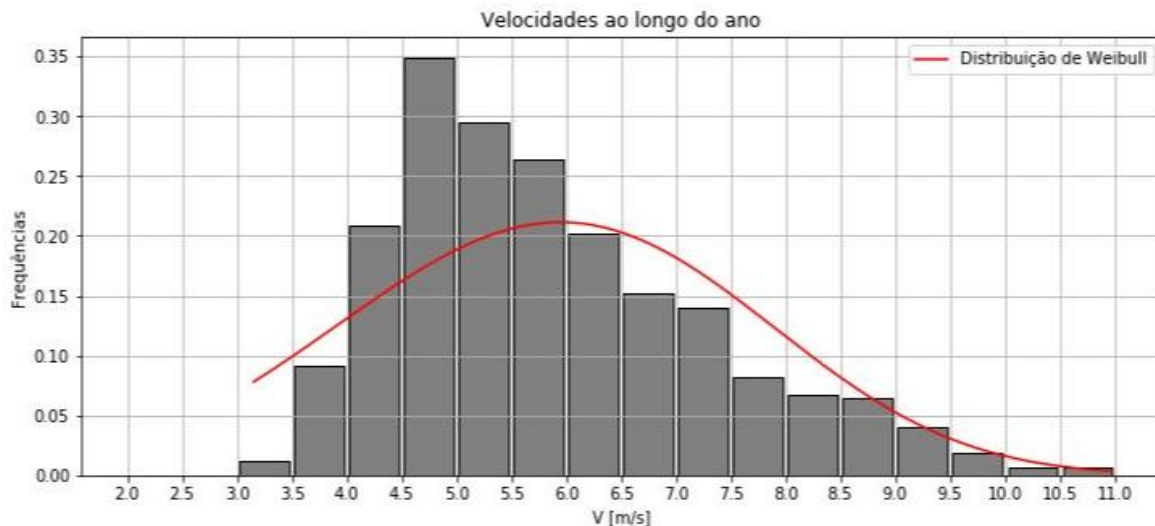


Figura 62: Frequência de ocorrência das velocidades de vento retirada da base de dados ERA5

Pode se notar que a distribuição de Weibull obtida com os parâmetros calculados pelo método EPF, representa melhor as frequências referentes às séries temporais simples do que as obtidas pelo sistema ERA5.

Ao analisar ambos os gráficos, é possível observar também, que a base de dados ERA5 não apresenta ocorrência para valores abaixo de 3 m/s e o número de ocorrências em velocidades superiores a 10 m/s também é mais reduzido do que no gráfico gerado pelas séries temporais. Outra diferença observada é a maior frequência de velocidades contidas na faixa de 4 a 6 m/s, ou seja, o segundo gráfico apresenta resultados mais concentrados nesta faixa mediana de velocidade, enquanto o primeiro apresenta uma maior amplitude de velocidade.

Para se obter a distribuição de velocidades, utilizando o sistema ERA5, foi preciso primeiramente reduzir a amostra da região total do Mar Mediterrâneo, para apenas um comportamento anual médio, devido a limitações em termos de memória computacional. No entanto, para obtenção da velocidade máxima e de determinados valores de percentil, pode-se utilizar todas as velocidades presentes nesta base de dados para a região do Mar Mediterrâneo. Com isso, os resultados da análise baseados no sistema ERA5 apresentam um valor de velocidade máxima 23,77 m/s, porém 98% das ocorrências são inferiores a velocidades de 13,13 m/s. Portanto se excluirmos os resultados extremos que representam apenas 2% da amostra resultante em ERA5, o valor máximo da velocidade do vento de 13,13 m/s obtido neste método é muito semelhante ao valor de velocidade máxima encontrada pela análise de séries temporais de 12,89 m/s.

A figura 63 apresenta uma comparação gráfica das funções de distribuição cumulativa (CDF) para ambos os casos de comportamento anual médio da velocidade no Mar Mediterrâneo.

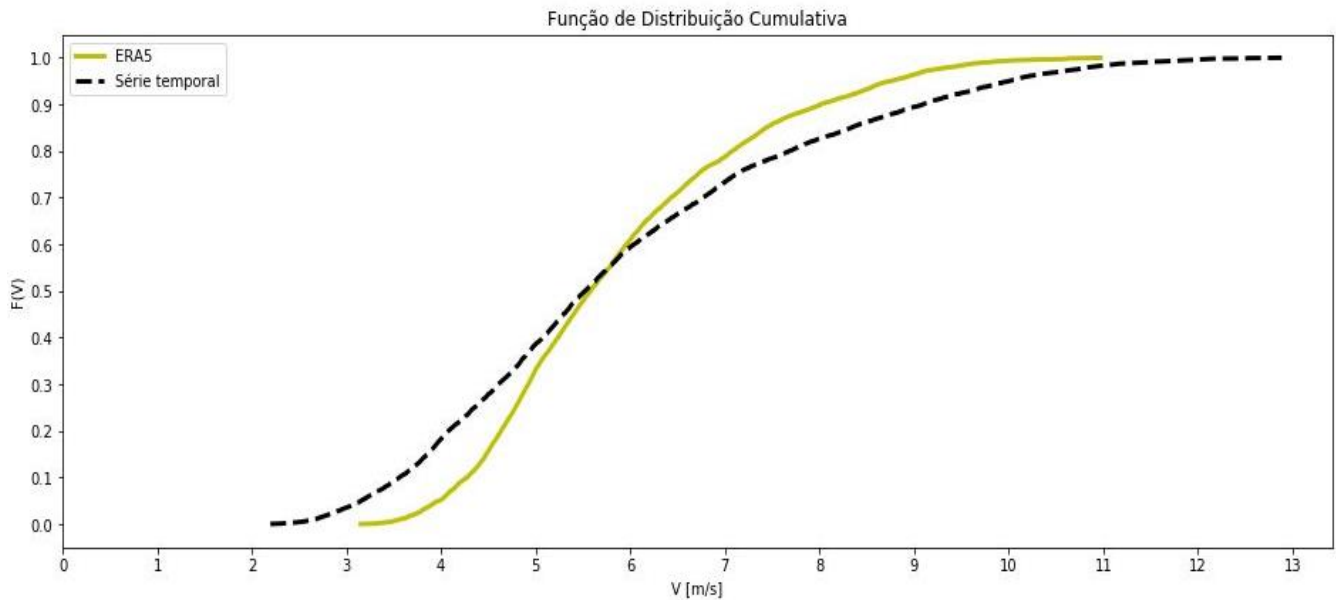


Figura 63: Função de distribuição cumulativa (CDF)

A velocidade média do vento sobre o Mar Mediterrâneo de acordo com o ERA5 é de 5,87 m/s e o mesmo parâmetro obtido pelas séries temporais é de 5,93 m/s.

A variabilidade do vento ao longo do ano pode ser observada na figura 64.

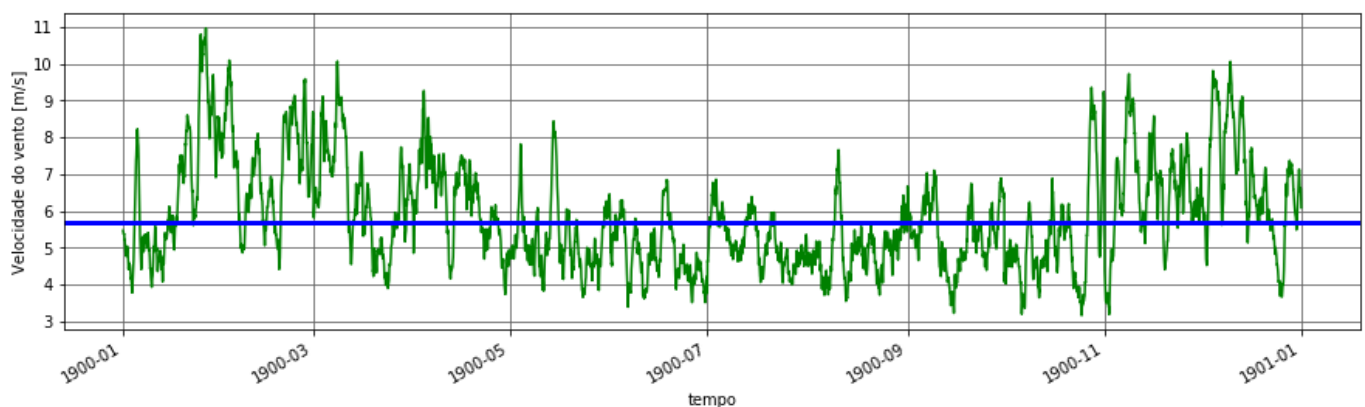


Figura 64: Gráfico representativo da variabilidade do recurso eólico ao longo do ano típico meteorológico, baseado no ERA5.

Foram também gerados dois gráficos utilizando a base de dados ERA5, para se observar o comportamento do vento no período de inverno e verão, presentes na figura 65.

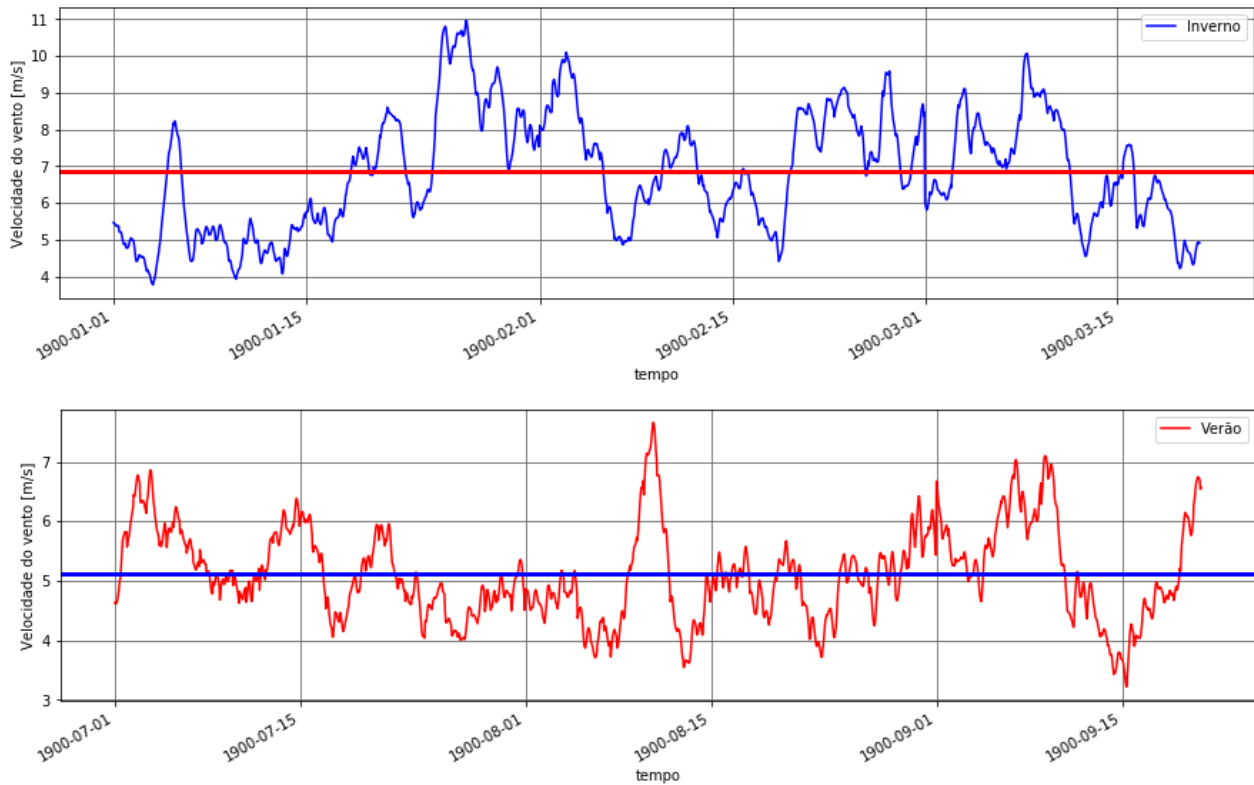


Figura 65: Gráficos representando a variabilidade do recurso eólico no inverno e verão respectivamente, baseados no ERA5.

É possível observar que tanto a velocidade média quanto as velocidades máximas são inferiores no período de verão.

Utilizando os dados da reanálise ERA5 também é possível criar mapas de cor para observar a velocidade média do vento numa parte da região mediterrânea, para cada uma das estações do ano, sendo o primeiro gráfico da figura 66 representante da estação de inverno, o segundo (1ª coluna, 2ª linha) representa a primavera, o terceiro (2ª coluna, 1ª linha) representa o verão e o último é referente ao outono. É possível observar que a velocidade do vento a altitudes de 10 metros em regiões terrestres é mínima, e aumenta consideravelmente na região marítima. Também se observa novamente que o período de inverno apresenta as maiores velocidades médias de vento, o verão apresenta as menores velocidades e as estações de primavera e outono apresentam resultados intermédios.

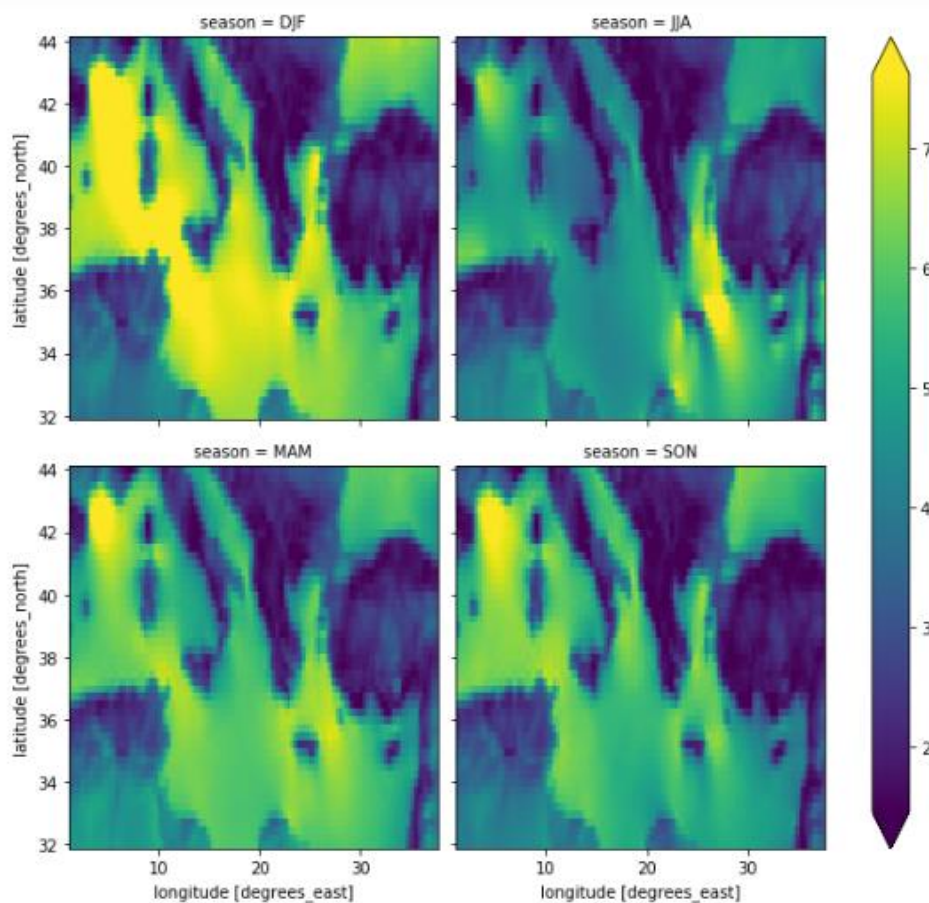


Figura 66: Velocidades médias de vento para cada estação do ano, obtidas pelo sistema ERA5.

A figura 67, gerada a partir do resultado obtido na análise das séries de dados, reforça o comportamento sazonal do recurso eólico, através da visualização da velocidade média mensal ao longo do ano.

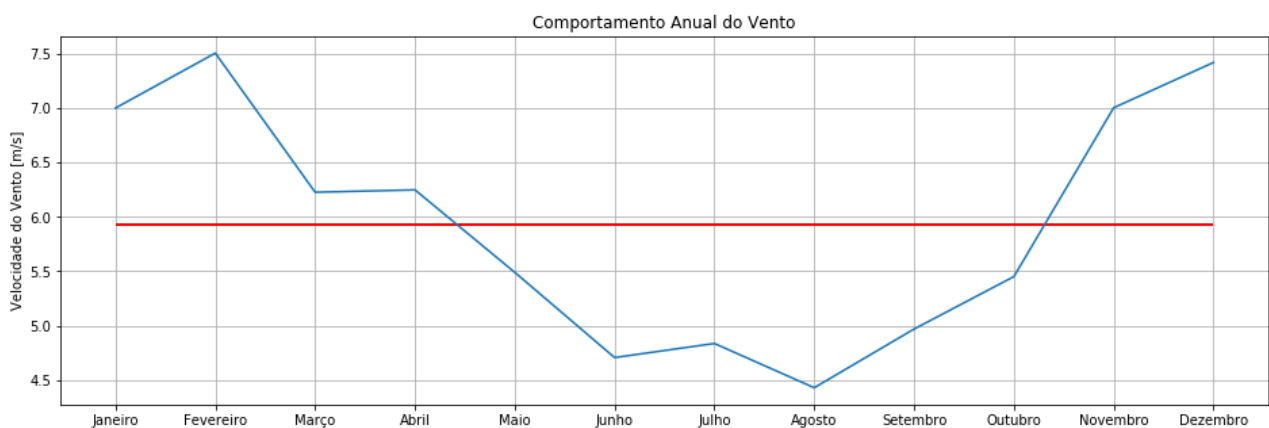


Figura 67: Velocidade média mensal do vento, a partir das séries temporais.

Além de se analisar o recurso eólico diretamente, realizou-se um procedimento semelhante ao que ocorreu no estudo solar, portanto foi considerada a possibilidade de se utilizar duas turbinas eólicas ou duas *oceanwings* (velas rígidas apresentadas anteriormente).

A turbina eólica usada como referência foi a AEOLOS-V 5kW [59], suas características encontram-se figura 69.



Figura 68: Turbina de referência. Fonte: <https://www.windturbinestar.com/5kwv-v-aeolos-wind-turbine.html> [59]

### Specification

Generator Type:	Three Phase Permanent Magnet
Rotor Height:	5.3m (17.38 ft)
Rotor Width:	4.2m (13.77 ft)
Turbine Weight:	385kg (848.8 lbs)
Blades Material:	Fiber Glass
Blade Quantity:	3 pcs
Working Temperature:	-30 °C to 60 °C
Design Lifetime:	20 years
Working Humidity:	≤95%
Protection Class:	Ip55

### Performance

Rated Power:	5000 W
Max Output Power:	7000 W
Cut In Wind Speed:	2.5m/s (5.6 mph)
Rated Wind Speed:	10m/s (22.3 mph)
Survival Wind Speed:	55m/s (122.65 mph)
Generator Efficiency:	96%
Noise Level:	< 45 dB(A)
Warranty:	5 year

Figura 69: Características da turbina de referência. Fonte: <https://www.windturbinestar.com/5kwv-v-aeolos-wind-turbine.html> [59]

Com os dados fornecidos pelo fabricante através da representação gráfica da curva de potência, foi possível desenhar uma curva e realizar uma regressão polinomial, para representar de forma precisa a curva de potência da turbina de referência.

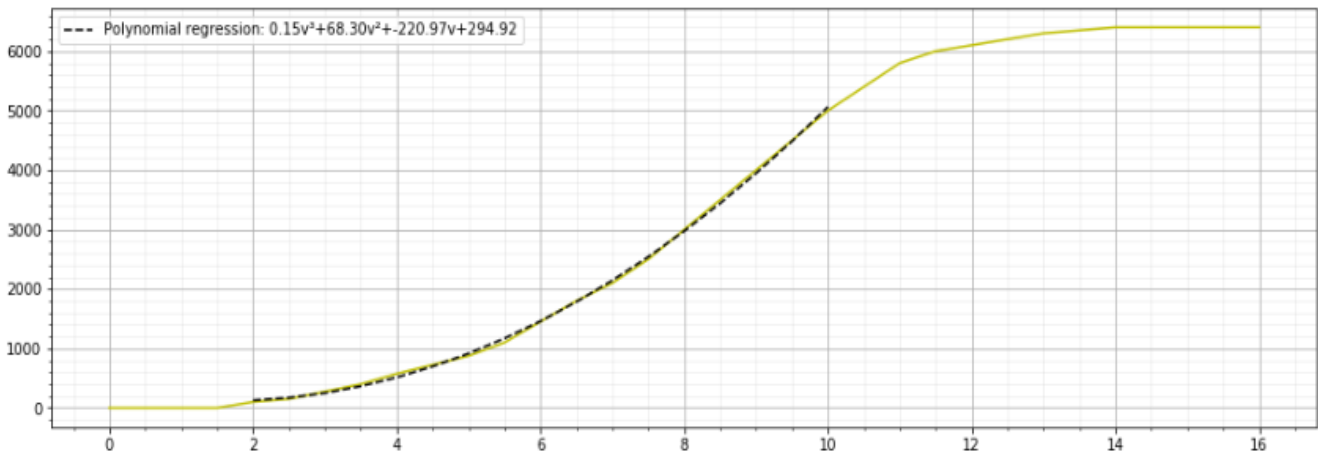


Figura 70: Curva de potência aproximada para a turbina de referência

Com essa curva e as velocidades do vento presentes nas bases de dados foi possível calcular a produção energética anual, a potência média do sistema eólico e o fator de capacidade. Para a base de dados de séries temporais esses valores são, respectivamente, 14,62 MWh; 1668,53 W/h e 33,37%. Para a base de dados ERA5 os valores, seguindo a mesma ordem são, 13,38 MWh; 1526,85 W/h e 30,54%.

Também foi possível obter a energia produzida ao longo de um ano, assim como a quantidade de energia média produzida a cada hora, utilizando a aproximação de Weibull. As diferenças nos resultados obtidos, usando uma distribuição de Weibull e através dos valores presentes nas bases de dados foram de 2,59% e 4,01%, para as séries temporais e o ERA5, respectivamente.

Além disso, foi possível calcular a força de empuxo que seria gerada com o uso da *Oceanwing*, usando a equação 4.9 e os coeficientes da referência [48], da mesma forma que o cálculo da força eólica foi feito para a análise de forças ambientais anteriormente realizada. Como se sabe a partir das informações do navio *Energy Observer* que as *Oceanwings* possuem áreas velicas de 31,5 m<sup>2</sup>, o resultado de empuxo gerado por uma *Oceanwing* é de 3,22 kN para a análise com séries temporais e 3,34 kN considerando o uso da ERA5.

A tabela 31 apresenta um resumo dos resultados obtidos nesta seção. Os valores presentes na tabela, referentes ao empuxo ou a energia produzida, são os valores equivalentes, considerando o uso de duas turbinas eólicas ou duas *Oceanwings*.

Tabela 31: Resumo da análise do recurso eólico.

<b>Recurso Eólico</b>			
	Série temporal	ERA-5	Diferença (Série temporal/ERA)
Velocidade média do vento [m/s]	5.93	5.87	1.01%
Velocidade máxima do vento [m/s]	12.89	13.13	1.86%
Empuxo devido ao vento OCEANWINGS [kN]	6.44	6.68	3.76%
Energia produzida em um ano [MWh]	29.23	26.75	8.49%
Energia média produzida por hora [Wh]	3337.06	3053.69	8.49%
Fator de capacidade	33.37%	30.54%	8.49%
Energia produzida em um ano (Weibull) [MWh]	29.99	27.824	7.22%
Energia média produzida por hora (Weibull) [Wh]	3423.44	3176.24	7.22%

#### 4.5 INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS

Com os estudos meteorológicos do Mar Mediterrâneo finalizados é possível analisar as possíveis aplicações no barco a ser projetado.

A fonte de energia principal será o sistema de conversão de lixo, que é responsável por produzir dois tipos distintos de combustíveis biológicos o óleo de pirólise e o gás de síntese. Anteriormente foram calculadas as quantidades produzidas para cada combustível, sendo estes, portanto, de 146 kg/h e 79 kg/h, respectivamente.

Atualmente as opções existentes de motores que funcionam com combustíveis biológicos são muito limitadas, porém neste projeto como já são consideradas tecnologias em processo de desenvolvimento ou de pesquisa, foi considerada como alternativa a ser estudada para o problema do motor, o uso de um motor diesel de duplo combustível, convertido para funcionar com combustíveis biológicos.

Mahgoub et al. [60] realizou uma experiência para avaliar o uso de gás de síntese em motores diesel de duplo combustível, para isso ele usou um motor pequeno de aproximadamente 4 kW e testou três casos distintos: para cada caso ele usou em conjunto com o diesel um gás de síntese de diferente composição, onde basicamente suas densidades variavam de 1,1 a 0,93 kg/m<sup>3</sup>. Concluiu que a composição de gás de síntese com menor densidade (0,93 kg/m<sup>3</sup>) apresenta um melhor comportamento, com maior potência de saída no motor, menor consumo específico e maior eficiência térmica, sendo possível substituir até 74,2% do combustível líquido.

Wongkhorsub et al [61] publicou os resultados da análise da performance de um motor a diesel com o uso de óleo de pirólise. Foi observado pelo autor que este combustível apresenta uma redução média de aproximadamente 7% na potência produzida, porém, para valores elevados de carga do motor, este apresenta um consumo de combustível inferior ao diesel. A conclusão final foi de que o óleo diesel

ainda é mais eficiente do que o óleo de pirólise, no entanto existe a possibilidade de usá-lo como substituto.

Verma et al [62], também testou o uso de óleo de pirólise em motores a diesel, no entanto o seu teste foi um pouco diferente, já que ao invés de testar o combustível biológico de forma separada, ele comparou o uso de diesel puro com misturas entre diesel e óleo de pirólise. Concluiu-se que a melhor proporção é uma mistura de 40% sendo óleo de pirólise e 60% diesel, causando uma melhoria na performance do motor e nas emissões, ao aumentar a eficiência térmica, reduzir o consumo específico e reduzir as emissões de monóxido de carbono.

Kalargaris et al [46] também analisou o uso de óleo de pirólise em motores diesel e observou que o sistema funcionou de forma estável funcionando 100% a óleo de pirólise em casos de carregamento do motor superior a 75%, porém esta solução têm a desvantagem de produzir mais NOx do que o emitido utilizando apenas diesel.

Estes artigos demonstram os estudos que estão sendo realizados e indicam uma possibilidade de se utilizar combustíveis biológicos em motores a diesel.

Os motores diesel marítimos costumam apresentar consumos de combustível na faixa de 195 g/kWh, valor que não será necessariamente o consumo com o uso de óleo de pirólise, mas serve como referência para o presente estudo. Considerando tal valor de consumo é possível calcular os consumos em navegação à velocidade máxima e em operação de coleta com e sem o uso dos impelidores frontais:

- Consumo de óleo em navegação à velocidade máxima = 119,94 kg/h;
- Consumo de óleo em operação de coleta com o uso de impelidores frontais = 117 kg/h;
- Consumo de óleo em operação de coleta sem o uso de impelidores = 73,16 kg/h.

Como a produção de óleo é de 146 kg/h, é possível observar que em qualquer modo de navegação será produzido combustível suficiente para abastecer o motor. Além disso, haverá a produção de gás de síntese, o qual também pode ser usado em caso de motores de duplo combustível.

Para fornecer energia extra, serão utilizados os 201 painéis fotovoltaicos com uma capacidade pico de 72,36 kWp e o calor produzido no processo de conversão do lixo também será aproveitado, no entanto ainda não foram estimados valores a respeito.

O recurso eólico é mais difícil de ser aproveitado devido ao formato da embarcação, onde o espaço referente à sua largura é reduzido, limitando assim a capacidade de instalação de turbinas ou *Oceanwings*. No entanto é possível se observar que o uso de um tipo de vela naval como as *Oceanwings*, seria capaz de reduzir a necessidade energética, visto que ao utilizar dois destes equipamentos o empuxo extra fornecido a

embarcação seria superior a 6,4 kN, valor três vezes superior em relação à resistência ao avanço do navio na velocidade de 3 nós. O uso desses sistemas é muito vantajoso no caso de embarcações do tipo catamarã, com maior área de convés.

Apesar dos benefícios existentes em se usar velas rígidas ou turbinas eólicas, também é preciso salientar que estas acarretam em determinados problemas para o navio: o excesso de peso no convés, necessitando assim um maior reforço estrutural; o aumento do volume submerso, o que aumentará a resistência ao avanço e; um aumento excessivo de volume acima do convés, provocando uma elevação do centro de gravidade e afetando negativamente a estabilidade da embarcação. Por estes motivos não serão instalados equipamentos de aproveitamento do recurso eólico no navio em questão.

Outra verificação necessária a ser feita é sobre a inclinação gerada pelos movimentos de *roll* e *pitch* e se estas influenciarão demasiadamente o aproveitamento do recurso solar.

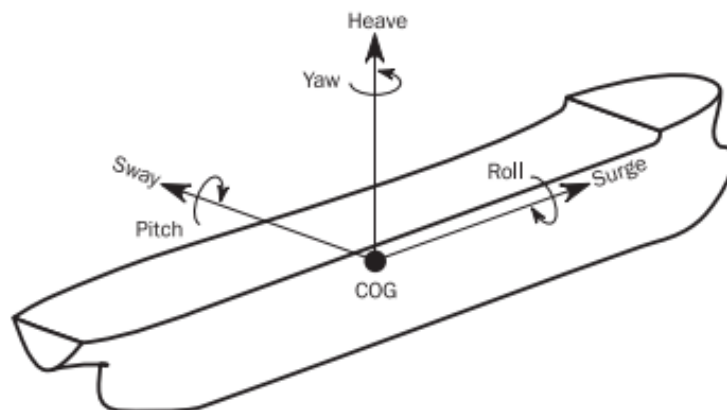


Figura 71: Movimentos de um navio. Fonte: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RU-SHIP/2015-10/DNVGL-RU-SHIP-Pt3Ch4.pdf>

Para este cálculo foi utilizado um regulamento naval fornecido pela empresa classificadora DNV [63]. A partir desta regra se obtém as equações 4.21, 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25.

$$\theta = \frac{9000 \cdot (1,4 - 0,035 \cdot T_{\theta}) \cdot f_p \cdot f_{BK}}{(1,15 \cdot B + 55) \cdot \pi} , \quad (4.21)$$

onde  $\theta$  é o ângulo de *roll* em graus, B é a boca do navio,  $T_{\theta}$  é o período de *roll* e tanto  $f_p$ , quanto  $f_{BK}$  são coeficientes empíricos.

Para obter o valor do período de *roll* usa-se a equação 4.22.

$$T_{\theta} = \frac{2,3 * \pi * k_r}{\sqrt{g * GM}} , \quad (4.22)$$

onde,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $GM$  é a altura metacêntrica e  $k_r$  é o raio de rotação do *roll*.

A equação 4.23 fornece o valor do coeficiente  $f_p$  para a aplicação na equação 4.21.

$$f_p = f_{fa} * (0,23 - 4 * f_T * B * 10^{-4}) , \quad (4.23)$$

onde,  $f_{fa}$  é um coeficiente de fadiga e  $f_T$  é o rácio entre o calado de projeto e o calado de verão (calado máximo, que ocorre quando o navio está completamente carregado).

O ângulo de *pitch* é dado pela equação 4.24.

$$\varphi = 920 * f_p * L^{-0,84} * \left( 1 + \left( \frac{2,57}{\sqrt{g * L}} \right)^{1,2} \right) , \quad (4.24)$$

onde,  $\varphi$  é o ângulo de *pitch* em graus,  $f_p$  é um coeficiente empírico diferente do calculado anteriormente  $L$  é o comprimento da embarcação.

A forma de se calcular o coeficiente empírico para o *pitch* é através da equação 4.25.

$$f_p = f_{fa} * ((0,27 - 0,02 * f_T) - (13 - 5 * f_T) * L * 10^{-5}) \quad (4.25)$$

Utilizando as equações apresentadas acima, foi possível obter um valor de  $7,55^\circ$  para o ângulo de *roll* e  $7,17^\circ$  para o ângulo de *pitch*.

Radhika [64] realizou um estudo a respeito do efeito da inclinação em um painel fotovoltaico para uma localização específica na Índia. Ele considerou inclinações para os painéis de  $8^\circ$  a  $36^\circ$ , com variações de  $2^\circ$ . Observou-se que o aumento na energia produzida anualmente era inferior a 1% para variações de  $2^\circ$  na inclinação. Com base nos resultados apresentados é possível considerar que a variação na produção de

energia pelos painéis fotovoltaicos será inferior a 7%, mesmo se considerarmos os casos limites de *roll* e *pitch*.

Outro ponto positivo do uso de painéis fotovoltaicos na embarcação é que o sistema dimensionado neste trabalho é capaz de fornecer, de acordo com a base de dados mais conservadora, 97,01 MWh anualmente, valor este que se comparado com o consumo de óleo de pirólise pelo navio, resulta numa economia anual de combustível de aproximadamente 18,9 toneladas.

As densidades energéticas do óleo de pirólise e do gás de síntese não são valores constantes, estes dependem da composição química de ambos os combustíveis, porém estima-se que o menor valor de densidade energética para o óleo de pirólise é de 16 MJ/kg, enquanto que para o gás de síntese é de 5 MJ/kg. Portanto, considerando um total de 2075,54 toneladas de resíduos coletados pela embarcação anualmente, é possível produzir 1141,34 toneladas de óleo de pirólise e 614,57 toneladas de gás de síntese, o que em termos energéticos equivale a aproximadamente 6 GWh por ano.



**CONCLUSÕES E TRABALHOS  
FUTUROS**

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSÕES

A produção de materiais plásticos aumenta a cada ano e, no entanto a correta gestão destes resíduos continua a ser um dos maiores problemas atuais, principalmente em países ainda em desenvolvimento. Consequentemente, muitos resíduos são levados ao mar, maioritariamente através de rios e de regiões costeiras com grande urbanização ou concentração de turismo. Este trabalho procurou apresentar uma alternativa para mitigar este problema.

Foi observado que existem diferentes empresas com foco nesta mesma questão, no entanto em sua maioria, as soluções desenvolvidas são de pequena escala ou ainda estão em fase de projeto.

Apesar da baixa concentração de resíduos em regiões marítimas mais centrais e distantes da costa, ainda é possível encontrar um grande volume de lixo marinho, principalmente nas cinco regiões de giro oceânico e no Mar Mediterrâneo, consequência do comportamento conjunto entre vento, ondas e corrente.

Esta tese propôs o projeto de um navio de porte médio, capaz de realizar a recolha de resíduos em alto mar e também em regiões costeiras. O local de estudo definido foi o Mar Mediterrâneo, pois esta é uma das principais regiões de acumulação de lixo, além de ser uma localização mais próxima de áreas continentais, tornando este o local perfeito para se desenvolver um protótipo e realizar estudos práticos em escala real para um maior desenvolvimento da tecnologia.

Foram apresentadas tecnologias inovadoras que podem integrar o navio ou que apenas serviram como fontes de ideia para o atual projeto. Um ponto principal neste trabalho foi considerar o uso de uma unidade de tratamento e conversão de resíduos em combustíveis biológicos a bordo do navio e foi demonstrado que em condições de operação com velocidades reduzidas, em torno de 3 nós (5,56 km/h) esta unidade é capaz de produzir combustível o suficiente para compensar a sua demanda energética.

Para garantir que o barco seja autossustentável foram também avaliadas outras fontes alternativas de energia a bordo. Portanto foram obtidas séries temporais, referentes a 15 anos, em diferentes pontos do local de estudo, com o qual se gerou um ano típico meteorológico. Nesta etapa foi possível observar que a variação no peso de cada

parâmetro não representava uma alteração significativa do ano típico, visto que para a maioria dos meses não houve alteração.

Para obter um resultado mais conclusivo a respeito dos recursos solar e eólico, foram utilizadas as ferramentas de reanálise meteorológica MERRA-2 e ERA5. Porém devido a limitações no tamanho da amostra e na capacidade computacional, não era prática a obtenção de dados referentes a 15 anos, e como tal, foi usado o ano típico meteorológico como dado de entrada para as ferramentas citadas.

Concluiu-se ao comparar as três ferramentas utilizadas (média das séries temporais pontuais, dados de reanálise MERRA-2 e dados de reanálise ERA5) que a ferramenta ERA5 possui um viés mais conservador. No entanto, a diferença dos resultados entre as diferentes bases de dados nunca ultrapassou os 6% para resultados embutidos nos dados originais e subiam até um máximo de 9,82% ao se comparar valores de energia obtidos com a combinação dos dados originais e de parâmetros externos, como especificações de painéis fotovoltaicos ou turbinas eólicas.

As três ferramentas apresentaram valores anuais de irradiação solar na faixa de 1781,58 a 1894,03 kWh/m<sup>2</sup> e as velocidades médias de vento na região do Mar Mediterrâneo ficaram em torno de 5,9 m/s.

Também se pode concluir que o aproveitamento do recurso solar é de extrema importância, pois com esta produção extra de energia é possível poupar uma significativa quantidade de combustível biológico anualmente, visto que a disponibilidade deste recurso na região do Mar Mediterrâneo é muito elevada e as perdas de produção devido a sombreamento e oscilações do barco não são muito significativas.

O aproveitamento do recurso eólico através de aerogeradores ou velas se mostrou muito vantajoso, no entanto, devido ao formato monocasco da embarcação projetada e a utilização da área de convés para a unidade de conversão do lixo, os benefícios aparentes obtidos com a redução da necessidade energética caso fossem usadas velas rígidas ou no fornecimento de energia extra através de turbinas eólicas não compensam o efeito negativo na estabilidade do navio, na necessidade de sobredimensionamento da estrutura do convés e no aumento do volume submerso e consequentemente na maior resistência ao avanço.

A conclusão referente ao recurso eólico é específica para o navio deste projeto, não se aplicando, forçosamente a todas as embarcações, pois depende do comportamento dinâmico de cada embarcação.

Durante o trabalho realizado, foi possível observar a alta complexidade do projeto, principalmente por incluir muitos conceitos ainda em fase de desenvolvimento. O uso de energia solar e eólica para auxiliar na propulsão ou fornecimento de energia de uma embarcação, em especial as de pequeno porte, está se a tornar cada vez mais

comum, porém equipamentos de grande escala para recolha de resíduos e motores marítimos que funcionem inteiramente a combustíveis biológicos ainda são conceitos em desenvolvimento. Portanto estes dois fatores representam o maior obstáculo a ser superado na indústria para que seja possível produzir em escala, navios com a referida missão.

Muitos dados utilizados neste relatório foram baseados em estimativas obtidas em estudos científicos ou fornecidos por empresas parceiras do projeto, portanto os resultados teóricos de coleta; produção de combustível e eficiência da unidade de conversão dos resíduos; e de necessidade energética do navio só serão validados de forma absoluta quando um protótipo do sistema for testado em ambiente real.

## 5.2 TRABALHOS FUTUROS

Foi apresentado neste relatório que um projeto naval é dividido em diferentes etapas, portanto o trabalho que pode ser realizado em seguida a esta tese, é um estudo mais detalhado do comportamento dinâmico da embarcação, onde devem ser realizados estudos de dinâmica dos fluidos computacional para verificar a resistência ao avanço do navio, bem como os graus de rotação da embarcação e a sua estabilidade efetiva.

Uma importante sugestão de trabalho futuro é a análise do aproveitamento do calor no processo de conversão de resíduos a bordo do navio e a verificação da eficiência do sistema. Também é preciso realizar mais ensaios com o uso de combustíveis originados por pirólise de plástico em motores de combustão interna, para se obter valores mais precisos do consumo de combustível e da consequente emissão de gases poluentes.

Em relação ao tema da avaliação dos recursos solar e eólico, trabalhos futuros devem incluir: a obtenção de anos típicos meteorológicos a partir de outras bases de dados, como a própria ferramenta de reanálise ERA5; a utilização de modelos de mesoescala, como o *Weather Research and Forecasting* (WRF), para observar de forma mais precisa o comportamento destes recursos, incluindo as direções do vento e condições de nebulosidade; e o uso de séries de irradiação obtidas por satélites para se validar os dados meteorológicos apresentados com maior precisão.



# BIBLIOGRAFIA

## 6 BIBLIOGRAFIA

[1] – Diário de Notícias (página consultada em abril de 2019)  
<https://www.dn.pt/ciencia/interior/lixo-produzido-nas-cidades-vai-aumentar-70-ate-2025-2595368.html>

[2] - Barnes David K. A., Galgani Francois, Thompson Richard C. and Barlaz Morton (2009). "Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments." *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. Vol.364.

[3] – Wikipedia – Giro Oceânico (página consultada em abril de 2019)  
[https://pt.wikipedia.org/wiki/Giro\\_oce%C3%A2nico#Giros\\_subtropicais](https://pt.wikipedia.org/wiki/Giro_oce%C3%A2nico#Giros_subtropicais)

[4] - Chen Q., Reisser J., Cunsolo S., Kwadijk C., Kotterman M., Proietti M., Slat B., Ferrari FF., Schwarz A., Levivier A., Yin D., Hollert H., Koelmans A.A. (2018). "Pollutants in Plastics within the North Pacific Subtropical Gyre." *Environmental Science & Technology*." Vol. 52 (2), pages 446-456

[5] - Jambeck J. R., Geyer R., Wilcox C., Siegler T. R., Perryman M., Andrady A., Narayan R., Law K. L. (2015). "Plastic waste inputs from land into the ocean. *American Association for the Advancement of Science*." Vol. 347, Issue 6223, pages. 768-771

[6] – Weforum (página consultada em abril de 2019)  
<https://www.weforum.org/agenda/2016/10/every-minute-one-garbage-truck-of-plastic-is-dumped-into-our-oceans/>

[7] – Ellen Macarthur Foundation (página consultada em abril de 2019)  
<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics-catalysing-action>

[8] - Eriksen M, Lebreton LCM, Carson HS, Thiel M, Moore CJ, Borerro JC, et al. (2014). "Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea." *PLoS ONE* 9(12): e111913.

[9] - James J. Corbett, James J. Winebrake, Erin H. Green, Prasad Kasibhatla, Veronika Eyring, and Axel Lauer (2007). "Mortality from Ship Emissions: A Global Assessment. *Environmental Science & Technology*." Vol. 41 (24), pages. 8512-8518

[10] - International Chamber of Shipping, Shipping and World Trade (página consultada em abril de 2019)

[www.marisec.org/shippingfacts/worldtrade/index/php](http://www.marisec.org/shippingfacts/worldtrade/index/php)

[11] - Sub-Committee on Bulk Liquids and Gases (2007) Review of MARPOL Annex VI and the NO<sub>x</sub> Technical Code: Report on the outcome of the Informal Cross Government/Industry Scientific Group of Experts established to evaluate the effects of the different fuel options proposed under the revision of MARPOL Annex VI, IMO

[12] – Clean Shipping (página consultada em abril de 2019)  
[https://www.cleanshipping.org/download/Oceana\\_Shipping\\_Report1.pdf](https://www.cleanshipping.org/download/Oceana_Shipping_Report1.pdf)

[13] – Island Power Solutions Ltd. (página consultada em abril de 2019)  
<https://islandpower.energy/>

[14] – Icollect (página consultada em abril de 2019)  
<https://icollect.earth/>

[15] - Smets A., Jäger K., Isabella O., Van Swaaij R., Zeman M. (2016). Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems. UIT Cambridge Ltd.; 1 edition

[16] – Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), Junho de 2019.  
<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>

[17] – Saha, S., S. Moorthi, H. Pan, X. Wu, J. Wang, and Coauthors, 2010: The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 1015–1057, doi:10.1175/2010BAMS3001.1.

[18] – Carvalho, D. & Rocha, A. & Gómez-Gesteira, M. & Silva Santos, C., (2014). "Offshore wind energy resource simulation forced by different reanalyses: Comparison with observed data in the Iberian Peninsula," *Applied Energy*, Elsevier, vol. 134(C), pages 57-64.

[19] – Molod, A. and Takacs, L. and Suarez, M. and Bacmeister, J. (2015). "Development of the GEOS-5 atmospheric general circulation model: evolution from MERRA to MERRA2." *Geoscientific Model Development*. Vol. 8 (5). pages 1339 – 1356.

[20] - Global Modeling and Assimilation Office (2016) MERRA-2: File Specification

[21] - GALE P. A. (2003) "The Ship Design Process." *Ship Design and Construction*. The Society of Naval Architects and Marine Engineers. Vol. 1. Lamb (Ed.)

[22] - EVANS, J. H. (1959) "Basic Design Concepts." Journal of the American Society of Naval Engineers.

[23] - KISS R. K. (1980) "Mission Analysis and Basic Design." Ship Design and Construction. The Society of Naval Architects and Marine Engineers. Robert Taggart (Ed.)

[24] - Boaventura F. G. (2016) "Modelo de Síntese e Otimização para o Projeto Conceitual de Navios de Apoio a Plataforma, Incluindo Parâmetros do Bulbo." Tese de conclusão de curso, UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

[25] - Norsepower (página consultada em junho de 2019)  
<https://www.norsepower.com/>

[26] - TANCREDI T. P. (2008) "Otimização Multidisciplinar Distribuída aplicada a Projetos de Engenharia." Tese de doutorado, USP – Universidade de São Paulo, Brasil.

[27] – The Ocean Cleanup (página consultada em junho de 2019)  
<https://theoceancleanup.com/>

[28] – Sky Sails (página consultada em junho de 2019)  
<https://www.skysails.info/>

[29] – Oceanwings (página consultada em junho de 2019)  
<https://vplp.fr/realisation/oceanwings/58.html>

[30] – Ocean Saviour (página consultada em junho de 2019)  
<https://www.oceansaviour.org/>

[31] – The Manta (página consultada em junho de 2019)  
<https://www.theseacleaners.org/en/technical-data/>

[32] – Energy Observer (página consultada em junho de 2019)  
<http://www.energy-observer.org/>

[33] – Planet Solar (página consultada em junho de 2019)  
<https://www.planetsolar.swiss/en/world-premiere/boat/>

[34] – Huang J., Rikus L.J., Qin Y., Katzfey J. (2018) "Assessing Model Performance of Daily Solar Irradiance Forecasts over Australia." Solar Energy, Elsevier, Vol. 176, pages 615-626.

[35] – Urraca R.; Huld T.; Gracia-Amillo A.; Martinez-de-Pison F.J.; Kaspar F., Sanz-Garcia A. (2018) "Evaluation of Global Horizontal Irradiance Estimates from ERA5 and COSMO-REA6 Reanalyses using Ground and Satellite-based Data." Solar Energy, Elsevier, Vol. 164, pages 339-354.

[36] – Olauson J. (2018) “ERA5: The new Champion of Wind Power Modelling?” *Renewable Energy*, Elsevier, Vol. 126, pages 322-331.

[37] – Waste Atlas (página consultada em abril de 2019)  
<http://www.atlas.d-waste.com>

[38] – Loakeimidis C., Zeri C., Kaberi H., Galatchi M., Antoniadis K., Streftaris N., Galgani F., Papathanassiou E., Papatheodorou G. (2014) “A comparative Study of Marine Litter on the Seafloor of Coastal Areas in the Eastern Mediterranean and Black Seas.” *Marine Pollution Bulletin*, Elsevier, Vol. 89 (1-2), pages 296-304.

[39] – Galgani F., Leaute J. P., Moguedet P., Souplet A., Verin Y., Carpentier A., Goraguer H., Latrouite D., Andral B., Cadiou Y., Mahe J. C., Poulard J. C., Nerisson P. (2000) “Litter on the Sea Floor Along European Coasts” *Marine Pollution Bulletin*, Elsevier, Vol. 40 (6), pages 516-527.

[40] – United Nations Environment Programme / Mediterranean Action Plan (UNEP/MAP), MED, POL (2015) “Marine Litter Assessment in the Mediterranean.” ISBN No: 978-92-807-3564-2

[41] – Thomsea (página consultada em julho de 2019)  
<http://www.thomsea.fr/UK/>

[42] - ReCleanSea (página consultada em julho de 2019)  
<http://www.recleansea.org/>

[43] – Silva M. C.; Santos G. O. (2012) “Densidade Aparente de Resíduos Sólidos Recém Coletados.” artigo científico, IFCE-Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Brasil

[44] – Brown, Robert C. “Syngas to Synfuels Process Development Unit Final Scientific/Technical Report.” Iowa State University, United States: N. p.

[45] – Compressed Natural Gas (página consultada em junho de 2019)  
<https://www.unitrove.com/engineering/gas-technology/compressed-natural-gas>

[46] – Kalargaris I.; Tian G.; Gu S. (2017) “Combustion, Performance and Emission Analysis of a DI Diesel Engine Using Plastic Pyrolysis Oil.” *Fuel Processing Technology*, Elsevier, Vol. 157, pages 108-115.

[47] – Brewer C. E., Chuang V. J., Masiello C. A., Gonnermann H., Gao X., Dugan B., Driver L. E., Panzacchi P., Zygourakis K., Davies C. A. (2014) “New Approaches to Measuring Biochar Density and Porosity” *Biomass and Bioenergy*, Elsevier, Vol. 66, pages 176-185.

[48] – API, A. P. (1987). “API RP 2P, Recommended Practice for the Analysis of Spread Mooring System for Floating Drilling Units.” Page 25

[49] – El-Geziry T.M.; Bryden I.G. (2014) “The Circulation Pattern in the Mediterranean Sea: Issues for Modeller Consideration.” *Journal of Operational Oceanography*, Vol. 3(2), pages 39-46.

[50] – Galanis G.; Hayes D.; Zodiatis G.; Chu P.C.; Kuo Y.; Kallos G. (2012) “Wave Height Characteristics in the Mediterranean Sea by Means of Numerical Modeling, Satellite Data, Statistical and Geometrical Techniques.” *Marine Geophysical Research*, Vol. 33(1), pages 1- 15.

[51] – SODA – Solar Radiation Data (página consultada em abril de 2019)  
<http://www.soda-pro.com/web-services/meteo-data/merra>

[52] – Wilcox S.; Marion W. (2008) “Users Manual for TMY3 Data Sets.”

[53] - Finkelstein, J.M.; Schafer, R.E. (1971). “Improved Goodness-of-Fit Tests.” *Biometrika*, Vol. 58(3), pages 641-645.

[54] – Canadian Solar (página consultada em setembro de 2019)  
<https://www.canadiansolar.com/solarPanels/detail/29>

[55] – International Renewable Energy Agency - IRENA (2014) “Estimating the Renewable Energy Potential in Africa: A GIS-based Approach”

[56] – Photovoltaic Software (página consultada em novembro de 2019)  
<https://photovoltaic-software.com/principle-ressources/how-calculate-solar-energy-power-pv-systems>

[57] – NASA GES DISC (página consultada em julho de 2019)  
[https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2T1NXRAD\\_V5.12.4/summary?keywords=%22MERRA-2%22](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2T1NXRAD_V5.12.4/summary?keywords=%22MERRA-2%22)

[58] – Copernicus (página consultada em agosto de 2019)  
<https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home>

[59] – Wind Turbine Star (página consultada em setembro de 2019)  
<https://www.windturbinestar.com/5kwv-v-aeolos-wind-turbine.html>

[60] – Mahgoub B. K. K.; Sulaiman S.A.; Abdul Karim Z.A. (2015) “Performance Study of Imitated Syngas in Dual-fuel Compression Ignition Diesel Engine” *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, Vol. 11(1), pages 2282-2293

[61] – Wongkhorsub C.; Chindaprasert N. (2013) “A Comparison of the Use of Pyrolysis Oils in Diesel Engine.” *Energy and Power Engineering*, Vol. 05(04), pages 350-355

[62] – Verma A.; Raghuvansi A.; Quraishi M.A.; Tirkey J.V.; Verma C. (2018) “Engine Fuel Production from Waste Plastic Pyrolysis (WPO) and Performance Evaluation in a CI Engine with Diesel Blend.” *Journal of Materials and Environmental Science*, Vol. 9(6)

[63] – DET NORSKE VERITAS (2015). “Rules for classification: Ships” – DNVGL-RU-SHIP-Part 3- Hull, Chapter 4-Loads

[64] – Radhika; Suman S.K. (2015) “Effect of Tilt angle and Azimuth angle on Solar Output and Optimum Tilt and Azimuth angle for Chandigarh, India.” *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. Vol.4

# ANEXOS

## 7 ANEXOS

### 7.1 CÓDIGO PYTHON APLICADO NO JUPYTER NOTEBOOK PARA REGRESSÃO DE NAVIOS

```
import pandas as pd
import numpy as np
from scipy import stats
from sklearn.metrics import r2_score
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
%matplotlib inline
```

```
# Caminho da base de dados
path = r'C:\Users\Cris\Documents\Projects\Similar_vessels.xlsx'
# Lendo o arquivo excel
df = pd.read_excel(path)

# Renomeando as colunas
df.rename(columns = {'LOA (m)': 'L [m]', 'Beam (m)': 'B [m]', 'Depth (m)': 'D [m]',
'Economical Speed (kts)': 'V_s [kts]', 'Deck Cargo Area (m2)': 'A_deck [m2]',
'Design Draft (m)': 'T_d [m]', 'Summer Draft (m)': 'T_max [m]', 'Deadweight (ton)':
'DWT [t]'}, inplace=True)

# Excluindo todas as linhas que não apresentam valores para o pontal
df.dropna(subset=['D [m]'], axis=0, inplace=True)
# Reiniciando o índice
df.reset_index(drop=True, inplace=True)
```

```
# Excluindo navios com comprimentos superiores a 75 metros
df.drop(df.index[df['L [m]'] > 75], axis=0, inplace=True)

L = df['L [m]'] # Comprimento dos navios
T1 = df['T_d [m]'] # Calado de projeto dos navios
T2 = df['T_max [m]'] # Calado máximo dos navios
D = df['D [m]'] # Pontal dos navios
B = df['B [m]'] # Boca dos navios

# Inserindo o valor mínimo do calado de projeto nas células nulas da mesma coluna
para embarcações menores
df.loc[(L <= 65) & (T1.isnull()), 'T_d [m]'] = min(T1)
# Inserindo o valor máximo do calado de projeto nas células nulas da mesma coluna
para embarcações maiores
df.loc[(L > 65) & (L <= 75) & (T1.isnull()), 'T_d [m]'] = max(T1)
```

```
# Obtendo a relação entre determinados parâmetros
df['L/B'] = round(df['L [m]'] / df['B [m]'], 2)
df['B/T_d'] = round(df['B [m]'] / df['T_d [m]'], 2)
df['D/T_d'] = round(df['D [m]'] / df['T_d [m]'], 2)

df['T_m/T_d'] = round(df['T_max [m]'] / df['T_d [m]'], 2)
df['A/LB'] = round(df['A_deck [m2]'] / (df['L [m]'] * df['B [m]']), 3)
```

```
# Comprimentos mínimo e máximo para a embarcação a ser projetada
Length1 = 50
Length2 = 60

x = L.values # Valores de comprimento
y0 = D.values # Valores de pontal
y1 = B.values # Valores de Boca
y2 = df['A_deck [m2]'].values # Valores de área de convés
y = [y0, y1, y2] # Criando uma lista para os parâmetros comparáveis

Titles = ['Depth Regression', 'Breadth Regression', 'Deck area Regression']
Y_labels = ['Depth (m)', 'Breadth (m)', 'Deack area (m2)'] # Lista para cada eixo y
fig = plt.figure(figsize=(16, 16)) # Criando uma figura
fig.subplots_adjust(hspace=0.4, wspace=0.4) # Ajustando o espaço entre os gráficos

for i in range(3): # Loop para iterar entre os gráficos
    # Obtendo os parâmetros principais da regressão linear
    slope, intercept, r_value, p_value, std_err = stats.linregress(x,y[i])
    plt.subplot(2, 2, i + 1) # Criando o primeiro gráfico
    sns.regplot(x, y[i], color='g', line_kws={'label': "y={0:.4f}x+{1:.4f}\nR²={2:.4f}".format(slope,intercept,r_value**2)})

    # Adicionando 50% de margem para o pontal
    if i == 0:
        Depth1 = (slope * Length1 + intercept) * 1.5
        Depth2 = (slope * Length2 + intercept) * 1.5

    # Aplicando 10% de margem para as bocas
    elif i == 1:
        Beam1 = (slope * Length1 + intercept) * 0.9
        Beam2 = (slope * Length2 + intercept) * 1.1

    plt.title(Titles[i])
    plt.xlabel('Overall length (m)')
    plt.ylabel(Y_labels[i])
    plt.legend(loc='upper left')
```

```
# Escrevendo na tela os valores desejados para pontal mínimo, máximo e boca mínima e máxima
print(Depth1)
print(Depth2)
print(Beam1)
print(Beam2)

# Definindo o valor da relação entre o calado e o pontal
D_t_max = df['D/T_d'].max()
T_D_ratio = 1 / D_t_max
```

## 7.2 CÓDIGO PYTHON APLICADO NO JUPYTER NOTEBOOK PARA O DESENVOLVIMENTO DO TMY

### 7.2.1 CÓDIGO PARA A DEFINIÇÃO DO ANO TÍPICO METEOROLÓGICO DA REGIÃO NORTE DO MEDITERRÂNEO

```
# Importando dependências
```

```
import pandas as pd
import glob
import os
import numpy as np
```

```
# Caminho onde encontrar os arquivos de séries temporais iniciais
```

```
path = r'C:\Users\Cris\Documents\Projects\Time series MERRA 2\MEDITERRANEAN SEA NORTH'
```

```
# Definindo os arquivos que devem ser recolhidos
```

```
all_files = glob.glob(path + "/*.csv")
```

```
# Caminho usado para armazenar os arquivos com a soma ponderada para cada Localização geográfica
```

```
path2 = r'C:\Users\Cris\Documents\Projects\Energy_resource\Mediterranean_Sea' + \
r'\Mediterranean_Sea_North\NORTH_WS_each_point'
```

```
# Criando uma lista vazia para os arquivos que serão analisados
```

```
li = []
```

```
# Iterando entre os arquivos .csv e anexando cada um a uma lista vazia
```

```
for filename in all_files:
    frame = pd.read_csv(filename, skiprows=25, delimiter=';', index_col=None,
                        header=None)
    li.append(frame)
```

```
# Iniciando um arquivo para a soma ponderada total, considerando todas as Localizações
```

```
W_total = 0
TMY_values_list = []
TMY_worst_list = []
```

```
# Abrindo um arquivo texto e inserindo o melhor ano típico meteorológico para cada
```

```
# Iniciando um loop para iterar entre as Localizações geográficas
```

```
for z in range (len(li)):
    # Lêndo o arquivo .csv e transformando-o em um dataframe
    df = pd.DataFrame(li[z], index=None, columns=None)
```

```
# Criando uma lista de cabeçalho
```

```
Header = ['Date', 'UT time', 'Temperature', 'Relative Humidity', 'Pressure',
          'Wind Speed', 'Wind Direction', 'Rainfall', 'Snowfall', 'Snow
          depth', 'Short-wave irradiation']
```

```
# Associando os elementos do cabeçalho a cada coluna
```

```
df.columns = Header
```

```

# Removendo as colunas desnecessárias
df.drop(['UT time', 'Temperature', 'Relative Humidity', 'Pressure', 'Wind
        Direction', 'Rainfall', 'Snowfall', 'Snow depth'], axis=1,
        inplace=True)

df['Day'] = pd.DatetimeIndex(df['Date']).day # Criando uma coluna com os
dias
df['Month'] = pd.DatetimeIndex(df['Date']).month # Criando uma coluna com os
meses
df['Year'] = pd.DatetimeIndex(df['Date']).year # Criando uma coluna com os
anos

# Reordenando as colunas, para que as colunas recentemente criadas apareçam
primeiro
cols = df.columns.tolist()
cols = cols[-1:] + cols[-2:-1] + cols[-3:-2] + cols[:-3]
df = df.loc[:, cols]

# Deletando a coluna da data
df.drop(['Date'], axis=1, inplace=True)

# Deletando as colunas referentes ao único dia de 2015 da base de dados
df.drop(df.index[df['Year'] == 2015], axis=0, inplace=True)
df['Short-wave irradiation'] = df['Short-wave irradiation']/1000 #
Convertendo a unidade de 'Wh' para 'kWh'

# Criando uma lista de meses
months = ['January', 'February', 'March', 'April', 'May', 'June', 'July',
          'August', 'September', 'October', 'November', 'December']

years = df.Year.unique() # Criando uma lista de anos
parameters = ['Short-wave irradiation', 'Wind Speed', 'Wind Speed'] #
Parâmetros base para a análise

size = len(years) * len(months)
LT_y = [] # Iniciando a lista de longa prazo

month_y = [] # Iniciando a lista que conterá dados de cada mês em cada ano
FS_list = [] # Iniciando a lista para o fator FS

for j in range(len(parameters)):
    if j == 0: # Irradiação solar
        df1 = df.groupby(['Year', 'Month', 'Day'], as_index=False).sum()
        # Agrupando o dataframe em função do GHI
    elif j == 1: # Velocidade média do vento
        # Agrupando o dataframe em função do velocidade média do vento
        df1 = df.groupby(['Year', 'Month', 'Day'],
                        as_index=False).mean()
    else: # Velocidade máxima do vento
        # Agrupando o dataframe em função do velocidade máxima do vento
        df1 = df.groupby(['Year', 'Month', 'Day'], as_index=False).max()
    for i in range(len(months)):
        xindex = df1.loc[df1['Month'] == i + 1] # Valor de Longa prazo
        para cada mês
        x = np.sort(xindex[parameters[j]].values) # Ordenando os valores

```

```

para a coluna chave a ser analisada
# Distribuição cumulativa para o longo prazo
y = (np.cumsum(x)-min(np.cumsum(x)))/(max(np.cumsum(x))-
    min(np.cumsum(x)))
LT_y.append(y)
for year in years: # Loop para cada mês em cada ano
    xindex1 = xindex.loc[df1['Year'] == year]
    x1 = np.sort(xindex1[parameters[j]].values)
    y1 = (np.cumsum(x1)-
        min(np.cumsum(x1)))/(max(np.cumsum(x1))-
        min(np.cumsum(x1)))
    month_y.append(y1)

n = len(x1) # Numero de dias
delta_updated = 0

# Loop para achar o valor y(x) equivalente para o longo
prazo e curto prazo e comparando ambos
for position,value in enumerate(x1):
    inx = np.where(x == value)
    delta = abs(y1[position] - y[inx])
    delta_updated += delta[0]
FS = delta_updated / n
FS_list.append(FS) # Estatística de Finkelstein-Schafer
(FS)

LT_y_array = np.array(LT_y).reshape(len(parameters), len(months)) # colunas
= meses, fileiras = parâmetros
month_y_array = np.array(month_y) # 15 anos, 12 meses, 3 parâmetros

# Matrizes com o fator FS para cada parâmetro avaliado
FS_matrix_sum =
    np.array(FS_list[:size]).reshape(len(months),len(years)).transpose()

FS_matrix_mean = np.array(FS_list[size:(size *
    2)]).reshape(len(months),len(years)).transpose()
FS_matrix_max = np.array(FS_list[(size *
    2):]).reshape(len(months),len(years)).transpose()

# Criando dataframes a partir das matrizes
df_FS_sum = pd.DataFrame(data=FS_matrix_sum, index=years, columns=months)
df_FS_mean = pd.DataFrame(data=FS_matrix_mean, index=years, columns=months)
df_FS_max = pd.DataFrame(data=FS_matrix_max, index=years, columns=months)

# Fator de peso para cada parâmetro avaliado
w_sum = 0.5
w_mean = 0.25
w_max = 0.25

# Criando uma matriz com a soma ponderada, convertendo para um dataframe e
salvando em um arquivo .csv
WS_matrix = w_sum * FS_matrix_sum + w_mean * FS_matrix_mean + w_max *
    FS_matrix_max # dataframe com soma ponderada
WS_df = pd.DataFrame(data=WS_matrix, index=years, columns=months)
WS_df.to_csv(os.path.join(path2, r'North_WS_point_{}.csv'.format(z+1)),

```

```

header=True)

# Definindo o ano típico meteorológico (TMY) para cada ponto geográfico
TMY_array = np.zeros((1, len(months)))
for i in range(len(months)):
    Tm = WS_df.iloc[:, i].idxmin()
    TMY_array[0, i] = Tm
TMY_list = TMY_array[0]
TMY_best_i = dict(zip(months, TMY_list))
TMY_values_list.append(TMY_list)

# Piores anos para um possível TMY
TMY_array2 = np.zeros((1, len(months)))
for i in range(len(months)):
    Tm2 = WS_df.iloc[:, i].idxmax()
    TMY_array2[0, i] = Tm2
TMY_list2 = TMY_array2[0]
TMY_worst_i = dict(zip(months, TMY_list2))
TMY_worst_list.append(TMY_list2)

# Escrevendo um dicionário composto do ano meteorológico típico para cada
Localização em um arquivo texto
f.write('Point {}:\n'.format(z + 1))
f.write(str(TMY_best_i) + '\n\n')
f.write('Point {}_WORST:\n'.format(z + 1))
f.write(str(TMY_worst_i) + '\n\n\n')

# Atualizando o valor total ponderado ao adicionar o valor referente a cada

```

```

# Definindo o TMY
TMY_array_best = np.zeros((1, len(months)))
for i in range(len(months)):
    Tmonth = W_total.iloc[:, i].idxmin()
    TMY_array_best[0, i] = Tmonth
TMY_list_best = TMY_array_best[0]
TMY_best = dict(zip(months, TMY_list_best))
TMY_values_list.append(TMY_list_best)

# Definindo o pior TMY possível
TMY_array_worst = np.zeros((1, len(months)))
for i in range(len(months)):
    Tmonth2 = W_total.iloc[:, i].idxmax()
    TMY_array_worst[0, i] = Tmonth2
TMY_list_worst = TMY_array_worst[0]
TMY_worst = dict(zip(months, TMY_list_worst))
TMY_worst_list.append(TMY_list_worst)

# Criando um dataframe com o TMY para cada localização e também o global
TMY_df = pd.DataFrame(TMY_values_list, columns=months)
# Salvando o dataframe com o TMY em um arquivo .csv
TMY_df.to_csv('TMY_north.csv', header=True)

# Criando um dataframe com o pior TMY para cada localização e também o global
TMY_df2 = pd.DataFrame(TMY_worst_list, columns=months)
# Salvando o dataframe com o TMY em um arquivo .csv

```

```
TMY_df2.to_csv('WORST_TMY_north.csv', header=True)

# Adicionando o TMY ao arquivo texto aberto e fechando o arquivo no final
f.write('General TMY:\n')
f.write(str(TMY_best) + '\n\n')
f.write('WORST General TMY:\n')
f.write(str(TMY_worst))
f.close()
```

## 7.2.2 CÓDIGO PARA A DEFINIÇÃO DO ANO TÍPICO METEOROLÓGICO DA REGIÃO SUL DO MEDITERRÂNEO

```
# Importando dependências
```

```
import pandas as pd
import glob
import os
import numpy as np
```

```
# Caminho onde encontrar os arquivos de séries temporais iniciais
```

```
path = r'C:\Users\Cris\Documents\Projects\Time series MERRA 2\MEDITERRANEAN SEA SOUTH'
```

```
# Definindo os arquivos que devem ser recolhidos
```

```
all_files = glob.glob(path + "/*.csv")
```

```
# Caminho usado para armazenar os arquivos com a soma ponderada para cada Localização geográfica
```

```
path2 = r'C:\Users\Cris\Documents\Projects\Energy_resource\Mediterranean_Sea' + \
r'\Mediterranean_Sea_South\SOUTH_WS_each_point'
```

```
# Criando uma lista vazia para os arquivos que serão analisados
```

```
li = []
```

```
# Iterando entre os arquivos .csv e anexando cada um a uma lista vazia
```

```
for filename in all_files:
    frame = pd.read_csv(filename, skiprows=25, delimiter=';', index_col=None,
                        header=None)
    li.append(frame)
```

```
# Iniciando um arquivo para a soma ponderada total, considerando todas as Localizações
```

```
W_total = 0
```

```
TMY_values_list = []
```

```
TMY_worst_list = []
```

```
# Abrindo um arquivo texto e inserindo o melhor ano típico meteorológico para cada Localização
```

```

# Iniciando um loop para iterar entre as Localizações geográficas
for z in range (len(li)):
    # Lêndo o arquivo .csv e transformando-o em um dataframe
    df = pd.DataFrame(li[z], index=None, columns=None)

    # Criando uma lista de cabeçalho
    Header = ['Date', 'UT time', 'Temperature', 'Relative Humidity', 'Pressure',
              'Wind Speed', 'Wind Direction', 'Rainfall', 'Snowfall', 'Snow
              depth', 'Short-wave irradiation']

    # Associando os elementos do cabeçalho a cada coluna
    df.columns = Header

    # Removendo as colunas desnecessárias
    df.drop(['UT time', 'Temperature', 'Relative Humidity', 'Pressure', 'Wind
            Direction', 'Rainfall', 'Snowfall', 'Snow depth'], axis=1,
            inplace=True)

    df['Day'] = pd.DatetimeIndex(df['Date']).day # Criando uma coluna com os dias
    df['Month'] = pd.DatetimeIndex(df['Date']).month # Criando uma coluna com os
    meses
    df['Year'] = pd.DatetimeIndex(df['Date']).year # Criando uma coluna com os
    anos

    # Reordenando as colunas, para que as colunas recentemente criadas apareçam
    primeiro
    cols = df.columns.tolist()
    cols = cols[-1:] + cols[-2:-1] + cols[-3:-2] + cols[:-3]
    df = df.loc[:, cols]

    # Deletando a coluna da data
    df.drop(['Date'], axis=1, inplace=True)

    # Deletando as colunas referentes ao único dia de 2015 da base de dados
    df.drop(df.index[df['Year'] == 2015], axis=0, inplace=True)
    df['Short-wave irradiation'] = df['Short-wave irradiation']/1000 #
    Convertendo a unidade de 'Wh' para 'kWh'

    # Criando uma lista de meses
    months = ['January', 'February', 'March', 'April', 'May', 'June', 'July',
             'August', 'September', 'October', 'November', 'December']

    years = df.Year.unique() # Criando uma lista de anos
    parameters = ['Short-wave irradiation', 'Wind Speed', 'Wind Speed'] #
    Parâmetros base para a análise

    size = len(years) * len(months)
    LT_y = [] # Iniciando a lista de Longa prazo

    month_y = [] # Iniciando a lista que conterà dados de cada mês em cada ano
    FS_list = [] # Iniciando a lista para o fator FS

    for j in range(len(parameters)):
        if j == 0: # Irradiação solar
            df1 = df.groupby(['Year', 'Month', 'Day'], as_index=False).sum()

```

```

        # Agrupando o dataframe em função do GHI
    elif j == 1: # Velocidade média do vento
        # Agrupando o dataframe em função do velocidade média do vento
        df1 = df.groupby(['Year', 'Month', 'Day'], as_index=False).mean()
    else: # Velocidade máxima do vento
        # Agrupando o dataframe em função do velocidade máxima do vento
        df1 = df.groupby(['Year', 'Month', 'Day'], as_index=False).max()

    for i in range (len(months)):
        xindex = df1.loc[df1['Month'] == i + 1] # Valor de Longa prazo
        # para cada mês
        x = np.sort(xindex[parameters[j]].values) # Ordenando os valores
        # para a coluna chave a ser analisada
        # Distribuição cumulativa para o Longo prazo
        y = (np.cumsum(x)-min(np.cumsum(x)))/(max(np.cumsum(x))-
            min(np.cumsum(x)))
        LT_y.append(y)

    for year in years: # Loop para cada mês em cada ano
        xindex1 = xindex.loc[df1['Year'] == year]
        x1 = np.sort(xindex1[parameters[j]].values)
        y1 = (np.cumsum(x1)-
            min(np.cumsum(x1)))/(max(np.cumsum(x1))-
            min(np.cumsum(x1)))
        month_y.append(y1)

        n = len(x1) # Numero de dias
        delta_updated = 0

        # Loop para achar o valor y(x) equivalente para o Longo
        # prazo e curto prazo e comparando ambos
        for position,value in enumerate(x1):
            inx = np.where(x == value)
            delta = abs(y1[position] - y[inx])
            delta_updated += delta[0]
        FS = delta_updated / n
        FS_list.append(FS) # Estatística de Finkelstein-Schafer
(FS)

LT_y_array = np.array(LT_y).reshape(len(parameters), len(months)) # colunas =
meses, fileiras = parâmetros
month_y_array = np.array(month_y) # 15 anos, 12 meses, 3 parâmetros

# Matrizes com o fator FS para cada parâmetro avaliado
FS_matrix_sum =
    np.array(FS_list[:size]).reshape(len(months),len(years)).transpose()

FS_matrix_mean = np.array(FS_list[size:(size *
    2)]).reshape(len(months),len(years)).transpose()
FS_matrix_max = np.array(FS_list[(size *
    2):]).reshape(len(months),len(years)).transpose()

# Criando dataframes a partir das matrizes
df_FS_sum = pd.DataFrame(data=FS_matrix_sum, index=years, columns=months)
df_FS_mean = pd.DataFrame(data=FS_matrix_mean, index=years, columns=months)

```

```

df_FS_max = pd.DataFrame(data=FS_matrix_max, index=years, columns=months)

# Fator de peso para cada parâmetro avaliado
w_sum = 0.5
w_mean = 0.25
w_max = 0.25

# Criando uma matriz com a soma ponderada, convertendo para um dataframe e
salvando em um arquivo .csv
WS_matrix = w_sum * FS_matrix_sum + w_mean * FS_matrix_mean + w_max *
    FS_matrix_max # dataframe com soma ponderada
WS_df = pd.DataFrame(data=WS_matrix, index=years, columns=months)
WS_df.to_csv(os.path.join(path2, r'South_WS_point_{}.csv'.format(z+1)),
    header=True)

# Definindo o ano típico meteorológico (TMY) para cada ponto geográfico
TMY_array = np.zeros((1, len(months)))
for i in range(len(months)):
    Tm = WS_df.iloc[:, i].idxmin()
    TMY_array[0, i] = Tm
TMY_list = TMY_array[0]
TMY_best_i = dict(zip(months, TMY_list))
TMY_values_list.append(TMY_list)

# Piores anos para um possível TMY
TMY_array2 = np.zeros((1, len(months)))
for i in range(len(months)):
    Tm2 = WS_df.iloc[:, i].idxmax()
    TMY_array2[0, i] = Tm2
TMY_list2 = TMY_array2[0]
TMY_worst_i = dict(zip(months, TMY_list2))
TMY_worst_list.append(TMY_list2)

# Escrevendo um dicionário composto do ano meteorológico típico para cada
Localização em um arquivo texto
f.write('Point {}: \n'.format(z + 1))
f.write(str(TMY_best_i) + '\n\n')
f.write('Point {}_WORST: \n'.format(z + 1))
f.write(str(TMY_worst_i) + '\n\n\n')

# Atualizando o valor total ponderado ao adicionar o valor referente a cada
ponto geográfico

```

```

# Definindo o TMY
TMY_array_best = np.zeros((1, len(months)))
for i in range(len(months)):
    Tmonth = W_total.iloc[:, i].idxmin()
    TMY_array_best[0, i] = Tmonth
TMY_list_best = TMY_array_best[0]
TMY_best = dict(zip(months, TMY_list_best))
TMY_values_list.append(TMY_list_best)

# Definindo o pior TMY possível
TMY_array_worst = np.zeros((1, len(months)))

```

```

for i in range(len(months)):
    Tmonth2 = W_total.iloc[:, i].idxmax()
    TMY_array_worst[0, i] = Tmonth2
TMY_list_worst = TMY_array_worst[0]
TMY_worst = dict(zip(months, TMY_list_worst))
TMY_worst_list.append(TMY_list_worst)

# Criando um dataframe com o TMY para cada Localização e também o global
TMY_df = pd.DataFrame(TMY_values_list, columns=months)
# Salvando o dataframe com o TMY em um arquivo .csv
TMY_df.to_csv('TMY_south.csv', header=True)

# Criando um dataframe com o pior TMY para cada Localização e também o global
TMY_df2 = pd.DataFrame(TMY_worst_list, columns=months)
# Salvando o dataframe com o TMY em um arquivo .csv
TMY_df2.to_csv('WORST_TMY_south.csv', header=True)

# Adicionando o TMY ao arquivo texto aberto e fechando o arquivo no final
f.write('General TMY:\n')
f.write(str(TMY_best) + '\n\n')
f.write('WORST General TMY:\n')
f.write(str(TMY_worst))
f.close()

```

### 7.2.3 CÓDIGO PARA A DEFINIÇÃO DO ANO TÍPICO METEOROLÓGICO GLOBAL DO MAR MEDITERRÂNEO

```

import numpy as np
import pandas as pd

```

```

path1 = r'C:\Users\Cris\Documents\Projects\Energy_resource\Mediterranean_Sea' + \
r'\Mediterranean_Sea_North\NORTH_WS_each_point\NORTH_W_total.csv'
path2 = r'C:\Users\Cris\Documents\Projects\Energy_resource\Mediterranean_Sea' + \
r'\Mediterranean_Sea_South\SOUTH_WS_each_point\SOUTH_W_total.csv'

df_North = pd.read_csv(path1, delimiter=',', index_col=0)
df_South = pd.read_csv(path2, delimiter=',', index_col=0)

```

```
df_Global = df_North + df_South
```

```

months = df_Global.columns.values.tolist()

# Definindo o TMY para cada ponto
TMY_list = []
for i in range(len(months)):
    Tm = df_Global.iloc[:, i].idxmin()
    TMY_list.append(Tm)
TMY_Global = dict(zip(months, TMY_list))

# Definindo o pior TMY para cada ponto
TMY_list2 = []
for i in range(len(months)):

```

```

    Tm2 = df_Global.iloc[:, i].idxmax()
    TMY_list2.append(Tm2)
TMY_Global_WORST = dict(zip(months, TMY_list2))

print('Best')
print(TMY_Global)
print('')
print('Worst')
print(TMY_Global_WORST)

```

#### 7.2.4 CÓDIGO PARA A VISUALIZAÇÃO GRÁFICA COMPARATIVA ENTRE OS VALORES DO ANO TÍPICO METEOROLÓGICO E OS VALORES DE LONGO PRAZO

```

import pandas as pd
import glob
import os
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
import matplotlib.gridspec as gridspec
%matplotlib inline

```

```

path = r'C:\Users\Cris\Documents\Projects\Time series MERRA 2\MEDITERRANEAN SEA NORTH'
path2 = r'C:\Users\Cris\Documents\Projects\Time series MERRA 2\MEDITERRANEAN SEA SOUTH'

all_files = glob.glob(path + "/*.csv")
all_files2 = glob.glob(path2 + "/*.csv")

li = []

for filename in all_files:
    frame = pd.read_csv(filename, skiprows=25, delimiter=';', index_col=None, header=None)
    li.append(frame)
for filename in all_files2:
    frame = pd.read_csv(filename, skiprows=25, delimiter=';', index_col=None, header=None)
    li.append(frame)

df = pd.concat(li, axis=0, ignore_index=True)

Header = ['Date', 'UT time', 'Temperature', 'Relative Humidity', 'Pressure', 'Wind Speed', 'Wind Direction', 'Rainfall', 'Snowfall', 'Snow depth', 'Short-wave irradiation']

df.columns = Header
TMYBest = [2014, 2001, 2010, 2003, 2014, 2004, 2005, 2013, 2000, 2012, 2002, 2007]
TMYWorst = [2002, 2008, 2012, 2007, 2000, 2003, 2006, 2003, 2009, 2001, 2006, 2006]

```

```

df.drop(['Temperature', 'Relative Humidity', 'Pressure', 'Wind Direction',
        'Rainfall', 'Snowfall', 'Snow depth'], axis=1, inplace=True)

df['Day'] = pd.DatetimeIndex(df['Date']).day
df['Month'] = pd.DatetimeIndex(df['Date']).month
df['Year'] = pd.DatetimeIndex(df['Date']).year

cols = df.columns.tolist()
cols = cols[-1:] + cols[-2:-1] + cols[-3:-2] + cols[:-3]
df = df.loc[:, cols]

df.drop(['Date'], axis=1, inplace=True)

df.drop(df.index[df['Year'] == 2015], axis=0, inplace=True)
df['Short-wave irradiation'] = df['Short-wave irradiation']/1000

months = ['January', 'February', 'March', 'April', 'May', 'June', 'July', 'August',
          'September', 'October', 'November', 'December']

years = df.Year.unique()
parameters = ['Short-wave irradiation', 'Wind Speed', 'Wind Speed']

df = df.groupby(['Year', 'Month', 'Day', 'UT time'], as_index=False).mean()

```

```

size = len(years) * len(months)
LT_y = [] # Inicializando a lista de Longo prazo
month_y = [] # Inicializando a lista que contém dados de cada mês de cada ano

fig = plt.figure(figsize=(24,96))
gs = gridspec.GridSpec(12, 3)

for i in range(len(parameters)):
    for j in range(len(months)):
        if i == 0:
            df1 = df.groupby(['Year', 'Month', 'Day'], as_index=False).sum()
            fig.add_subplot(gs[j, i])
        elif i == 1:
            df1 = df.groupby(['Year', 'Month', 'Day'], as_index=False).mean()
            fig.add_subplot(gs[j, i])
        else:
            df1 = df.groupby(['Year', 'Month', 'Day'], as_index=False).max()
            fig.add_subplot(gs[j, i])

    xindex = df1.loc[df1['Month'] == j + 1] # valor de Longo prazo para
    # cada mês
    x = np.sort(xindex[parameters[i]].values)
    y = (np.cumsum(x) - min(np.cumsum(x))) / (max(np.cumsum(x)) -
        min(np.cumsum(x)))
    LT_y.append(y)

    for year in years: # Loop para cada mês do ano
        xindex1 = xindex.loc[df1['Year'] == year]
        x1 = np.sort(xindex1[parameters[i]].values)
        y1 = (np.cumsum(x1) - min(np.cumsum(x1))) / (max(np.cumsum(x1)) -
            min(np.cumsum(x1))) # CDF para o Longo prazo

```

```

        month_y.append(y1)
    x = np.sort(df1.loc[df1['Month'] == j + 1][parameters[i]].values)
    x1 = np.sort(df1.loc[(df1['Month'] == j + 1) & (df1['Year'] ==
        TMYBest[j])][parameters[i]].values)
    x2 = np.sort(df1.loc[(df1['Month'] == j + 1) & (df1['Year'] ==
        TMYWorst[j])][parameters[i]].values)

    plt.plot(x, LT_y[int(j + len(months) * i)], 'k-', label='Long-Term
        (2000-2015)')
    plt.title('Month: {}'.format(months[j]))

    if i == 0:
        plt.xlabel('Daily Global Horizontal Radiation (kWh/m2/day)')
    elif i == 1:
        plt.xlabel('Mean Wind Speed (m/s)')
    else:
        plt.xlabel('Maximum Wind Speed (m/s)')
    plt.ylabel('Cumulative Distribution Function')
    plt.plot(x1, month_y[int(TMYBest[j] - years[0] + len(years) * j + size
        * i)], \ 'g*', label='Best year: {}'.format(TMYBest[j]))
    plt.plot(x2, month_y[int(TMYWorst[j] - years[0] + len(years) * j + size
        * i)], \ 'r--', label='Worst year: {}'.format(TMYWorst[j]))

```

```

df1 = df
frames = []
for i in range(len(months)):
    df2 = df1.loc[(df1['Month'] == i + 1) & (df1['Year'] == TMYBest[i])]
    frames.append(df2)

TMY_dataframe = pd.concat(frames)

TMY_dataframe = TMY_dataframe.reset_index(drop=True)

display(TMY_dataframe)

```

```
TMY_dataframe.to_csv('TMY_time_series.csv', header = True)
```

### 7.2.5 CÓDIGO PARA A ANÁLISE DOS RECURSOS SOLARES E EÓLICOS A PARTIR DO TMY COM DADOS ORIUNDOS DE SÉRIES TEMPORAIS

```

# Importing dependencies
import pandas as pd
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
import matplotlib.gridspec as gridspec
%matplotlib inline

```

```

# Loading the dataframe
TMY_dataframe = pd.read_csv('TMY_time_series.csv', delimiter=',', index_col=0)

# Creating a list with the months names
months = ['January', 'February', 'March', 'April', 'May', 'June', 'July', 'August',
          'September', 'October', 'November', 'December']

# Displaying in the notebook the first 10 rows of the dataframe
TMY_dataframe.head(10)

```

```

# Renaming the columns to indicate the units
TMY_dataframe.rename(columns={'Wind Speed': 'Wind Speed [m/s]', 'Short-wave
                             irradiation': 'GHI [kwh/m2]'}, inplace=True)

TMY_dataframe.head()

```

```

# Grouping the dataframe by month, using the sum of the variables
TMY_hist_GHI = TMY_dataframe.groupby(['Month'], as_index=False, sort=False).sum()

# Dropping the unnecessary columns
TMY_hist_GHI.drop(['Year', 'Day', 'Wind Speed [m/s]'], axis=1, inplace=True)

# Calculating the total amount of radiation
Total_GHI = TMY_hist_GHI['GHI [kwh/m2]'].sum()
print('The annual irradiation over the mediterranean is equal to: {:.3f}
      kWh/m²'.format(Total_GHI))

# Calculating the monthly average radiation
Avg_GHI = TMY_hist_GHI['GHI [kwh/m2]'].mean()
print('The monthly average irradiation over the mediterranean is equal to: {:.3f}
      kWh/m²'.format(Avg_GHI))

# Calculating the minimum value for GHI, as well as obtaining the month in which it
occurs
mi_GHI = TMY_hist_GHI['GHI [kwh/m2]'].min()
mi_month = months[TMY_hist_GHI['GHI [kwh/m2]'].idxmin(axis=0)]
print('The minimum GHI occurs in the month of {0} and it is equal to {1:.3f}
      kWh/m²'.format(mi_month, mi_GHI))

# Calculating the maximum value for GHI, as well as obtaining the month in which it
occurs
ma_GHI = TMY_hist_GHI['GHI [kwh/m2]'].max()
ma_month = months[TMY_hist_GHI['GHI [kwh/m2]'].idxmax(axis=0)]
print('The maximum GHI occurs in the month of {0} and it is equal to {1:.3f}
      kWh/m²'.format(ma_month, ma_GHI))

# Printing the histogram with the monthly data
plt.figure(figsize=(16, 5))
plt.bar(months, TMY_hist_GHI['GHI [kwh/m2]'].values)
plt.ylabel('Global Horizontal Irradiance [kWh/m2]')
plt.title('Solar Resource Annual Behaviour')

```

```
display(TMY_hist_GHI)
```

```

# Calculating the yearly and monthly solar potential

PV_length = 2 #Length of the PV panel in meters
PV_width = 0.992 #Width of the PV panel in meters
PV_panel = PV_length * PV_width # Area of a single panel

area = 400 #Area available in square meters
n_panels = area // PV_panel #Number of PV panels that fit in that area

Eff_PV = 0.1815 # Efficiency of the PV panel given by the manufacturer
SpFactor = 1 #Spacing factor for the system design, considering all panels laid
down in the ship
PR = 0,75 # Performance ratio

P_yearly = ((Total_GHI * Eff_PV) / SpFactor) * area * PR #Yearly energy generated
with PV panels
P_m_list = [] #Creating an empty List

for i in range(len(months)): # Iterating between the months
    #Monthly energy generated with PV panel
    P_m = (((TMY_hist_GHI['GHI [kwh/m2]'][i] * Eff_PV) / SpFactor) * area * PR)
    /1000
    P_m_list.append(P_m) #Appending the values into a list

P_month = dict(zip(months, P_m_list)) # Creating a dictionary with the months and
the energy generated

print('The number of panels used is: {:.0f}\n'.format(n_panels))
print('The Energy generated is: {:.3f} MWh/year\n'.format(P_yearly/1000))

```

```

# Creating a copy of the original dataframe
TMY_dataframe2 = TMY_dataframe.copy(deep=True)

# Adding a new column with the energy produced for each hour
TMY_dataframe2['Solar Energy [kWh]'] = ((TMY_dataframe2['GHI [kwh/m2]'] * Eff_PV) /
SpFactor) * area * PR

# Creating a new column with the dates, excluding the years
TMY_dataframe2['Date'] = (TMY_dataframe2['Month'].map(str) + '-' +
TMY_dataframe2['Day'].map(str) + '-' +
TMY_dataframe2['UT time'].map(str))

# Dropping the unnecessary columns
TMY_dataframe2.drop(['Year', 'UT time'], axis=1, inplace=True)

# Rearranging the columns, so the 'Date' appears first
cols = TMY_dataframe2.columns.tolist()
cols = cols[-1:] + cols[:-1]
TMY_dataframe2 = TMY_dataframe2.loc[:, cols]

# Printing the initial rows of the new dataframe
display(TMY_dataframe2.head())

AVG = TMY_dataframe2['Solar Energy [kWh]'].mean()
print('The average energy produced by the solar panels per hour is
{:.3f}'.format(AVG) + 'kW')

```

```

# Creating the figure and axes which will contain the plots
fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(2, 1, figsize=(16,10))

# Creating an auxiliary dataframe by locking in the 15th day of December to
represent a winter behaviour
df_winter = TMY_dataframe2.loc[(TMY_dataframe2['Month'] == 12) &
                              (TMY_dataframe2['Day'] == 15)]
df_winter.plot(x='Date', y='Solar Energy [kWh]', color='b', ax=ax1, label='Winter')
                #Plotting Date by Solar energy
# Creating the grid inside the plotting
ax1.grid(b=True, which='major', color='#666666', linestyle='-')
ax1.minorticks_on()
ax1.grid(b=True, which='minor', color='#999999', linestyle='-', alpha=0.2)

# Defining a title
fig.suptitle('\nWinter and Summer Solar Energy per Hour', fontsize=26)

# Creating an auxiliary dataframe by locking in the 15th day of July to represent a
summer behaviour
df_summer = TMY_dataframe2.loc[(TMY_dataframe2['Month'] == 7) &
                              (TMY_dataframe2['Day'] == 15)]
df_summer.plot(x='Date', y='Solar Energy [kWh]', color='r', ax=ax2, label='Summer')
ax2.grid(b=True, which='major', color='#666666', linestyle='-')
ax2.minorticks_on()
ax2.grid(b=True, which='minor', color='#999999', linestyle='-', alpha=0.2)

```

```

# FIRST WAY

```

```

raw_data = TMY_dataframe['Wind Speed [m/s]']
data = TMY_dataframe['Wind Speed [m/s]'].values

```

```

cdfx = np.sort(data)
x_values = np.linspace(start=min(cdfx), stop=max(cdfx), num=len(cdfx))
size_data = raw_data.size
y_values = np.zeros(shape=(size_data, 1))
count = 0
for i in x_values:
    temp = raw_data[raw_data <= i]
    value = temp.size / size_data
    y_values[count] = value
    count += 1

```

```

# -----#

```

```

# SECOND WAY

```

```

# Defining the x coordinates

```

```

x = np.sort(np.log(data))

```

```

CDF = np.arange(1, len(data)+1) / len(data) #Y coordinate for the cumulative
function going from 0 to 1

```

```

# Defining y coordinates

```

```

for i in range (len(CDF)): #CDF to y_values
    if CDF[i] == 1:

```

```

        CDF[i] = CDF[i - 1]
y = np.log(-np.log(1 - CDF))

# Plotting
plt.figure(figsize=(16,6))
plt.subplot(1, 2, 1)
plt.plot(np.sort(data), CDF, 'r-', linewidth=3)
plt.plot(x_values, y_values, 'k--')
plt.title('Cumulative Distribution Function')
plt.xlabel('V [m/s]')
plt.ylabel('F(V)')

print(x_values)
print(np.sort(data))
print(y_values)
print(CDF)

```

```

# Maximum Likelihood Estimate (MLE)
def MLE(data):

    # Defining the x coordinates
    x = np.sort(np.log(data.values))

    CDF = np.arange(1, len(data)+1) / len(data) #Y coordinate for the cumulative
    function going from 0 to 1

    # Defining y coordinates
    for i in range (len(CDF)): #CDF to y_values
        if CDF[i] == 1:
            CDF[i] = CDF[i - 1]
    y = np.log(-np.log(1 - CDF))

    # Fitting with a linear regression
    ft = np.polyfit(x, y, 1)
    kmle = ft[0] # Shape parameter
    cmle = np.exp(-(ft[1]/kmle)) # Scale parameter

    # Plotting
    plt.figure(figsize=(16,6))
    plt.subplot(1, 2, 1)
    plt.plot(np.sort(data.values), CDF, 'b-', linewidth=3)
    plt.title('Cumulative Distribution Function')
    plt.xlabel('V [m/s]')
    plt.ylabel('F(V)')

    plt.subplot(1, 2, 2)
    plt.plot(x, y, 'k.')
    plt.plot(x, np.polyval(ft, x), 'r-', label='Linear regression')
    plt.title('Logarithmic Representation for MLE')
    plt.xlabel('ln (Vi)')
    plt.ylabel('Gi')

    return (ft, kmle, cmle)

```

```
ft, k, c = MLE(TMY_dataframe['Wind Speed [m/s]'])
print('k =', round(k, 3), 'c =', round(c, 3), '\n')
```

```
def weib(data, k=3, c=5):
    x = np.sort(data.values)
    y = (k/c) * pow(x/c, k-1) * np.exp(- pow(x/c, k))

    return (x, y)
```

```
data = TMY_dataframe['Wind Speed [m/s]']

# Weibull distribution based on MLE parameters only
w_x, w_y = weib(data=data, k=k, c=c)

mx = int(max(data)) + 1
minx = int(min(data)) - 1
bins = [i for i in np.arange(minx, mx + 0.1, 0.1)]
ticks = [i for i in np.arange(minx, mx + 0.5, 0.5)]

plt.figure(figsize=(14,5))
plt.hist(data, bins=bins, histtype='bar', color='gray', edgecolor='black',
         density='True', rwidth=0.9)
plt.plot(w_x, w_y, 'r-', label='Weibull distribution MLE parameters')
plt.title('Velocities over one year')
plt.xlabel('V [m/s]')
plt.ylabel('Probability density')
plt.xticks(ticks=ticks)
plt.grid();
plt.legend();
```

```
Ma_speed = TMY_dataframe['Wind Speed [m/s]'].max()
Ma_sp_month = months[TMY_dataframe['Month'].loc[TMY_dataframe['Wind Speed [m/s]']
==
                TMY_dataframe['Wind Speed [m/s]'].max()].values[0] - 1]
print('The maximum wind speed occurs in the month of {0} and it is equal to {1:.3f}
m/s'.format(Ma_sp_month, Ma_speed))

mi_speed = TMY_dataframe['Wind Speed [m/s]'].min()
mi_sp_month = months[TMY_dataframe['Month'].loc[TMY_dataframe['Wind Speed [m/s]']
== TMY_dataframe['Wind Speed [m/s]'].min()].values[0] - 1]
print('The minimum wind speed occurs in the month of {0} and it is equal to {1:.3f}
m/s'.format(mi_sp_month, mi_speed))

avg_speed = TMY_dataframe['Wind Speed [m/s]'].mean()
print('The yearly average wind speed over the mediterranean is equal to: {:.3f}
```

```
# Printing the graph with the monthly data
plt.figure(figsize=(16, 5))
plt.plot(TMY_dataframe2['Wind Speed [m/s]'].values)
plt.hlines(y=avg_speed, xmin=0, xmax=len(TMY_dataframe2), linewidth=2, color='r')
plt.ylabel('Wind speed [m/s]')
plt.title('Wind Resource Annual Behaviour')
plt.grid();
```

```

# Grouping the dataframe by month, using the sum of the variables
TMY_wind = TMY_dataframe.groupby(['Month'], as_index=False, sort=False).mean()

# Dropping the unnecessary columns
TMY_wind.drop(['Year', 'Day', 'GHI [kwh/m2]'], axis=1, inplace=True)

display(TMY_wind)

# Printing the graph with the monthly data
plt.figure(figsize=(16, 5))
plt.plot(months, TMY_wind['Wind Speed [m/s]'].values)
plt.hlines(y=avg_speed, xmin=months[0], xmax=months[-1], linewidth=2, color='r')
plt.ylabel('Wind speed [m/s]')
plt.title('Wind Resource Annual Behaviour')
plt.grid();

```

```

# Creating the figure and axes which will contain the plots
fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(2, 1, figsize=(16,10))

#----- Creating an auxiliary dataframe by locking in the 15th day
of December to represent a winter beh
df1_winter = TMY_dataframe2.loc[(TMY_dataframe2['Month'] <= 3)]
# Plotting Date by Wind energy
df1_winter.plot(x='Date', y='Wind Speed [m/s]', color='b', ax=ax1, label='Winter')
# Creating the grid inside the plotting
ax1.grid(b=True, which='major', color='#666666', linestyle='-')
ax1.minorticks_on()
ax1.grid(b=True, which='minor', color='#999999', linestyle='-', alpha=0.2)

# Defining a title
fig.suptitle('\nWinter and Summer Wind Energy per Hour', fontsize=26)

#----- Creating an auxiliary dataframe by locking in the 15th day
of July to represent a summer behavi
df1_summer = TMY_dataframe2.loc[(TMY_dataframe2['Month'] >= 7) &
(TMY_dataframe2['Month'] <= 9)]
df1_summer.plot(x='Date', y='Wind Speed [m/s]', color='r', ax=ax2, label='Summer')
ax2.grid(b=True, which='major', color='#666666', linestyle='-')
ax2.minorticks_on()
ax2.grid(b=True, which='minor', color='#999999', linestyle='-', alpha=0.2)

```

```

# Binning
labels = []
bins = []
for i in range (140):
    Vi = round(i / 10 + 0.05, 2)
    labels.append(Vi)
    ii = i / 10
    bins.append(ii)
bins.append(ii + 0.1)

TMY_dataframe['Binned'] = pd.cut(TMY_dataframe['Wind Speed [m/s]'], bins=bins,
                                labels=labels)

display(TMY_dataframe)

```

```

x = np.linspace(0, 16, 33) # Minimum speed = 0, maximum speed = 16, number of
elements = 33
y = [0, 0, 0, 0, 100, 150, 275, 400, 575, 725, 875, 1100, 1450, 1800, 2100, 2500,
     3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5400, 5800, 6000, 6100, 6200, 6300, 6350, 6400,
     6400, 6400, 6400, 6400]

# Fitting with a polynomial regression
Pfit = np.polyfit(x[4:21], y[4:21], 3)
el_3 = Pfit[0]
el_2 = Pfit[1]
el_1 = Pfit[2]
el_0 = Pfit[3]

plt.figure(figsize=(16, 5))
plt.plot(x, y, 'y-')
plt.plot(x[4:21], np.polyval(Pfit, x[4:21]), 'k--', label='Polynomial regression:
         {0:.2f}v^3+{1:.2f}v^2+{2:.2f}v+{3:.2f}'.format(el_3, el_2, el_1, el_0))
plt.legend()
plt.grid(b=True, which='major', linestyle='-')
plt.minorticks_on()
plt.grid(b=True, which='minor', linestyle='-', alpha=0.2)

```

```

power = 5000 #W
H_height = 10
P = []
for v in labels:
    if (v >= 2 and v < 10):
        Pi = 0.15 * v ** 3 + 68.3 * v ** 2 + (-220.97) * v + 294.92
    elif (v >= 10 and v < 14):
        Pi = power
    else:
        Pi = 0
    P.append(Pi)

```

```

plt.plot(labels, P, 'b-', label='Power curve')
plt.title('Power curve')
plt.xlabel('V [m/s]')
plt.ylabel('P [W]')
plt.legend()

```

```

# Grouping
dataf = TMY_dataframe.groupby('Binned')['Binned'].count()
N = dataf.values

num = 0
den = 0

for i in range (len(N)):
    num += (N[i] * P[i])
    den += N[i]

# Average power
P_mean = round(num / den, 3)

```

```

# Capacity factor
Cp = round(P_mean / power * 100, 2)

# Total power
P_total = round(num / 1000000, 3)

print('The total energy produced in a year is {:.3f} '.format(P_total) + 'MWh')
print('The energy produced is {:.2f} '.format(P_mean) + 'Wh')
print('The capacity factor is {:.2f} '.format(Cp) + '%')

```

```

P2 = []

for v in w_x:
    if (v >= 2 and v < 10):
        Pi = 0.15 * v ** 3 + 68.3 * v ** 2 + (-220.97) * v + 294.92
    elif (v >= 10 and v < 14):
        Pi = power
    else:
        Pi = 0
    P2.append(Pi)

new_y = P2 * w_y

plt.plot(w_x, new_y, 'g-')
plt.title('Mean power')
plt.xlabel('V [m/s]')
plt.ylabel('P [W]')

# Average energy produced in Wh
Area = round(np.trapz(new_y, w_x), 3)

# Total energy produced in MWh
Total = Area * len(TMY_dataframe['Wind Speed [m/s]']) / 1000 ** 2

print('The total energy produced in a year is {:.3f} '.format(Total) + 'MWh')
print('The energy produced is {:.2f} '.format(Area) + 'Wh')

```

```

Diff_year = abs(Total - P_total) / P_total
Diff_hour = abs(Area - P_mean) / P_mean

print('The measured wind speed gives a hourly energy production of {0:.2f} and the Weibull distribution result in a hourly energy production of {1:.2f}, which mean a difference of {2:.2f} %'.format(P_mean, Area, Diff_hour * 100))

print('\nThe measured wind speed gives a yearly energy production of {0:.2f} and the Weibull distribution result in a yearly energy production of {1:.2f}, which mean a difference of {2:.2f} %'.format(P_total, Total, Diff_year * 100))

```

### 7.3 COMANDO UTILIZADO PARA O ACESSO DOS DADOS MERRA-2 ATRAVÉS DE LINHAS DE COMANDOS NO *WINDOWS*

```
NUL > .urs_cookies
```

```
wget --load-cookies C:\.urs_cookies --save-cookies C:\.urs_cookies --auth-no-challenge=on --keep-session-cookies --user=<your username> --ask-password --content-disposition -i <url.txt>
```

### 7.4 CÓDIGO *PYTHON* PARA O ACESSO À BASE METEOROLÓGICA ERA5 ATRAVÉS DE *API*

```
import cdsapi
c = cdsapi.Client()

years =
['2014', '2001', '2010', '2003', '2014', '2004', '2005', '2013', '2000', '2012', '2002', '2007'
']
months = ['01', '02', '03', '04', '05', '06', '07', '08', '09', '10', '11', '12']

for i in range (12):
    c.retrieve(
        'reanalysis-era5-single-levels',
        {
            'product_type': 'reanalysis',
            'format': 'netcdf',
            'variable': ['100m_u_component_of_wind', '100m_v_component_of_wind', '10m_u_component_of_neutral_wind', '10m_u_component_of_wind', '10m_v_component_of_neutral_wind', '10m_v_component_of_wind', 'land_sea_mask', 'mean_surface_downward_short_wave_radiation_flux', 'mean_surface_downward_short_wave_radiation_flux_clear_sky', 'surface_solar_radiation_downward_clear_sky', 'surface_solar_radiation_downwards' ],
            'year': years[i],
            'month': months[i],

            'day': ['01', '02', '03', '04', '05', '06', '07', '08', '09', '10', '11', '12', '13', '14', '15', '16', '17', '18', '19', '20', '21', '22', '23', '24', '25', '26', '27', '28', '29', '30', '31'],

            'time': ['00:00', '01:00', '02:00', '03:00', '04:00', '05:00', '06:00', '07:00', '08:00', '09:00', '10:00', '11:00', '12:00', '13:00', '14:00', '15:00', '16:00', '17:00', '18:00', '19:00', '20:00', '21:00', '22:00', '23:00']
        },
        'global_{m}_{y}.nc'.format(m=months[i], y=years[i])
    )
```

## 7.5 CÓDIGO PYTHON PARA ANÁLISE DO RECURSO SOLAR UTILIZANDO AS BASES DE DADOS MERRA-2 E ERA5

```
# Importing dependencies
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from pandas.plotting import register_matplotlib_converters
import glob
import datetime
import xarray as xr
%matplotlib inline
```

```
paths = [r'F:\MERRA-2\Solar\0_Global\Global_january_2014',
r'F:\MERRA-2\Solar\0_Global\Global_february_2001',
r'F:\MERRA-2\Solar\0_Global\Global_march_2010',
r'F:\MERRA-2\Solar\0_Global\Global_april_2003',
r'F:\MERRA-2\Solar\0_Global\Global_may_2014',
r'F:\MERRA-2\Solar\0_Global\Global_june_2004',
r'F:\MERRA-2\Solar\0_Global\Global_july_2005',
r'F:\MERRA-2\Solar\0_Global\Global_august_2013',
r'F:\MERRA-2\Solar\0_Global\Global_september_2000',
r'F:\MERRA-2\Solar\0_Global\Global_october_2012',
r'F:\MERRA-2\Solar\0_Global\Global_november_2002',
r'F:\MERRA-2\Solar\0_Global\Global_december_2007']

all_files_solar = []

# Defining all files that must be retrieved
for path in paths:
    files = glob.glob(path + "/MERRA2_300.tavg1_2d_rad_Nx.*.nc4.nc")
    all_files_solar.extend(files)

MERRA_solar = xr.open_mfdataset(all_files_solar, combine='nested',
                               concat_dim='time')
```

```
path = r'F:\ERA-5\Global_ERA'

# Defining all files that must be retrieved
files = glob.glob(path + "/global*.nc")

ERA = xr.open_mfdataset(files, combine='nested', concat_dim='time')
```

```
# Renaming the coordinate 'time' to 'original time'
MERRA_solar = MERRA_solar.rename({'time': 'original_time'})
ERA = ERA.rename({'time': 'original_time'})

# Creating a new time coordinate with a reference year of 1900 and updating the files with this new coordinate as a dimension of time
all_data = [MERRA_solar, ERA]
for data in all_data:
    l_times = []
    for i in range(len(data.original_time)):
```

```

        li = datetime.datetime(1900, data.original_time.dt.month.values[i],
                               data.original_time.dt.day.values[i],
                               data.original_time.dt.hour.values[i])

        l_times.append(li)
        data.coords['time'] = ('original_time', l_times)

MERRA_solar = MERRA_solar.swap_dims({'original_time' : 'time'})
ERA = ERA.swap_dims({'original_time' : 'time'})

print('This is the MERRA2 netCDF file:')
display(MERRA_solar)
print('\nThis is the ERA5 netCDF file:')
display(ERA)

```

```

# Changing the values of latitude and longitude for the ERA file, so it behaviour
like the MERRA file
ERA = ERA.rename({'longitude': 'lon'})

```

```

# Coordinates for the mediterranean sea
lomin = 1.25 # Minimum value of Longitude at the mediterranean sea
lomax = 37.5 # Maximum value of Longitude at the mediterranean sea
lamin = 32.0 # Minimum value of Latitude at the mediterranean sea
lamax = 44.0 # Maximum value of Latitude at the mediterranean sea

# Retrieving from the original files, only the data related to solar energy that
will be analysed
solar_merra = MERRA_solar.SWGDN.sel(lat=slice(lamin,lamax), lon=slice(lomin,lomax))
solar_clear_merra = MERRA_solar.SWGDNCLR.sel(lat=slice(lamin,lamax),
lon=slice(lomin,lomax))
solar_era = ERA.msdswwrf.sel(lat=slice(lamax, lamin), lon=slice(lomin, lomax))
solar_clear_era = ERA.msdswwrfcs.sel(lat=slice(lamax, lamin), lon=slice(lomin,
lomax))

display(solar_merra)
display(solar_clear_merra)
display(solar_era)

```

```

# Obtaining the solar radiation for each month
merra_S_monthly = solar_merra.sel(time=slice('1900-01-01',
None)).resample(time='M').sum(dim='time')
merra_SC_monthly = solar_clear_merra.sel(time=slice('1900-01-01',
None)).resample(time='M').sum(dim='time')
era_S_monthly = solar_era.sel(time=slice('1900-01-01',
None)).resample(time='M').sum(dim='time')
era_SC_monthly = solar_clear_era.sel(time=slice('1900-01-01',
None)).resample(time='M').sum(dim='time')

```

```

register_matplotlib_converters()

axes = plt.axes()
axes.figure.set_size_inches(14,8)
merra_S_monthly.mean(dim=('lon', 'lat')).plot(ax=axes, label='MERRA2',
color='blue', marker='o')

```

```

merra_SC_monthly.mean(dim=('lon', 'lat')).plot(ax=axes, label='MERRA2 clear sky',
                                              color='green', marker='o')

era_S_monthly.mean(dim=('lon', 'lat')).plot(ax=axes, label='ERA5', color='purple',
                                             marker='o')

era_SC_monthly.mean(dim=('lon', 'lat')).plot(ax=axes, label='ERA5 clear sky',
                                              color='red', marker='o')

plt.title('Annual Surface Solar Radiation')
plt.ylabel('Solar radiation [W/m²]')
plt.legend()

```

```

# Calculating the average monthly solar irradiation throughout the year
M_mean = merra_S_monthly.mean()
M_Cmean = merra_SC_monthly.mean()
E_mean = era_S_monthly.mean()
E_Cmean = era_SC_monthly.mean()

print('The monthly average irradiation over the mediterranean is:\n\n')
print('MERRA2 : ', M_mean.compute()/1000, 'kW/m²\n')
print('MERRA2 (clear sky) : ', M_Cmean.compute()/1000, 'kW/m²\n')
print('ERA5 : ', E_mean.compute()/1000, 'kW/m²\n')
print('ERA5 : (clear sky)', E_Cmean.compute()/1000, 'kW/m²')

```

```

# Obtaining the solar radiation for the whole year
merra_S_yearly = solar_merra.sel(time=slice('1900-01-01',
                                           None)).resample(time='Y').sum(dim='time')
merra_SC_yearly = solar_clear_merra.sel(time=slice('1900-01-01',
                                                    None)).resample(time='Y').sum(dim='time')
era_S_yearly = solar_era.sel(time=slice('1900-01-01',
                                         None)).resample(time='Y').sum(dim='time')
era_SC_yearly = solar_clear_era.sel(time=slice('1900-01-01',
                                                None)).resample(time='Y').sum(dim='time')

# Calculating the total solar irradiation throughout the year
M_sum = merra_S_yearly.mean()
M_Csum = merra_SC_yearly.mean()
E_sum = era_S_yearly.mean()
E_Csum = era_SC_yearly.mean()

print('The annual irradiation over the mediterranean is:\n\n')
print('MERRA2 : ', M_sum.compute()/1000, 'kW/m²\n')
print('MERRA2 (clear sky) : ', M_Csum.compute()/1000, 'kW/m²\n')
print('ERA5 : ', E_sum.compute()/1000, 'kW/m²\n')
print('ERA5 : (clear sky)', E_Csum.compute()/1000, 'kW/m²')

```

```

fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(2, 1, figsize=(16,10))

solar_merra.sel(time=slice('1900-12-15T0:00:00', '1900-12-
                          15T23:00:00')).mean(dim=('lat', 'lon')).plot(ax=ax1,
                              label='MERRA2', color='blue', marker='o')
solar_clear_merra.sel(time=slice('1900-12-15T0:00:00', '1900-12-
                              15T23:00:00')).mean(dim=('lat', 'lon')).plot(ax=ax1, label='MERRA2

```

```

        clear sky', color='green', marker='o')
solar_era.sel(time=slice('1900-12-15T0:00:00', '1900-12-
        15T23:00:00')).mean(dim=('lon', 'lat')).plot(ax=ax1, label='ERA5',
        color='purple', marker='o')
solar_clear_era.sel(time=slice('1900-12-15T0:00:00', '1900-12-
        15T23:00:00')).mean(dim=('lon', 'lat')).plot(ax=ax1, label='ERA5
        clear sky', color='red', marker='o')
ax1.grid(b=True, which='major', color='#666666', linestyle='-')
plt.ylabel('Solar radiation [W/m²]')

# Defining a title
fig.suptitle('\nWinter and Summer Examples for Solar Energy per Hour', fontsize=26)

solar_merra.sel(time=slice('1900-07-15T0:00:00', '1900-07-
        15T23:00:00')).mean(dim=('lat', 'lon')).plot(ax=ax2,
        label='MERRA2', color='blue', marker='o')
solar_clear_merra.sel(time=slice('1900-07-15T0:00:00', '1900-07-
        15T23:00:00')).mean(dim=('lat', 'lon')).plot(ax=ax2, label='MERRA2
        clear sky', color='green', marker='o')
solar_era.sel(time=slice('1900-07-15T0:00:00', '1900-07-
        15T23:00:00')).mean(dim=('lat', 'lon')).plot(ax=ax2, label='ERA5',
        color='purple', marker='o')
solar_clear_era.sel(time=slice('1900-07-15T0:00:00', '1900-07-
        15T23:00:00')).mean(dim=('lat', 'lon')).plot(ax=ax2, label='ERA5
        clear sky', color='red', marker='o')
ax2.grid(b=True, which='major', color='#666666', linestyle='-')
plt.ylabel('Solar radiation [W/m²]')
plt.legend()

```

```

axes = plt.axes()
axes.figure.set_size_inches(16,10)
era_S_monthly.groupby_bins('lat', bins=8).mean(dim=('lon', 'lat')).plot(ax=axes,
        x='time', hue='lat_bins')
era_S_monthly.mean(dim=('lon', 'lat')).plot(ax=axes, label='ERA5', color='black',
        marker='*', linestyle='dashed',
        linewidth=2)
plt.title('Solar Irradiation for Different Latitudes')
plt.ylabel('Solar Irradiation [W/m²]');

```

```

# Calculating the yearly and monthly solar potential

# List of months
months = ['January', 'February', 'March', 'April', 'May', 'June', 'July', 'August',
        'September', 'October', 'November', 'December']

PV_length = 2 #Length of the PV panel in meters
PV_width = 0.992 #Width of the PV panel in meters
PV_panel = PV_length * PV_width # Area of a single panel

area = 400 #Area available in square meters
n_panels = area // PV_panel #Number of PV panels that fit in that area

Eff_PV = 0.1815 # Efficiency of the PV panel given by the manufacturer
SpFactor = 1 #Spacing factor for the system design, considering all panels laid

```

```

down in the ship
PR = 0.75 #Performance Ratio
P_yearly_merra = ((M_sum * Eff_PV) / SpFactor) * area * PR #Yearly energy generated
with PV panels based on MERRA2
P_yearly_era = ((E_sum * Eff_PV) / SpFactor) * area * PR #Yearly energy generated
with PV panels based on ERA5

# MERRA-2
P_m_list_merra = [] #Creating an empty List
for i in range(12): # Iterating between the months
    P_m = (((merra_S_monthly.mean(dim=('lon', 'lat')).values[i] * Eff_PV) /
            SpFactor) * area * PR) / 1000 #Monthly energy
    P_m_list_merra.append(P_m) #Appending the values into a list

# ERA-5
P_m_list_era = [] #Creating an empty List
for i in range(12): # Iterating between the months
    P_m = (((era_S_monthly.mean(dim=('lon', 'lat')).values[i] * Eff_PV) /
            SpFactor) * area * PR) / 1000 #Monthly energy
    P_m_list_era.append(P_m) #Appending the values into a list

P_month_merra = dict(zip(months, P_m_list_merra)) # Creating a dictionary with the
months and the energy generated
P_month_era = dict(zip(months, P_m_list_era)) # Creating a dictionary with the
months and the energy generated

print('The number of panels used is: {:.0f}\n'.format(n_panels))
print('The Energy generated is (MERRA database): {:.3f}
MWh/year\n'.format(P_yearly_merra.values/1000000))
print('The Energy generated is (ERA database): {:.3f}
MWh/year\n'.format(P_yearly_era.values/1000000))

print('MERRA2 database:')
for item, amount in P_month_merra.items():
    print("{}: {:.3f} MWh/month".format(item, amount/1000))

print('\nERA5 database:')
for item, amount in P_month_era.items():
    print("{}: {:.3f} MWh/month".format(item, amount/1000))

AVG_merra_solar = ((solar_merra.mean() * Eff_PV) / SpFactor) * area * PR * (1/1000)
AVG_era_solar = ((solar_era.mean() * Eff_PV) / SpFactor) * area * PR * (1/1000)
print('MERRA2 --> The average energy produced by the solar panels per hour is
{:.3f} '.format(AVG_merra_solar.values) + 'kW')
print('ERA5 --> The average energy produced by the solar panels per hour is {:.3f}
'.format(AVG_era_solar.values) + 'kW')

```

## 7.6 CÓDIGO PYTHON PARA ANÁLISE DO RECURSO EÓLICO UTILIZANDO A BASE DE DADOS ERA5

```
# Importing dependencies
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from pandas.plotting import register_matplotlib_converters
import glob
import datetime
import xarray as xr
import cartopy.crs as ccrs
import warnings
%matplotlib inline
```

```
warnings.filterwarnings('ignore') #Repressing the warnings due to division by 'nan' values
```

```
path = r'F:\ERA-5\Global_ERA'

# Defining all files that must be retrieved
files = glob.glob(path + "/global*.nc")
ERA = xr.open_mfdataset(files, combine='nested', concat_dim='time')
```

```
# Renaming the coordinate 'time' to 'original time'
ERA = ERA.rename({'time': 'original_time'})

# Creating a new time coordinate with a reference year of 1900 and updating the files with this new coordinate as a dimension of time
l_times = []
for i in range(len(ERA.original_time)):
    li = datetime.datetime(1900, ERA.original_time.dt.month.values[i],
                           ERA.original_time.dt.day.values[i],
                           ERA.original_time.dt.hour.values[i])
    l_times.append(li)
ERA.coords['time'] = ('original_time', l_times)

ERA = ERA.swap_dims({'original_time' : 'time'})

print('\nThis is the ERA5 netCDF file:')
display(ERA)
```

```
# Changing the values of Latitude and Longitude for the ERA file, so it behaviour like the MERRA file
ERA = ERA.rename({'longitude': 'lon'})
```

```
# Coordinates for the mediterranean sea
lomin = 1.25 # Minimum value of longitude at the mediterranean sea
lomax = 37.5 # Maximum value of longitude at the mediterranean sea
lamin = 32.0 # Minimum value of latitude at the mediterranean sea
lamax = 44.0 # Maximum value of latitude at the mediterranean sea
```

```
LandSea = ERA.lsm.sel(lat=slice(lamax, lamin), lon=slice(lomin, lomax))

axes = plt.axes()
axes.figure.set_size_inches(18,6)
LandSea.isel(time=0).plot(ax=axes)
plt.title('Mediterranean Sea', fontsize=20)
```

```
wind_horizontal_era = ERA.u10.sel(lat=slice(lamax, lamin), lon=slice(lomin, lomax))
wind_vertical_era = ERA.v10.sel(lat=slice(lamax, lamin), lon=slice(lomin, lomax))

wind_horizontal_era.values = wind_horizontal_era.values **2
wind_vertical_era.values = wind_vertical_era.values **2

wind_era = (xr.concat(wind_horizontal_era + wind_vertical_era, dim=('time'))) **
(1/2)
```

```
# Obtaining the maximum wind speed
wind_era_max = wind_era.where(LandSea == 0).load().quantile(q=0.98, dim=('time',
                                                                    'lon', 'lat'))

# Obtaining the average wind speed for each day
wind_era_daily = wind_era.where(LandSea == 0).mean(dim=('lon', 'lat'))

# Obtaining the average wind speed for each month
wind_era_monthly = wind_era.where(LandSea == 0).sel(time=slice('1900-01-01',
                                                                None)).resample(time='M').mean(d
im='time')

print(wind_era_max.compute())
```

```
AVG_wind_era = wind_era.where(LandSea == 0).mean()

print('The average wind speed is: {:.2f} m/s'.format(AVG_wind_era.values))
```

```
fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(2, 1, figsize=(16,10))

wind_era.where(LandSea == 0).sel(time=slice('1900-01-01T0:00:00', '1900-03-
20T23:00:00')).mean(dim=('lat', 'lon')).plot(ax=ax1
, label='Winter', color='blue')
ax1.axhline(y=wind_era.where(LandSea == 0).sel(time=slice('1900-01-
01T0:00:00', '1900-03-20T23:00:00')).mean(), linewidth=3, color='r')
ax1.grid(b=True, which='major', color='#666666', linestyle='-')
ax1.set_ylabel('Wind speed [m/s]')
ax1.legend()

# Defining a title
fig.suptitle('\nWinter and Summer Examples for Wind Energy per Hour', fontsize=26)

wind_era.where(LandSea == 0).sel(time=slice('1900-07-01T0:00:00', '1900-09-
20T23:00:00')).mean(dim=('lat', 'lon')).plot(ax=ax2
, label='Summer', color='red')
ax2.axhline(y=wind_era.where(LandSea == 0).sel(time=slice('1900-07-
01T0:00:00', '1900-09-20T23:00:00')).mean(), linewidth=3, color='b')
```

```
ax2.grid(b=True, which='major', color='#666666', linestyle='-')
ax2.set_ylabel('Wind speed [m/s]')
ax2.legend()
```

```
# Reversing the y axis representing the Latitude
wind_era1 = wind_era.reindex(lat=list(reversed(wind_era.lat)))

wind_era1.groupby('time.season').mean(dim='time').plot(col='season', col_wrap=2,
                                                    size=4, robust=True)
```

```
fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(2, 1, figsize=(16,16))
wind_era.where(LandSea == 0).groupby_bins('lon',
                                          bins=6).mean(dim=('lon', 'lat')).plot(ax=ax1,
                                          x='time', hue='lon_bins')

wind_era.where(LandSea == 0).groupby_bins('lat',
                                          bins=6).mean(dim=('lon', 'lat')).plot(ax=ax2,
                                          x='time', hue='lat_bins')

wind_era_daily.plot(ax=ax1, label='ERA5', color='black', linestyle='dashed',
                   linewidth=2)

ax2.axhline(y=AVG_wind_era, linewidth=3, color='r')
fig.suptitle('Annual Wind Behaviour', fontsize=26)
ax1.set_ylabel('Wind Speed [m/s]')
ax2.set_ylabel('Wind Speed [m/s]');
```

```
fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(2, 1, figsize=(16,16))

np.seterr(divide='ignore', invalid='ignore')
wind_era_monthly.groupby_bins('lon', bins=8).mean(dim=('lon', 'lat')).plot(ax=ax1,
                                  x='time', hue='lon_bins')

np.seterr(divide='ignore', invalid='ignore')
wind_era_monthly.groupby_bins('lat', bins=8).mean(dim=('lon', 'lat')).plot(ax=ax2,
                                  x='time', hue='lat_bins')

np.seterr(divide='ignore', invalid='ignore')
wind_era_monthly.mean(dim=('lon', 'lat')).plot(ax=ax1, label='ERA5', color='black',
                                              linestyle='dashed', linewidth=2)

ax2.axhline(y=AVG_wind_era, linewidth=3, color='r')
fig.suptitle('Annual Wind Behaviour', fontsize=26)
ax1.set_ylabel('Wind Speed [m/s]')
ax2.set_ylabel('Wind Speed [m/s]');
```

```
mx = int(wind_era_daily.max()) + 1
minx = int(wind_era_daily.min()) - 1
bins = [i for i in np.arange(minx, mx + 0.1, 0.05)]

plt.figure(figsize=(14,4))
plt.hist(wind_era_daily, bins=bins, histtype='bar', color='gray',
        edgcolor='black', density=True, rwidth=0.9);
```

```

x = np.linspace(0, 16, 33) # Minimum speed = 0, maximum speed = 16, number of
elements = 33
y = [0, 0, 0, 0, 100, 150, 275, 400, 575, 725, 875, 1100, 1450, 1800, 2100, 2500,
     3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5400, 5800, 6000, 6100, 6200, 6300, 6350, 6400,
     6400, 6400, 6400, 6400]

# Fitting with a polynomial regression
Pfit = np.polyfit(x[4:21], y[4:21], 3)
el_3 = Pfit[0]
el_2 = Pfit[1]
el_1 = Pfit[2]
el_0 = Pfit[3]

plt.figure(figsize=(16, 5))
plt.plot(x, y, 'y-')
plt.plot(x[4:21], np.polyval(Pfit, x[4:21]), 'k--', label='Polynomial regression:
           {0:.2f}v^3+{1:.2f}v^2+{2:.2f}v+{3:.2f}'.format(el_3, el_2, el_1, el_0))
plt.legend()
plt.grid(b=True, which='major', linestyle='-')
plt.minorticks_on()
plt.grid(b=True, which='minor', linestyle='-', alpha=0.2)

```

```

power = 5000 #W
H_height = 10
P = []
for v in wind_era_daily.values:
    if (v >= 2 and v < 10):
        Pi = 0.15 * v ** 3 + 68.3 * v ** 2 + (-220.97) * v + 294.92
    elif (v >= 10 and v < 14):
        Pi = power
    else:
        Pi = 0
    P.append(Pi)

```

```

# Grouping
N = wind_era_daily.values
num = 0
for i in range(len(N)):
    num += P[i]

# Average power
P_mean = num / len(N)
# Capacity factor
Cp = P_mean / power * 100
# Total power
P_total = num / 1000000

print('The total energy produced in a year is : ', P_total, 'MWh')
print('The energy produced is : ', P_mean, 'Wh')
print('The capacity factor is : ', Cp, '%')

```

```

ax = plt.axes(projection=ccrs.Orthographic((lomin+lomax)/2,(lamin+lamax)/2))
ax.coastlines()
wind_era.isel(time=1).plot(ax=ax, transform=ccrs.PlateCarree(), robust=True)

```