

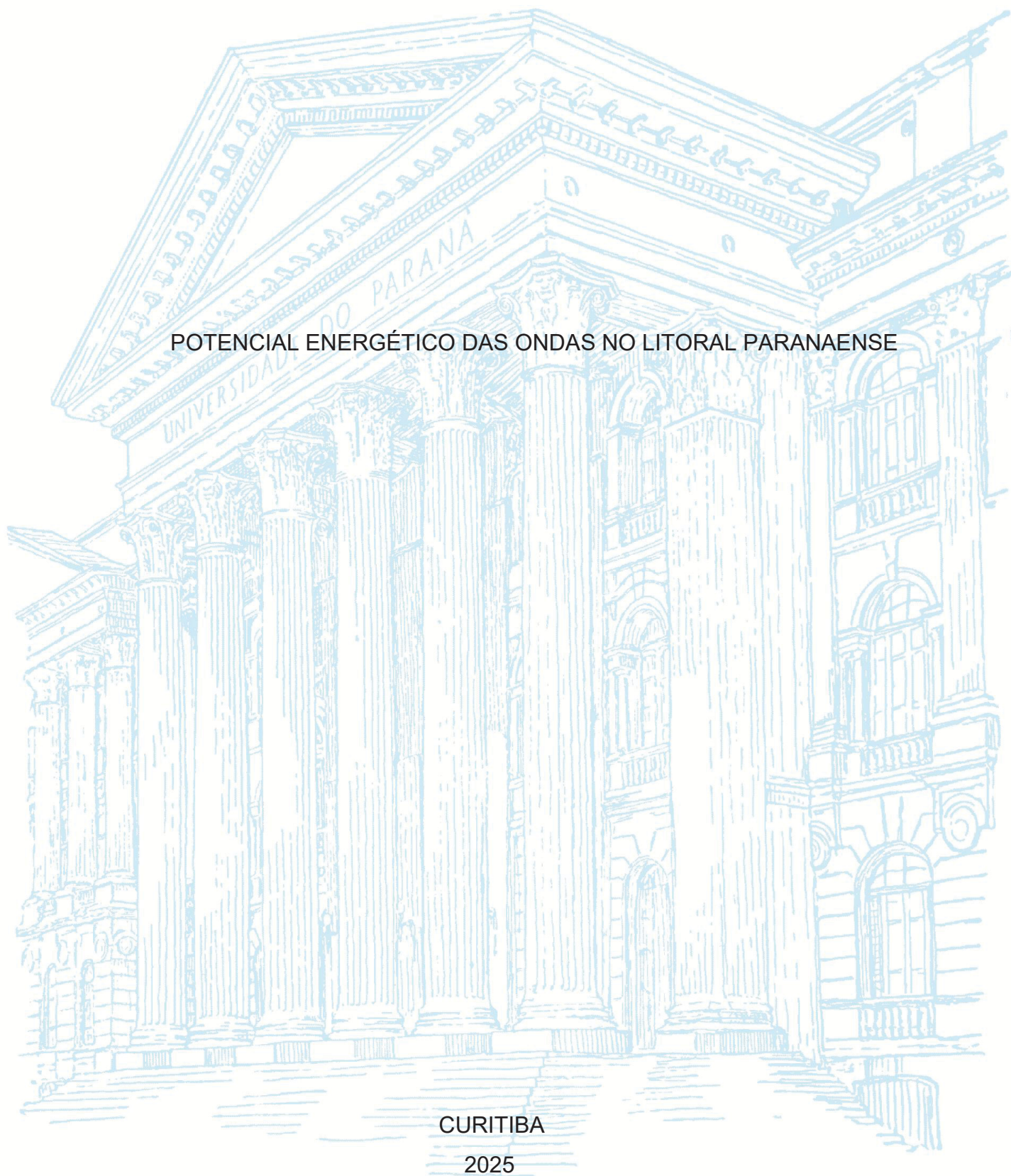
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

INGRID ELLISSA KASPRZAK

POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ONDAS NO LITORAL PARANAENSE

CURITIBA

2025



INGRID ELLISSA KASPRZAK

POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ONDAS NO LITORAL PARANAENSE

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Henrique Marco Detzel

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Kolodynskie Guetter

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo de Paula Kirinus

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Kasprzak, Ingrid Ellissa

Potencial energético das ondas no litoral paranaense. / Ingrid Ellissa Kasprzak. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Henrique Marco Detzel

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Kolodynskie Guetter

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo de Paula Kirinus

1. Energia – Fontes alternativas. 2. Conversores de energia. 3. Energia das ondas. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. III. Detzel, Daniel Henrique Marco. IV. Guetter, Alexandre Kolodynskie. V. Kirinus, Eduardo de Paula VI. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **INGRID ELLISSA KASPRZAK**, intitulada: **Potencial Energético das Ondas no Litoral Paranaense**, sob orientação do Prof. Dr. DANIEL HENRIQUE MARCO DETZEL, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 03 de Outubro de 2025.

Assinatura Eletrônica

07/10/2025 07:31:52.0

DANIEL HENRIQUE MARCO DETZEL
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

08/10/2025 08:40:39.0

EDUARDO DE PAULA KIRINUS
Coorientador(a)

Assinatura Eletrônica

07/10/2025 09:57:31.0

TOBIAS BERNWARD BLENINGER
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

07/10/2025 09:33:32.0

ALEXANDRE KOLODYNSKIE GUETTER
Coorientador(a)

Assinatura Eletrônica

07/10/2025 09:02:02.0

PEDRO VERA GUIMARAES
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA)

Assinatura Eletrônica

07/10/2025 09:50:40.0

BRUNO VICTOR VEIGA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - DEP. DE
HIDRÁULICA)

Para aqueles que sonham em ir para Lua.

AGRADECIMENTOS

A forma como eu sonho me forma como pessoa. Sonhar é o que nos move a seguir em frente. Esta jornada foi um desafio, mas, se um dia eu quero mudar o mundo, preciso continuar.

Ao Professor Eduardo Kirinus, agradeço pelos ensinamentos e pela confiança em me orientar em um tema completamente novo para mim. Ao Professor Daniel Detzel, mesmo que por um curto período, agradeço pela disponibilidade e pelo apoio sempre presentes.

Agradeço, principalmente, àqueles que acreditam em mim. Aos meus pais, por me apoiarem tanto e espero, um dia, poder retribuir à altura. Ao Caio, que me ajuda, me entende e permanece ao meu lado, mesmo nos momentos mais difíceis.

Agradeço ao PPGERHA e à UFPR, e também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, que foi essencial para o desenvolvimento desta pesquisa.

Um agradecimento especial a duas amigas que foram precisas nesses dois últimos anos: à Sabrina, por estar sempre lá para ouvir tudo o que aconteceu no meu dia, e à Lavínia, cujo clube do livro foi meu refúgio.

Faço menção também ao Luiz, à Thai e ao Niko, por sempre estarem dispostos a ajudar, e a todos aqueles que sempre estão e estarão comigo. E, para aqueles que duvidaram: sobrevivi a mais uma fase sem ingerir uma gota de café.

"There's a part of me that wishes everything could just stay the same. That we could all just stay like this forever. There's a part of me that doesn't really want to grow up. I'm not sure I'm ready for it. I'm not sure I'm ready for the world. But things can't stay the same, and they shouldn't. No matter how scary it is, we have to move on, and we have to grow up, because things... well, they might just change for the better. So we have to be brave. And if our dreams get broken along the way... we have to make new ones from the pieces."

- Erin Quinn, Derry Girls, T3.E7

RESUMO

Este trabalho avaliou a viabilidade do aproveitamento energético das ondas no litoral do Paraná, combinando modelagem numérica e uma análise econômica preliminar. Para estimar o potencial ondulatório e sua variabilidade espaço-temporal, foi utilizado o módulo TOMAWAC, forçado por condições de contorno derivadas do reanálise ERA5, considerando o ano de 2014. A confiabilidade do modelo foi verificada por meio de calibração/validação com dados observacionais da boia PR-1 (SiMCosta), comparando séries de altura significativa (H_s), período de pico (T_p) e direção de pico (D_p) por análises gráficas e métricas estatísticas. Os resultados indicaram que o modelo reproduz de forma consistente o comportamento geral do clima de ondas na área de estudo, caracterizado por regime fortemente direcional, com predominância de incidência no quadrante Leste (principalmente entre E e SE). As métricas estatísticas apontaram erros moderados para H_s (RMSE = 0,704 m; MAE = 0,636 m) e maiores para T_p (RMSE = 2,072 s; MAE = 1,269 s), além de concordância satisfatória para D_p (RMSE = 17,2°; MAE = 12,2°; ER = 6,8%). O mapeamento espacial evidenciou aumento gradual de H_s e da potência das ondas no sentido costa-mar aberto, associado à maior profundidade e exposição ao swell de sul/sudeste. Três pontos de interesse foram analisados (Matinhos, Praia de Leste e Ilha do Mel), sendo a Praia de Leste o sítio mais energético e variável, com potência média anual de $3,57 \text{ kW m}^{-1}$, desvio-padrão de $3,42 \text{ kW m}^{-1}$ e pico máximo de $40,846 \text{ kW m}^{-1}$. Observou-se sazonalidade marcada do recurso (MV = 0,81), com máximos no outono-inverno (pico em agosto) e mínimos no verão (janeiro), implicando diferentes condições de operação e manutenção ao longo do ano. A conversão do recurso em atendimento elétrico foi estimada para dois conversores representativos, Eco Wave Power (EWP) e CETO-6, em cenários realista e otimista, mostrando que o atendimento mensal em unidades consumidoras é condicionado principalmente pela potência nominal e pela saturação da potência de saída. Por fim, foi realizada uma análise econômico-energética preliminar via custo nivelado de energia (LCOE) com hipóteses paramétricas, permitindo comparar cenários e identificar sensibilidades a custos e financiamento. Apesar das limitações associadas ao uso de uma série anual única e à simplificação das etapas de conversão e custos (sem incorporar disponibilidade, perdas adicionais e orçamentos), os resultados sustentam a hipótese de que o litoral paranaense dispõe de recurso ondulatório compatível com aplicações de pequena a média escala, especialmente quando se considera infraestrutura costeira existente e dimensionamento tecnológico ajustado ao regime local.

Palavras-chaves: Energia das ondas; potencial energético; TOMAWAC; ERA5-ECMWF; conversor de energia.

ABSTRACT

This study assessed the feasibility of wave energy exploitation along the coast of Paraná State, combining numerical modelling and a preliminary economic analysis. To estimate the wave energy potential and its spatio-temporal variability, the TOMAWAC module was used, forced by boundary conditions derived from the ERA5 reanalysis, considering the year 2014. Model reliability was evaluated through calibration/validation against observational data from the PR-1 buoy (SiMCosta), comparing time series of significant wave height (H_s), peak period (T_p), and peak direction (D_p) using graphical analyses and statistical performance metrics. The results indicate that the model consistently reproduces the overall wave-climate behaviour in the study area, which is characterized by a strongly directional regime, with predominant incidence from the eastern sector (mainly between E and SE). The statistical metrics show moderate errors for H_s (RMSE = 0,704 m; MAE = 0,636 m) and larger errors for T_p (RMSE = 2,072 s; MAE = 1,269 s), as well as satisfactory agreement for D_p (RMSE = 17,2°; MAE = 12,2°; ER = 6,8%). Spatial mapping revealed a gradual increase in H_s and wave power from nearshore to offshore, associated with greater depth and exposure to S–SE swell. Three sites of interest were analysed (Matinhos, Praia de Leste, and Ilha do Mel), with Praia de Leste being the most energetic and variable site, presenting an annual mean wave power of 3,57 kW m⁻¹, a standard deviation of 3,42 kW m⁻¹, and a maximum peak of 40,846 kW m⁻¹. A marked seasonality of the resource was observed (MV = 0,81), with maxima in autumn–winter (peak in August) and minima in summer (January), implying different operational and maintenance conditions throughout the year. Resource-to-electricity conversion was estimated for two representative converters, Eco Wave Power (EWP) and CETO-6, under realistic and optimistic scenarios, showing that the monthly supply in residential consumer units is mainly constrained by the device rated power and by saturation of the electrical output. Finally, a preliminary techno-economic assessment was conducted through the levelized cost of energy (LCOE) using parametric assumptions, enabling scenario comparisons and the identification of sensitivities to costs and financing. Despite limitations associated with the use of a single-year record and simplifications in the conversion and cost stages (without incorporating availability, additional losses, and site-specific budgets), the results support the hypothesis that the Paraná coast has a wave resource compatible with small- to medium-scale applications, especially when existing coastal infrastructure is leveraged and technology sizing is adapted to the local wave regime.

Key-words: Wave energy; energy potential; TOMAWAC; ERA5-ECMWF; energy Converter.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – OFERTA INTERNA DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTE. . . .	17
FIGURA 2 – INVESTIMENTO ANUAL EM COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS E ENERGIA LIMPA, 2015-2023.	22
FIGURA 3 – CLASSIFICAÇÃO DAS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE ENERGIA RENOVÁVEL E SUAS APLICAÇÕES.	24
FIGURA 4 – GEOMETRIA DE UMA ONDA LINEAR.	31
FIGURA 5 – ESQUEMA INDICANDO AS ENERGIAS POTENCIAL E CINÉTICA DAS ONDAS, ASSOCIADAS À ALTURA DA ONDA E AO MOVIMENTO ORBITAL DAS PARTÍCULAS DE ÁGUA.	32
FIGURA 6 – ALGUNS CONVERSORES DE ENERGIA DE ONDAS. VER RELAÇÃO DE PRINCÍPIOS FÍSICOS E POSICIONAMENTO NA TABELA 4.	36
FIGURA 7 – CLASSIFICAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS (WEC).	38
FIGURA 8 – ECO WAVE POWER EM GILBRALTAR	39
FIGURA 9 – DUAS PRINCIPAIS VARIANTES DE FLUTUADORES.	40
FIGURA 10 – ECO WAVE POWER INSTALAÇÕES.	42
FIGURA 11 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO ECO WAVE POWER . .	43
FIGURA 12 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO CETO 5	45
FIGURA 13 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO CETO 6	46
FIGURA 14 – PROTÓTIPO CETO	47
FIGURA 15 – VARIÁVEIS ECONÔMICAS QUE DEFINEM O CUSTO NIVELADO DE ENERGIA PARA CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS.	48
FIGURA 16 – POTÊNCIA TEÓRICA BRUTA ANUAL DAS ONDAS GLOBAIS PARA TODOS OS PONTOS DA GRADE WORLDWAVES AO REDOR DO GLOBO.	53
FIGURA 17 – DISTRIBUIÇÃO GLOBAL DO WEI.	54
FIGURA 18 – POTENCIAL DE ENERGIA POR ESTADO COSTEIRO (GW/km).	56
FIGURA 19 – MAPA DA ÁREA DE ESTUDO COM A PROFUNDIDADE (M) LOCAL.	58
FIGURA 20 – MALHA NUMÉRICA DA ÁREA DE ESTUDO.	59
FIGURA 21 – PONTOS DA GRADE GLOBAL DO ERA5 NA ÁREA DE ESTUDO. CONTORNO DA MALHA E A LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO PR-1 (PONTO AMARELO).	63
FIGURA 22 – ESPIGÃO LOCALIZADO NA CIDADE DE MATINHOS - PR	67

FIGURA 23 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS DADOS DE H_s , T_p E D_p DO ERA5 E DA ESTAÇÃO PR-1.	70
FIGURA 24 – ROSA DE ALTURA DAS ONDAS DOS DADOS DA ESTAÇÃO PR-1 (SiMCosta) E DOS DADOS DO ERA5 (TOMAWAC). .	71
FIGURA 25 – ROSA DE PERÍODO DE ONDAS DOS DADOS DA ESTAÇÃO PR-1 (SiMCosta) E DOS DADOS DO ERA5 (TOMAWAC).	72
FIGURA 26 – HISTOGRAMA DA ALTURA SIGNIFICATIVA DA ONDA DA ESTAÇÃO PR-1 (SiMCosta) E DOS DADOS DO ERA5 (TOMAWAC) .	73
FIGURA 27 – HISTOGRAMA DE PERÍODO DA ONDA DA ESTAÇÃO PR-1 (SiMCosta) E DOS DADOS DO ERA5(TOMAWAC).	73
FIGURA 28 – HISTOGRAMA DE DIREÇÃO DE PICO DA ESTAÇÃO PR-1 (SiMCosta) E DOS DADOS DO ERA5(TOMAWAC)	74
FIGURA 29 – BOXPLOT DA ESTAÇÃO PR-1 (SiMCosta) E DOS DADOS DO ERA5 (TOMAWAC)	75
FIGURA 30 – MÉDIA DO H_s (M) e T_p (S) NA ÁREA DE ESTUDO.	78
FIGURA 31 – MÉDIA DA ENERGIA DAS ONDAS (kW m^{-1}) NA ÁREA DE ESTUDO.	78
FIGURA 32 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS ESCOLHIDOS DENTRO DA ÁREA DE ESTUDO. P1: MATINHOS; P2: PRAIA DE LESTE; P3: ILHA DO MEL	80
FIGURA 33 – POTÊNCIA MÁXIMA DA ONDA NOS PONTOS SELECIONADOS.	81

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – VALORES DE CUSTO DE ENERGIAS TERRESTRES RENOVÁVEIS.	26
TABELA 2 – VALORES DE CAPEX, O&M, CVU, FATOR DE CAPACIDADE E VIDA ÚTIL PARA DIFERENTES TECNOLOGIAS.	27
TABELA 3 – VALORES DE CUSTO DE ENERGIAS MARINHAS RENOVÁVEIS.	30
TABELA 4 – DEFINIÇÃO DE CONVERSORES DE ENERGIA DE ACORDO COM SEU PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.	35
TABELA 5 – POTENCIAL DE ENERGIA DOS ESTADOS COSTEIROS BRASILEIROS	55
TABELA 6 – Resumo da configuração do modelo de ondas (TOMAWAC). . . .	62
TABELA 7 – COMPARAÇÃO DOS CONVERSORES	66
TABELA 8 – RESULTADOS DOS PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA OS DADOS DE H_s E T_p DO ERA5 E ESTAÇÃO PR-1.	75
TABELA 9 – RESULTADOS DOS PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA OS DADOS DE D_p DO ERA5 E ESTAÇÃO PR-1.	77
TABELA 10 – DADOS DE POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ONDAS (kW m^{-1}) .	80
TABELA 11 – CENÁRIOS REALISTA E OTIMISTA DO EWP EM MATINHOS . .	83
TABELA 12 – CENÁRIOS REALISTA E OTIMISTA DO EWP EM PRAIA DE LESTE	83
TABELA 13 – HIPÓTESES (VALORES HIPOTÉTICOS REALISTAS, EM R\$ CORRENTES, SEM INFLAÇÃO) PARA CÁLCULO DO LCOE.	84
TABELA 14 – LCOE - EWP (100 kW, MATINHOS) PARA CENÁRIOS BAIXO/MÉDIO/ALTO.	85
TABELA 15 – LCOE - CETO (200 kW, PRAIA DE LESTE) PARA CENÁRIOS BAIXO/MÉDIO/ALTO.	85
TABELA 16 – CONSUMO E NÚMERO DE CONSUMIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA SEGUNDO CLASSES EM PONTAL DO PARANÁ - 2022.	108
TABELA 17 – CONSUMO E NÚMERO DE CONSUMIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA SEGUNDO CLASSES EM MATINHOS - 2022.	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APDL	Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo
SASA	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
WERATLAS	Atlas de Recursos Energéticos Europeu
BEN	Balanço Energético Nacional
SBB	Baía Sudeste do Brasil
CHC	Canadian Hydraulic Centre
R	Coeficiente de Correlação de Pearson
PRO	Osmose reversa com pressão retardada (<i>Pressure Retarded Osmosis</i>)
CVU	Custo Variável Unitário
LCOE	Custo Nivelado de Energia (<i>Levelized Cost of Energy</i>)
O&M	Custos de Operação e Manutenção (<i>Operation and Maintenance</i>)
CDF	Dinâmica dos Fluidos Computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
ER	Erro Relativo
ETIPOCEAN	European Technology & Innovation Platform for Ocean Energy
EWP	Eco Wave Power
ECMWF	Centro Europeu para Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>)
IRENA	International Renewable Energy Agency
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
WEI	Índice de Explorabilidade das Ondas (<i>Wave Exploitability Index</i>)
SI	Índice de Espelhamento (<i>Skill Index</i>)
SS	Inclinação Quadrática Média (<i>Sum of Squares</i>)
NE	Nordeste

ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
OTEC	Conversão de energia térmica dos oceanos (<i>Ocean Thermal Energy Conversion</i>)
PTO	Power Take-Off
PWEP	Perth Wave Energy Project
RED	Eletrodiálise reversa (<i>Reverse Electrodialysis</i>)
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio (<i>Root Mean Square Error</i>)
rViés	Viés Relativo
SiMCosta	Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira
SIU	Sistema Internacional de Unidades
SBS	Plataforma Sul do Brasil
SST	Temperatura da superfície do mar
TURH	Título de Utilização de Recursos Hídricos
TOMAWAC	TELEMAC-Based Operational Model Addressing Wave Action Computation
OWC	Coluna d'água oscilante (<i>Oscillating Water Column</i>)
PV	Fotovoltaico
WAM	Wave Model
WECs	Conversores de energia das ondas (<i>Wave Energy Converters</i>)
ESCWA	United Nations Economic and Social Commission for Western Asia
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de carbono
D_m	Direção média das ondas
D_p	Direção de pico das ondas
E	Energia das ondas por metro quadrado (J/m^2)
$E(f, \theta)$	Espectro de energia das ondas
E_{anual}	Energia elétrica gerada por ano (kWh/ano)
E_{dia}	Energia elétrica diária estimada do conversor (kWh/dia)
$E_{\text{mês}}$	Energia elétrica gerada por mês (kWh/mês)
E_t	Expectativa de geração de energia no tempo t (MWh)
F_t	Custo de combustível no tempo t ($\text{R\$}$)
f	Frequência da onda (Hz)
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
H	Altura da onda
H_s	Altura significativa das ondas
I_t	Custo de investimento no tempo t ($\text{R\$}$)
J	Densidade de potência das ondas ($\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$)
$\bar{J}$	Densidade de potência média das ondas ($\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$)
J_{max}	Densidade de potência máxima das ondas ($\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$)
k_x	Componente x do vetor número de onda
k_y	Componente y do vetor número de onda
kW	Quilowatt
$\dot{k}_x$	Taxa de variação do componente x do número de onda
$\dot{k}_y$	Taxa de variação do componente y do número de onda

λ	Comprimento de onda (m)
L	Largura efetiva de captação do conversor (m)
M_t	Custo de manutenção no tempo t (R\$)
MWh	Megawatt-hora
mod	Dado modelado
mod_{mean}	Média dos dados modelados
mod_{var}	Variância dos dados modelados
N	Espectro de onda direcional
$N(f, \theta)$	Espectro direcional em função da frequência e direção
N_2O	Óxido nitroso
n	(i) Quantidade de dados observados (estatística); (ii) vida útil considerada do projeto (anos)
obs	Dado observado
obs_{mean}	Média dos dados observados
obs_{var}	Variância dos dados observados
P_{ano}	Média anual do parâmetro para todo o período
P_{inst}	Potência instalada do arranjo/conversor (kW)
P_{M1}	Média do parâmetro no mês mais alto
P_{M4}	Média do parâmetro no mês mais baixo
P_{inc}	Potência incidente no conversor ($J \cdot L$) (kW)
P_{nom}	Potência nominal do conversor (kW)
P_{out}	Potência de saída considerada ($\min(P_{inc}, P_{nom})$) (kW)
r_s	Coeficiente de Correlação de Spearman
r	Taxa de desconto real ao ano (1/ano)
$Res_{mês}$	Residências atendidas por mês (UC/mês)
ρ	Massa específica da água (kg/m ³) — para água do mar, 1.030 kg/m ³

STD	Desvio padrão
T	Período da onda (s)
T_m	Período médio das ondas (s)
T_p	Período de pico das ondas (s)
TW	Terawatt
TWh	Terawatt-hora
TWh/ano	Terawatt-hora por ano
U	Componente x do vento
V	Componente y do vento
α	Percentual anual do CAPEX utilizado para estimar o OPEX anual (adimensional)
$\bar{X}$	Média amostral
c_{kW}	Custo específico de investimento por kW instalado (R\$/kW)
CAPEX	Investimento total de capital (R\$)
CRF	Fator de recuperação de capital (adimensional)
$OPEX_{\text{anual}}$	Despesa operacional anual (R\$/ano)
$\overline{P_{\text{out}}}$	Potência média de saída do conversor ao longo do ano (kW)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	HIPÓTESE	19
1.2	OBJETIVO GERAL	19
1.2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	ENERGIAS RENOVÁVEIS	23
2.1.1	FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA MARINHA	27
2.2	ENERGIA DAS ONDAS	30
2.2.1	CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDA EM ENERGIA ELÉTRICA	32
2.2.2	CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS	33
2.2.2.1	HISTÓRICO	33
2.2.2.2	DISPOSITIVOS DE COLUNA D'ÁGUA OSCILANTES (OWC)	35
2.2.2.3	DISPOSITIVOS DE CORPOS OSCILANTES	36
2.2.2.4	DISPOSITIVOS DE GALGAMENTO	37
2.2.3	<i>ECO WAVE POWER</i>	39
2.2.4	<i>POINT ABSORBER - CETO SYSTEM</i>	43
2.2.4.1	CETO 5	44
2.2.4.2	CETO 6	44
2.3	SISTEMAS DE EXTRAÇÃO DE ENERGIA (<i>POWER TAKE-OFF</i>) PARA CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS	47
2.4	DESAFIOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS	49
2.5	MODELOS E PREVISÃO	51
2.6	MODELAGEM DAS ONDAS	52
2.7	POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ONDAS	52
2.7.1	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	52
2.8	FATORES DETERMINANTES	57
3	MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1	MALHA COMPUTACIONAL	58
3.2	MODELO ONDULATÓRIO - TOMAWAC	59
3.3	CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO	61
3.4	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DE ONDAS	62
3.5	ECO WAVE POWER E CETO-6	66
3.6	MÉTODOS E ANÁLISE DE DADOS	66

		16
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4.1	VALIDAÇÃO DO MODELO DE ONDAS	70
4.2	RESULTADOS DO MODELO ONDULATÓRIO	77
4.3	VARIABILIDADE MENSAL	80
4.4	TAXAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	82
4.5	CUSTO NIVELADO DE ENERGIA (LCOE): PROCEDIMENTOS E RESULTADOS	84
5	CONCLUSÕES	87
5.1	TRABALHOS FUTUROS	91
	Referências	92
	APÊNDICES	107
APÊNDICE A	CONSUMO E NÚMERO DE CONSUMIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA	108

1 INTRODUÇÃO

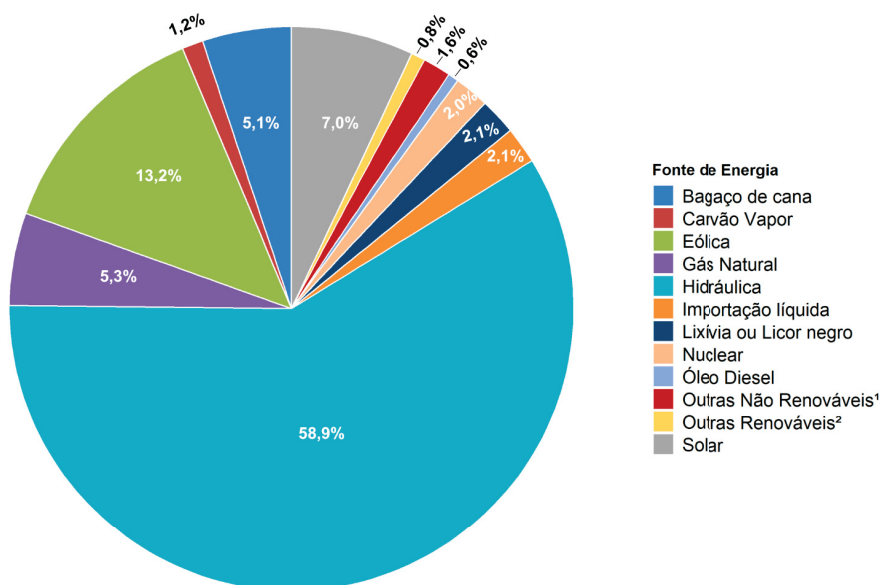
O uso de energias limpas e renováveis e o desenvolvimento de suas formas de conversão estão em voga como alternativa para atender as altas taxas de consumo de energia elétrica e suprir os impactos causados pelo consumo de combustíveis fósseis, principais responsáveis da emissão de gases de efeito estufa.

De acordo com o relatório do Balanço Energético Nacional (BEN, 2024) em 2023, cerca de 89% da oferta de energia elétrica interna no Brasil é renovável, destacando a majoritária prevalência de energia hídrica que corresponde a 58,9% da oferta (BEN, 2024). Entretanto, essa fonte renovável, em seu processo de instalação, muitas vezes acaba gerando impactos negativos que influenciam diretamente o meio ambiente (De Queiroz *et al.* 2013). Por exemplo, a construção de represas inunda áreas de vegetação, altera a hidrodinâmica dos rios, prejudica a fauna e a flora locais e interfere na ocupação humana (De Queiroz *et al.* 2013).

Além da energia hídrica, no Brasil destacam-se outras fontes renováveis, como a energia eólica (13,2%), energia solar (7,0%) e bagaço de cana (5,1%). Entre as fontes não renováveis, o gás natural representou 5,3% da oferta, seguido pela energia nuclear com 2,0% e carvão a vapor com 1,2% (Figura 1) (BEN, 2024). Outras fontes, como licor negro e outras renováveis, completam a matriz, evidenciando a diversificação de fontes energéticas e a predominância de recursos (BEN, 2024).

As energias renováveis que são realmente oriundas de fontes consideradas

FIGURA 1 – OFERTA INTERNA DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTE.



¹Inclui: Lenha, Biodiesel e Outras renováveis; ²Inclui: Óleo Combustível, Gás de Coqueria, Outras Secundárias e Outras Não-Renováveis.

FONTE: Figura adaptada de BEN (2024).

"limpas" causam o mínimo de impacto possível ao meio ambiente, tais como a solar, eólica, biomassa, térmica dos oceanos e a energia mecânica dos oceanos (proveniente das ondas e correntes) (Cruz; Sarmiento, 2004). Essas energias no Brasil correspondem apenas a 0,8% de todas as fontes de energia apresentadas no relatório de 2024 do BEN, principalmente pelo fato que ainda são desconhecidas, pouco exploradas, de elevado custo e com perdas energéticas em sua conversão (Bane *et al.* 2017).

Entre essas fontes, a energia das ondas tem se destacado como alternativa promissora. Além de gerar eletricidade de forma limpa e contínua, sistemas bem posicionados de conversão podem atuar como estruturas de proteção costeira, reduzindo processos erosivos e contribuindo para a adaptação às mudanças climáticas (Foteinis, 2022). Os conversores de energia das ondas podem fornecer uma fonte de energia limpa e renovável para fazendas aquícolas, que cada vez mais estão avançando para áreas *offshore* (IRENA, 2014).

Estudos recentes apontam uma tendência global de crescimento do potencial energético das ondas, impulsionada principalmente pelo aquecimento dos oceanos e seus efeitos sobre os ventos e a altura das ondas. Análises de séries temporais (1951–2020) revelam crescimento consistente em variáveis como temperatura da superfície do mar (SST), velocidade do vento a 10 metros (U_{10}), altura significativa das ondas (H_s) e potência das ondas (P_{onda}), com um incremento médio anual de 0,54% (Chen, 2024).

Estudar e investir no potencial energético das ondas pode trazer inúmeros benefícios. Além de contribuir para a sustentabilidade ambiental, essa forma de energia renovável pode impulsionar o desenvolvimento econômico e a segurança energética, alinhando-se aos objetivos globais de redução das emissões de carbono e promoção de um futuro mais sustentável. A importância deste estudo reside na oportunidade pioneira de explorar a energia das ondas no Brasil, representando uma chance de diversificar ainda mais a matriz energética brasileira, com uma fonte renovável promissora que ainda é pouco explorada no país.

Esta pesquisa avalia o potencial energético das ondas no litoral do Paraná, considerando os processos de conversão e a disponibilidade do recurso. A principal preocupação é determinar se o recurso ondulatório apresenta potencial de aproveitamento como fonte de energia renovável na região. A pesquisa é de cunho quantitativo, concentrando-se na eficiência energética e no potencial de geração de energia das ondas no litoral paranaense. Assim, a pergunta central da pesquisa é: "A potência das ondas no litoral paranaense é suficiente para a implementação de um conversor de energia das ondas?"

Este estudo está inserido na necessidade de diversificação da matriz energética brasileira, reduzindo a dependência de fontes fósseis e contribuindo para os Objetivos

de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU). Além disso, há uma carência de estudos sobre o potencial energético das ondas no litoral do Paraná, tornando esta pesquisa pioneira na região.

Para definir a viabilidade da energia das ondas no litoral paranaense, a pesquisa avaliará o potencial energético disponível, considerando a potência das ondas e a eficiência de conversão em eletricidade. Também serão analisados o custo-benefício, incluindo os custos de instalação e operação, o impacto ambiental para assegurar sustentabilidade, e a adequação da infraestrutura local para suportar os sistemas de conversão. Com base nesses fatores, será possível determinar se o litoral paranaense oferece condições favoráveis para a implementação de um conversor de energia das ondas.

1.1 HIPÓTESE

O litoral do Paraná apresenta potencial energético das ondas suficiente para sustentar o aproveitamento elétrico por tecnologias de conversão na região.

1.2 OBJETIVO GERAL

Realizar um mapeamento do potencial energético das ondas no litoral paranaense para viabilizar a instalação de um conversor de ondas na região.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar o potencial energético das ondas identificando sua variabilidade espacial e temporal, assim como, as regiões com os maiores e menores potenciais energéticos, e sua variação durante um ano;
- Estimar e comparar as taxas de conversão de energia elétrica nas regiões escolhidas considerando as especificações de dois possíveis conversores;
- Analisar o custo-benefício da implementação dos conversores na região, como, instalação, operação e infraestrutura.

Para atingir esses objetivos, será utilizado um modelo de simulação de ondas, que representará os processos ondulatórios e potencial energético com precisão. Serão mapeadas as regiões com maior potencial, considerando a sazonalidade e tendências de curto prazo.

De acordo com os objetivos é possível classificar a atual pesquisa como exploratória e descritiva. É exploratória por explorar o do potencial energético das ondas na região implicando em uma abordagem inicial de pesquisa para entender o fenômeno

e suas características. A pesquisa também inclui objetivos relacionados à descrição e análise das características das ondas. Essa abordagem visa descrever em detalhes as características do potencial energético das ondas e seus efeitos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Devido às mudanças climáticas e seus impactos, especialmente relacionados a emissão de gases de efeito estufa pelo consumo de combustíveis fósseis, o interesse por fontes de energia renovável e limpa tem crescido exponencialmente, assim como o desenvolvimento de suas formas de conversão, que assumem cada vez mais importância. As energias renováveis se apresentam como uma alternativa viável para o atendimento da demanda sem emissões de gases de efeito estufa (EPE, 2021).

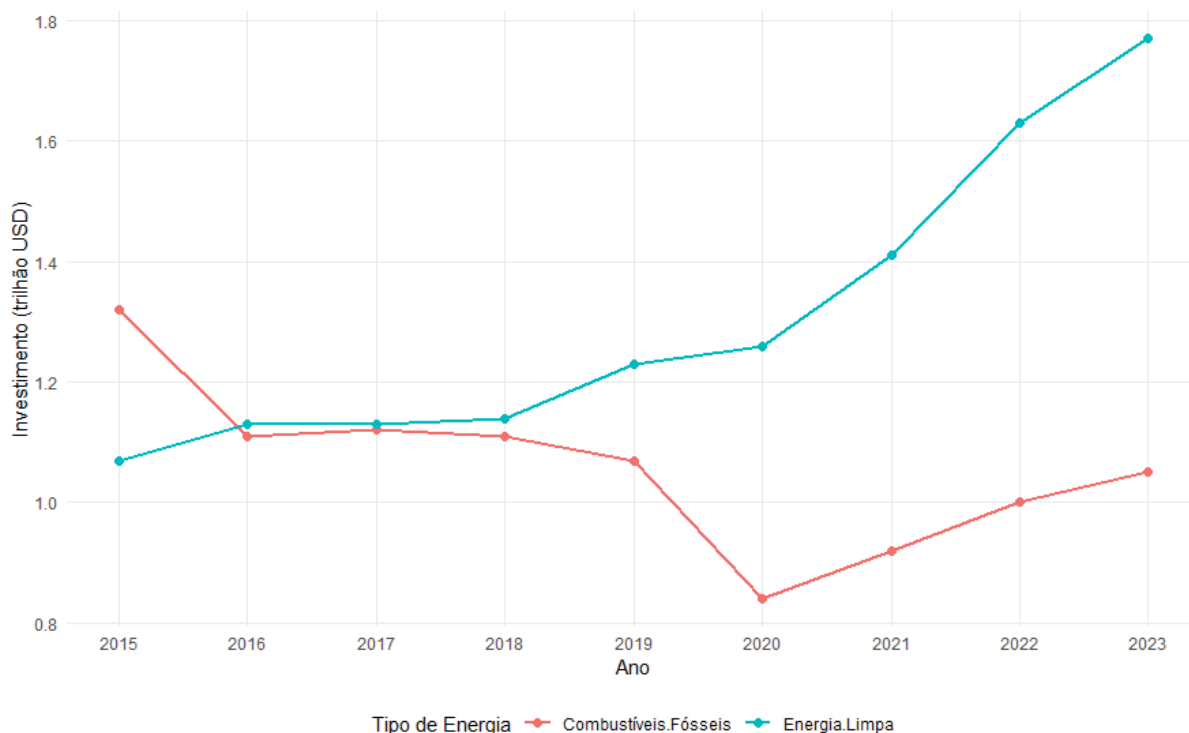
A demanda por energia está crescendo em muitos países, à medida que as pessoas ficam mais ricas e as populações aumentam (Ritchie *et al.* 2020). Apesar dos impactos ambientais e de saúde associados aos combustíveis fósseis (Curtin *et al.* 2019; Yang *et al.* 2021), eles ainda representam a principal fonte de energia global, devido à infraestrutura consolidada e ao custo competitivo em muitas regiões. Gases como metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e óxido nitroso (N₂O), são os principais responsáveis pelo efeito estufa e a emissão de CO₂ está ligada principalmente ao uso de combustíveis fósseis (Collado, 2023). Se não houver alterações nas fontes de energia, a atual projeção com a emissão de gases de efeito de estufa resultará em alterações climáticas, graves problemas de saúde, subida do nível do mar, alterações no ecossistema (Olabi; Abdelkareem, 2022).

Em 2022, cerca de 82% da energia primária mundial ainda era proveniente de combustíveis fósseis (IEA, 2023) demonstrando a necessidade de acelerar a transição para fontes limpas. Estudos indicam que, sem reduções substanciais nas emissões de carbono, a temperatura média global poderá aumentar entre 2,6°C e 4,8°C até 2100 (Lee *et al.* 2021), intensificando eventos climáticos extremos, como ondas de calor, secas prolongadas e tempestades mais intensas.

O principal impulsionador da transição energética é a ameaça existencial representada pelas mudanças climáticas. As emissões de CO₂ relacionadas à energia representam aproximadamente dois terços de todas as emissões globais de gases de efeito estufa, tornando a transformação dos sistemas energéticos absolutamente crítica para a estabilização do clima (IPCC, 2014). O Acordo de Paris, em 2015, estabeleceu como meta limitar o aumento da temperatura média global a menos de 2°C, tentando restringir a 1,5°C. Para atingir esse objetivo, é necessário zerar as emissões de CO₂ do setor energético nas próximas décadas, com reduções ainda mais rápidas exigidas para alcançar a meta de 1,5°C (Gielen *et al.* 2019).

A transição energética tem se refletido nos investimentos globais. Como mostra a Figura 2, desde 2015, os investimentos em fontes de energia limpa cresceram consideravelmente e ultrapassaram os investimentos em combustíveis fósseis, evidenciando uma mudança estrutural no setor energético (IEA, 2023). Em 2023, os investimentos em

FIGURA 2 – INVESTIMENTO ANUAL EM COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS E ENERGIA LIMPA, 2015-2023.



FONTE: Figura adaptada e traduzida de IEA (2023).

energia limpa atingiram US\$ 1,8 trilhão (R\$ 9,9 trilhões)¹, enquanto os investimentos em combustíveis fósseis foram de US\$ 1,1 trilhão (R\$6,05 trilhões), apresentando uma tendência de estabilização ou queda.

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) são uma agenda global estabelecida pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015, composta por 17 objetivos a serem alcançados até 2030 (ONU, 2015). As ODS 7 e 13 focam em energia acessível e limpa, e ação climática, respectivamente. Pesquisas sobre esses objetivos destacam a complexa interação entre políticas energéticas e resiliência climática (Burke; Melgar, 2022; Johnstone, 2022; Thapa *et al.* 2023; Mortimer *et al.* 2023).

O capítulo "*Sustainable Energy and Climate Change*" [Energia Sustentável e Mudanças Climáticas], publicado pela *United Nations Economic and Social Commission for Western Asia (ESCWA) (2019)* (Comissão Econômica e Social das Nações Unidas para a Ásia Ocidental) em 2019, discute como as ODS 7 e 13 estão interconectadas. A ODS 7 visa garantir energia acessível, sustentável e moderna para todos, enquanto a ODS 13 foca em ações urgentes para combater as mudanças climáticas e seus impactos. O capítulo ainda destaca a necessidade de integrar medidas de mitigação das mudanças climáticas em políticas energéticas nacionais e internacionais, promovendo

¹ Valor convertido com base na cotação de US\$ 1,00 = R\$ 5,50, referente a setembro de 2024. Essa equivalência será mantida por ao trabalho todo.

resiliência e adaptabilidade a desastres naturais. Além disso, aborda a importância da educação e conscientização sobre mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

A Dinamarca é um exemplo de país que estabeleceu um objetivo para eliminar o uso de combustíveis fósseis. Em 2010, a *Danish Commission on Climate Change Policy* [Comissão Dinamarquesa de Política Climática] apresentou um plano para que o país se tornasse 100% livre de combustíveis fósseis até 2050. O plano foi desenvolvido considerando as metas da União Europeia, que determinam que os países desenvolvidos devem reduzir suas emissões de gases do efeito estufa entre 60% e 80% até 2050 (Kofoed, 2017).

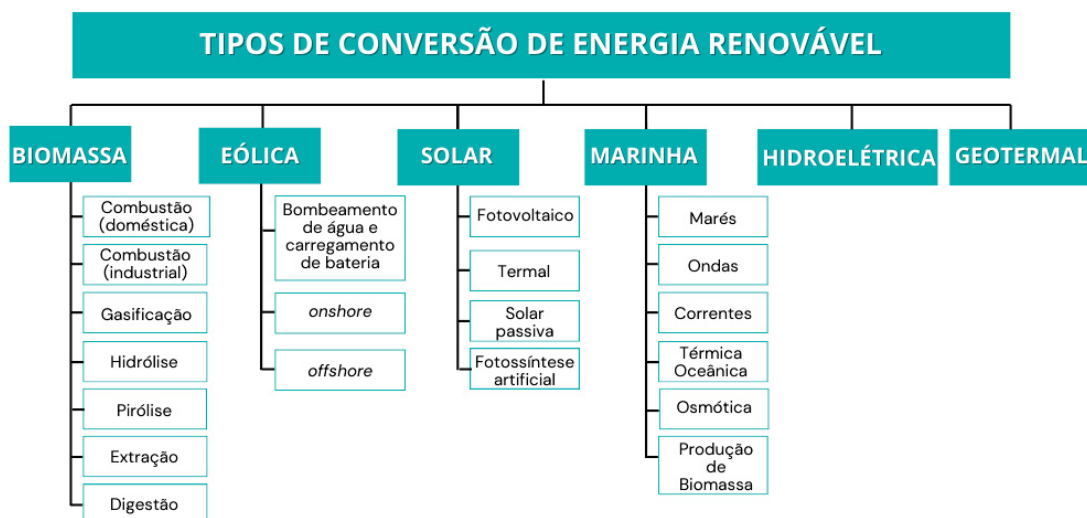
Atualmente, fontes baseadas em combustíveis fósseis representam o principal emissor de CO₂, sendo responsável por cerca de dois terços das emissões globais de gases de efeito estufa. (Gielen *et al.* 2019). Sendo assim, a meta de alcançar a descarbonização completa do sistema energético mundial até 2050 tem sido debatida em fóruns políticos e científicos globais, evidenciando a urgência da transição energética (Goldthau *et al.* 2020).

A transição energética é viabilizada pela inovação tecnológica, especialmente no campo das energias renováveis (Gielen *et al.* 2019). De acordo com Carley e Konisky (2020), a transição energética para fontes renováveis apresenta diversos benefícios ambientais, sociais e econômicos, incluindo o potencial de criação de empregos nas áreas de fabricação (Astariz; Iglesias, 2015), instalação e manutenção, além de estimular o crescimento econômico através de investimentos de novas tecnologias. Essa transição, dentro dos setores de energia renovável e eficiência energética, globalmente pode gerar cerca de 19 milhões de empregos até 2050 (Gielen *et al.* 2019).

2.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS

As energias renováveis são aquelas derivadas de fontes naturais que se regeneram continuamente. As principais categorias incluem solar, eólica, hidrelétrica, biomassa, geotérmica e energia marinha/oceânica (Turkenburg *et al.* 2000). A Figura 3 apresenta uma visão esquemática dessas principais fontes e suas respectivas tecnologias de conversão. Essas fontes de energia renovável são abundantes e possuem o potencial de reduzir significativamente a poluição e mitigar as mudanças climáticas (Melnik *et al.* 2023).

FIGURA 3 – CLASSIFICAÇÃO DAS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE ENERGIA RENOVÁVEL E SUAS APLICAÇÕES.



FONTE: Figura adaptada de Turkenburg *et al.* (2000).

No entanto, muitas tecnologias de energias renováveis ainda enfrentam desafios para alcançar viabilidade econômica em larga escala (Moorthy *et al.* 2019). A aplicação dessas tecnologias pode ocorrer em diversas escalas, desde soluções descentralizadas para edificações até projetos de infraestrutura em larga escala, sendo essenciais para a transição energética e o desenvolvimento sustentável global (Turkenburg *et al.* 2000). Embora progressos significativos tenham sido alcançados, especialmente na redução dos custos da energia solar e eólica (OES, 2015), tecnologias mais novas e menos desenvolvidas, como a energia oceânica, enfrentam um caminho mais difícil diante da comercialização (NREL, 2022).

O desenvolvimento das energias renováveis é um componente fundamental da transição energética global, que busca a mudança de um sistema dominado por combustíveis fósseis para um baseado em fontes limpas e sustentáveis (Gielen *et al.* 2019).

As tecnologias de energia renovável terrestres, especialmente a energia eólica e solar, são consideradas absolutamente essenciais para a construção de sistemas energéticos sustentáveis e para o fortalecimento da segurança energética (Adelaja *et al.* 2012; Gielen *et al.* 2019). Elas são consistentemente apresentadas como as principais alternativas aos combustíveis fósseis, impulsionadas pela necessidade de mitigar as mudanças climáticas, reduzir a poluição e alcançar maior independência energética (Abrell *et al.* 2017).

A energia eólica é o processo de conversão da energia cinética do vento em energia mecânica ou elétrica (Turkenburg *et al.* 2000). Trata-se de uma fonte de energia renovável derivada do movimento das massas de ar, causado pelas diferenças de

pressão atmosférica devido ao aquecimento solar (Blair, 2016). As turbinas eólicas convertem a energia cinética do vento em energia elétrica ao girar as pás (Joselin Herbert *et al.* 2007).

A energia solar é a principal fonte de todas as energias renováveis na Terra, sendo irradiada pelo Sol e amplamente disponível em qualquer região do planeta (Schobert, 2014; Franjić, 2023). Sua origem está nas reações de fusão nuclear que ocorrem no núcleo solar, emitindo ondas eletromagnéticas, como luz e calor, que podem ser convertidas em energia utilizável por diversas tecnologias, incluindo células fotovoltaicas e sistemas térmicos solares.

A tecnologia fotovoltaica (PV) converte diretamente a luz solar em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico, no qual a incidência da radiação solar sobre as células fotovoltaicas libera elétrons, gerando corrente elétrica (Tabak, 2009). Esses sistemas podem ser instalados em telhados, incorporados a projetos arquitetônicos e veículos ou implementados em usinas de grande escala (Turkenburg *et al.* 2000). Além disso, podem ser combinados com espelhos ou lentes concentradoras para otimizar a captação da radiação e aumentar a eficiência da geração de energia (Geoscience Australia and Bureau of Resources and Energy Economics, 2014; Franjić, 2023).

O Custo Nivelado da Energia (*Levelized Cost of Energy* - LCOE) é definido como o custo médio por megawatt de energia produzida por hora (R\$/MWh) de energia elétrica útil produzida pelo sistema (Ngan; Tan, 2012). Esse parâmetro é essencial para a análise econômica no setor de energia, fornecendo uma base para comparar custos de diferentes fontes de energia, influenciando decisões de investimento, políticas energéticas e estratégias de planejamento de longo prazo (De Bastiani *et al.* 2023). Um LCOE de R\$ 100,00/MWh, significa que esse é o preço médio de energia para conseguir cobrir seus custos e o projeto seguir.

Sua importância vai além da simples comparação de custos, impactando significativamente a transição para um sistema energético mais sustentável e eficiente (Bortoni *et al.* 2022). A equação geral do LCOE (R\$/MWh) é:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + O_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (2.1)$$

Onde I_t , M_t , O_t e F_t são respectivamente os custos de investimento, manutenção, operação e combustível (R\$) no tempo t (anos) geralmente se considera o tempo de vida útil do equipamento, E_t (MWh) é a expectativa de geração de energia para o tempo t e r é a taxa de juros (%).

A crescente adoção das energias solar e eólica tem impulsionado a transição para um modelo energético mais sustentável. Em 2017, essas fontes representaram

aproximadamente 77% da capacidade instalada globalmente (Al-Maamary *et al.* 2017). Entre 2010 e 2017, o custo da eletricidade gerada por células fotovoltaicas caiu em cerca de três quartos, enquanto o preço das turbinas eólicas foi reduzido pela metade, tornando ambas as tecnologias cada vez mais competitivas (Hannan *et al.* 2019).

De acordo com Mohammed *et al.* (2019), em simulações no HOMER para uma residência em Tikrit, o custo estimado de instalação foi de US\$ 7.340 para um sistema eólico de 3 kW e US\$ 14.792 para um sistema fotovoltaico de 3 kW; a potência média mensal atingiu 84

De acordo com Mohammed *et al.* (2019), em simulações no HOMER para uma residência em Tikrit, o custo estimado de instalação foi de US\$ 7.340 (R\$ 40.370) para um sistema de 3 kW e US\$ 14.792 (R\$ 81.356) para um sistema fotovoltaico de 3 kW; a potência média mensal atingiu, a potência média mensal atingiu cerca de 84% da capacidade para a energia solar em junho e 55% para a eólica no mesmo mês. No Brasil, o custo de produção de energia eólica *offshore* é avaliado entre R\$ 213,00/MWh a R\$ 770,70/MWh (Medeiros, 2014).

A Lazard, uma empresa que se destaca como uma fonte essencial de informações para planejadores de sistemas de energia renováveis, disponibiliza de forma clara e acessível dados sobre custos de investimento, manutenção e operação, além de taxa de juros e tempo de vida útil (Bortoni *et al.* 2022). O relatório publicado pela empresa em 2021 (Lazard, 2021) mostra que a viabilidade econômica é cada vez mais evidente à medida que o LCOE cai. No caso da energia eólica *onshore* e a energia solar fotovoltaica a escala de serviços públicos caiu para menos de US\$ 30 (R\$ 165) por megawatt-hora em algumas regiões dos Estados Unidos, tornando-as entre as fontes mais baratas de nova geração de eletricidade. Esta tendência é apoiada pelo declínio contínuo dos custos e pelos avanços tecnológicos.

A Tabela 1 apresenta o cálculo do LCOE para as energias renováveis terrestres, evidenciando seu potencial econômico. Estas métricas são amplamente utilizadas para comparar a relação custo-benefício e a viabilidade econômica de diferentes fontes de energia. No Brasil, os valores ainda são muito abstratos, principalmente por depender de fabricação internacional de equipamentos.

TABELA 1 – VALORES DE CUSTO DE ENERGIAS TERRESTRES RENOVÁVEIS.

Fonte de energia	Cálculo	Valor (MWh)	Fonte
Eólica <i>onshore</i>	LCOE	\$26 - \$54	Lazard (2021)
Solar fotovoltaica	LCOE	\$28 - \$42	Lazard (2021)
Eólica <i>onshore</i>	LCOE	R\$100 - R\$200	EPE* (2021)
Solar fotovoltaica	LCOE	R\$100 - R\$210	EPE (2021)

*Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021).

Em 2021, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021) publicou um relatório

técnico, "Caderno de Preços da Geração" que tem estimativas e análises dos valores de Investimentos (*Capital Expenditures* – CAPEX), dos Custos de Operação e Manutenção (O&M), do Custo Variável Unitário (CVU), do fator de capacidade e vida útil baseadas em dados nacionais e internacionais, para cada tipo de fonte de geração de energia. A Tabela 2 resume esses valores (R\$ de 2021). Um dos objetivos principais desse documento é dar mais transparência quanto a definição das premissas desta natureza utilizadas nos estudos de planejamento da EPE. Observa-se, por exemplo, que a eólica *onshore* apresenta CAPEX menor que a *offshore*, enquanto a nuclear combina alto CAPEX e o elevado fator de capacidade.

TABELA 2 – VALORES DE CAPEX, O&M, CVU, FATOR DE CAPACIDADE E VIDA ÚTIL PARA DIFERENTES TECNOLOGIAS.

Fontes	CAPEX (R\$/kW)	O&M (R\$/kW.ano)	CVU (R\$/MWh)	Fator de Capacidade	Vida Útil (anos)
Biogás	7.500 – 23.000	500	–	80%	20
Biomassa	3.000 – 8.000	90	–	30%	20
Carvão	8.000 – 13.500	160	120 – 300	80%	25
Eólica (<i>onshore</i>)	3.800 – 5.500	90	–	50%	20
Eólica (<i>offshore</i>)	9.800 – 18.600	490	–	60%	20
PV	2.800 – 4.500	50	–	30%	25
PV Flutuante	3.500 – 5.625	65	–	25%	25
GN (Ciclo Simples)	2.900 – 4.700	80	250 – 500	30%	25
GN (Ciclo Combinado)	3.600 – 6.100	80	120 – 300	70%	25
Nuclear	22.000 – 29.400	490	30 – 50	80%	30
PCH	6.000 – 11.000	90	–	50%	30

*Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021).

Nos valores da (EPE, 2021), o CAPEX considera acesso e conexão ao ponto de conexão de um sistema interligado. Já os LCOE da (Lazard, 2021) excluem transmissão e as alterações de rede (custos de integração do sistema).

2.1.1 FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA MARINHA

Os oceanos representam uma das maiores fontes de recursos naturais do planeta e possuem um imenso potencial energético, podendo contribuir significativamente para a crescente demanda global por eletricidade (Cruz; Sarmento, 2004). As fontes de energia oceânicas podem ser classificadas em: energia das marés, energia das ondas, energia das correntes, gradientes térmicos e energia osmótica (Bedard *et al.* 2010). Elas apresentam oportunidades significativas para a geração de energia sustentável.

O benefício mais citado da energia das marés na literatura é sua previsibilidade e estabilidade, especialmente quando comparada a outras fontes renováveis, como a energia eólica e solar (Zabihian; Fung, 2011; Khare; Bhuiyan, 2022; Thennakoon *et al.* 2023). O estudo realizado por Noman *et al.* (2022) destaca que a energia das marés

pode ser economicamente viável e competitiva no mercado de geração de eletricidade, em países como Coreia do Sul, França, Reino Unido, China, Canadá e Rússia.

De acordo com Shetty e Priyam (2022), a energia das marés é ilimitada e inesgotável, sendo, portanto, uma fonte de energia renovável. Uma de suas vantagens é que ela é menos suscetível às mudanças climáticas. Além disso, a energia das marés não emite gases de efeito estufa e a produção pode ocorrer tanto durante o dia quanto à noite.

Apesar de seus benefícios, a energia das marés também enfrenta diversos desafios que têm dificultado sua ampla adoção. Um dos maiores desafios da energia das marés é o alto custo inicial, ou seja, os custos de construção, especialmente dos sistemas de barragem em larga escala (IRENA, 2020). As usinas de energia maremotriz não podem ser instaladas em qualquer lugar, havendo poucas localidades geográficas ideais para sua implementação (IRENA, 2020). Outro grande desafio é a transmissão da eletricidade das usinas até os locais de consumo, pois geralmente elas estão localizadas em áreas remotas.

Embora a operação seja limpa, a construção de barragens de maré pode causar impactos ambientais significativos nos ecossistemas marinhos, alterando o transporte de sedimentos e afetando os padrões de migração de peixes e habitats locais (Shetty; Priyam, 2022; Thennakoon *et al.* 2023). As turbinas de corrente de maré também apresentam riscos potenciais à vida marinha devido a colisões com as pás e ao ruído subaquático, embora pesquisas até o momento não tenham demonstrado efeitos negativos significativos (Neary *et al.* 2014; Ocean, 2020).

As estimativas para o total de energia teórica que poderia ser aproveitada das marés (incluindo tanto a amplitude de maré quanto as correntes de maré) variam, é estimado na faixa de 500 a 1.000 Terawatts-hora por ano (TWh/ano) (Kerr, 2007). Outra estimativa da OES (2015) sugere um potencial teórico mundial em torno de 7.800 TWh/ano. Por outro lado, IRENA (2020) estima o potencial teórico em 1.200 TWh/ano.

A energia das correntes oceânicas aproveita a energia cinética do fluxo contínuo das águas marítimas para gerar eletricidade. As correntes oceânicas são classificadas de acordo com a profundidade, em correntes superficiais (acima de 100 m) e profundas (abaixo de 100 m) (Stommel, 1957). Enquanto as correntes profundas possuem velocidades inferiores a 10 cm/s, as correntes superficiais, impulsionadas pelo vento, podem atingir até 300 cm/s (Shanmugam, 2021). Essas correntes são impulsionadas principalmente pelos padrões globais de vento, pelo efeito de Coriolis e pelas diferenças de temperatura e salinidade da água (Shadman *et al.* 2019).

De acordo com Thennakoon *et al.* (2023), diferente da energia de maré, que são causadas por forças gravitacionais e geralmente são bidirecionais, as correntes

oceânicas são em geral, mais lentas, relativamente constantes e fluem em uma única direção, com alguma variação sazonal. Essa constância as torna uma fonte previsível e confiável para a geração de energia contínua e de base.

O estudo realizado por Yang *et al.* (2014), estimaram um potencial teórico de aproximadamente 163 TWh/ano na Corrente do Golfo, considerando toda a área da corrente dentro de aproximadamente 320km da costa dos EUA, entre os estados da Flórida e da Carolina do Norte. Além disso, foi calculado um potencial técnico de cerca de 49 TWh/ano, assumindo uma eficiência de conversão de energia de 30%.

Esse diferencial torna as correntes de superfície mais atrativas para aproveitamento energético. Essa tecnologia ainda está em estágios iniciais, mas espera-se que seja semelhante à utilizada para a energia de correntes de maré (IRENA, 2020; Thennakoon *et al.* 2023). O foco está em dispositivos hidrocinéticos submersos que convertem a energia cinética da água em movimento em eletricidade (Kirinus; Marques, 2015). O design mais comum é a turbina de fluxo axial (ou de eixo horizontal), que se assemelha a uma turbina eólica subaquática (Shadman *et al.* 2019). Por outro lado, a escolha da turbina utilizada para cada local depende de fatores econômicos, políticos, técnicos e ambientais (Marques *et al.* 2011; Khan *et al.* 2016).

Kirinus *et al.* (2022) investigaram os impactos hidrodinâmicos e morfodinâmicos na costa interna do sul-sudeste brasileiro decorrentes da instalação de turbinas para conversão de energia das correntes oceânicas. Os resultados destacam o grande potencial dessa fonte de energia renovável, devido à sua previsibilidade e elevada densidade energética. No entanto, os autores ressaltam a necessidade de estudos detalhados para compreender e mitigar impactos ambientais antes de sua implementação em larga escala. Embora ainda não existam aplicações comerciais dessa tecnologia, a energia das correntes oceânicas é uma fonte renovável com grande potencial para o futuro.

A conversão de energia térmica dos oceanos (OTEC) utiliza a diferença de temperatura entre as águas superficiais quentes e as águas profundas frias, situadas a aproximadamente 1000 m de profundidade, para gerar eletricidade (Lennard, 2004; Bedard *et al.* 2010; IRENA, 2014). O potencial térmico global é estimado em 44.000 TWh por ano, o que poderia mais do que suprir a demanda atual de eletricidade do mundo (IRENA, 2020). Outras pesquisas (Rajagopalan; Nihous, 2013), sugerem que modelos avançados de circulação oceânica indicam um limite prático sustentável de cerca de 7 TW (aproximadamente 61.000 TWh/ano) com impacto ambiental mínimo, embora o máximo teórico possa chegar a 30 TW.

A eficácia do OTEC é particularmente elevada em regiões tropicais, onde a diferença de temperatura entre a superfície e a água profunda é mais pronunciada ao longo do ano (VanZwieten *et al.* 2017). No entanto, a viabilidade da implementação

dessa tecnologia depende de fatores tecnológicos, econômicos e ambientais, incluindo a proximidade da instalação em relação à costa, a profundidade do leito oceânico e os impactos das correntes marinhas locais e dos padrões climáticos, como a ocorrência de furacões (Lennard, 2004).

A energia do gradiente de salinidade, também conhecida como energia osmótica, aproveita a energia gerada a partir da diferença na concentração de sal entre dois corpos d'água, normalmente água doce e água do mar. Técnicas como osmose reversa com pressão retardada (PRO) e eletrodíálise reversa (RED) são utilizadas para capturar essa energia (Emami *et al.* 2013).

De acordo com o relatório publicado pela *International Renewable Energy Agency* (IRENA, 2020), algumas das principais barreiras à comercialização da energia oceânica são de natureza econômica. O LCOE (Tabela 3) para a energia oceânica é, em geral, significativamente mais alto em comparação com outras fontes de energia renovável, devido aos elevados custos iniciais. Os custos de instalação, pesquisa e desenvolvimento, bem como de fabricação, são elevados principalmente ao fato de que muitas vezes são novas tecnologias. Além disso, a tecnologia é considerada de alto risco devido às incertezas associadas à falta de familiaridade e experiência operacional, fazendo com que seja difícil de encontrar investidores e financiamento adequado.

TABELA 3 – VALORES DE CUSTO DE ENERGIAS MARINHAS RENOVÁVEIS.

Fonte de energia	Cálculo	Valor (MWh)	Fonte
Eólica <i>offshore</i>	LCOE	\$83 - \$130	Lazard (2021)
Ondas	LCOE	\$120 - \$270	NREL (2022)*
Maré	LCOE	\$150 - \$280	OES (2015)**
Gradiente de salinidade	LCOE	Pro \$65 - \$125 Red \$90	IRENA (2014)***
Correntes marinhas	LCOE	\$150 - \$250	Sandia (2014)
OTEC	Custo de instalação	\$150 - \$280	OES (2015)

*National Renewable Energy Laboratory**, *Ocean Energy Systems*** e *International Renewable Energy Agency****

A crescente busca por energias de fonte limpa e renovável tem sido um indicador da extrema relevância dos estudos e da energia das ondas do mar que será abordada de forma mais profunda a seguir.

2.2 ENERGIA DAS ONDAS

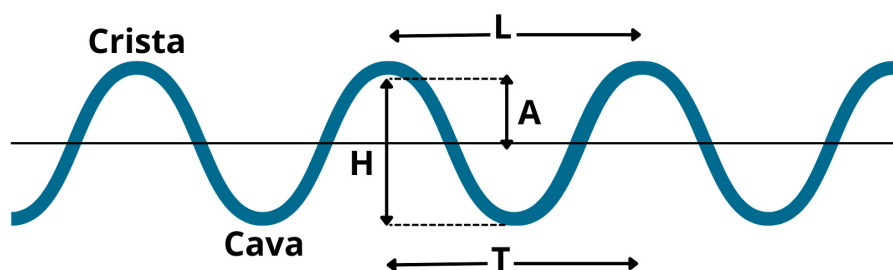
Uma onda pode ser definida como uma perturbação ou oscilação que se propaga no tempo e no espaço, acompanhada por transferência de energia, sem que ocorra um deslocamento de partículas. As ondas oceânicas possuem diferentes

componentes (Castello; Krug, 2015). A crista da onda é o ponto mais alto acima do nível médio da água, enquanto o vale, ou cava, é a depressão entre as cristas, abaixo do nível médio. A altura da onda (H) corresponde à distância vertical entre a crista e o vale, e o comprimento de onda (L) é a distância horizontal entre duas cristas sucessivas. A relação entre essas partes é ilustrada na Figura 4 (Garrison, 2016).

A amplitude (A) (m) das ondas do mar, que é a altura máxima de deslocamento vertical da água em relação ao nível médio, representa metade da altura total da onda. Esse parâmetro é fundamental para avaliar a energia potencial das ondas, pois, juntamente com a altura e a frequência, influencia diretamente a quantidade de energia que uma onda pode transportar (Garrison, 2016). Quanto maior a amplitude, maior será a energia potencial da onda, o que é particularmente relevante em estudos de conversão de energia das ondas para fins de geração de eletricidade.

O tempo necessário para que a onda se desloque uma distância igual ao comprimento de onda é chamado de período da onda (Garrison, 2016). Ondas com maior comprimento transportam energia mais rapidamente pela água. Embora o comprimento de onda seja difícil de medir diretamente no mar, o período (T) pode ser observado com relativa facilidade. A frequência (f) indica o número de ondas que passam por um ponto fixo em um determinado intervalo de tempo (Equação 2.2) e a celeridade (C) representa a velocidade com que a onda se desloca (Equação 2.3).

FIGURA 4 – GEOMETRIA DE UMA ONDA LINEAR.



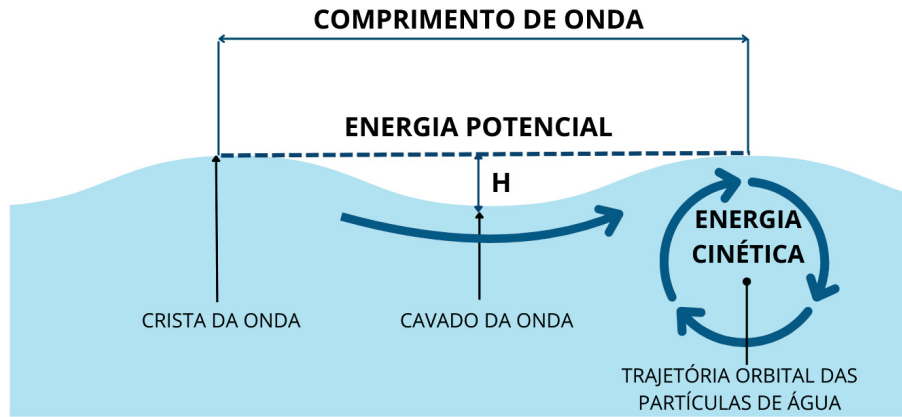
FONTE: Figura adaptada de Castello e Krug (2015).

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.2)$$

$$C = \frac{L}{T} \quad (2.3)$$

Três fatores principais afetam o crescimento das ondas oceânicas de superfície geradas pelo vento: a velocidade do vento, a duração do vento (ou seja, por quanto tempo o vento sopra) e o *fetch*, que é a distância sobre a água que o vento sopra em uma única direção. Se a velocidade do vento for baixa, resultarão apenas ondas pequenas, independentemente da duração ou intensidade do vento. As principais forças

FIGURA 5 – ESQUEMA INDICANDO AS ENERGIAS POTENCIAL E CINÉTICA DAS ONDAS, ASSOCIADAS À ALTURA DA ONDA E AO MOVIMENTO ORBITAL DAS PARTÍCULAS DE ÁGUA.



FONTE: Figura adaptada de Harari (2021).

que controlam as características das ondas, conhecidas como forças restauradoras, são elas: gravidade (flutuabilidade e gradiente de pressão), fricção (tensão do vento) e pseudo forças (força de Coriolis) (Harari, 2021).

2.2.1 CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDA EM ENERGIA ELÉTRICA

As ondas possuem energia cinética e potencial. São conversões sucessivas de energia potencial em cinética e cinética em potencial, das partículas de água, que mantêm as oscilações (Figura 5). Para calcular a energia por unidade de área de ondas progressivas, pode ser utilizada a teoria linear. Em um local com profundidade sem distúrbio h e densidade da água uniforme ρ , sendo A a amplitude das ondas, a energia potencial E_p e a energia cinética E_k , por unidade de área, são dadas por:

$$E_p = E_k = \frac{1}{4}\rho g A^2 \quad (2.4)$$

E a energia total, por unidade de área, é dada pela Equação 2.5. A energia de uma onda depende de um único parâmetro da onda, sua amplitude (ao quadrado). A potência por unidade de largura numa frente de onda, em águas rasas é representada pela Equação 2.6. Tendo sua unidade, no Sistema Internacional de Unidades (SI), representada por W/m.

$$E = E_p + E_k = \frac{1}{2}\rho g A^2 \quad (2.5)$$

$$P = \frac{1}{2}\rho g A^2 \sqrt{gh} \quad (2.6)$$

Onde E é a energia das ondas por metro quadrado (J/m^2), ρ é a massa específica da água (kg/m^3), que no caso da água do mar é de $1,030$ (kg/m^3), g é a gravidade (m/s^2) e A é a amplitude das ondas em metros (m).

A conversão de energia das ondas em energia elétrica pode ser realizada por meio de diversos dispositivos e tecnologias, como os conversores de coluna d'água oscilante (OWC), os galgamento e os sistemas de corpo oscilante (Cai; Li, 2023). Esses dispositivos capturam o movimento das ondas e o transformam em movimento mecânico, que, por sua vez, é convertido em energia elétrica através de geradores. A eficiência dessa conversão depende de fatores como a intensidade e a consistência das ondas, a localização geográfica e as características específicas do dispositivo utilizado (Aderinto; Li, 2019).

A energia das ondas é uma fonte de energia renovável e sustentável, que tem o potencial de contribuir significativamente para a matriz energética global, especialmente em regiões costeiras com grande atividade ondulatória. Os tipos de conversores de energia das ondas existentes serão explicados na seção a seguir 2.2.2.

2.2.2 CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS

2.2.2.1 HISTÓRICO

O desenvolvimento de conversores de energia das ondas (*Wave Energy Converters* – WECs) remonta a tempos antigos os primeiros registros de tentativas nessa área datam do século XIX na França. (Clément *et al.* 2002; Espindola; Araújo, 2017). A era moderna da tecnologia de energia das ondas, no entanto, é amplamente atribuída ao trabalho pioneiro de Yoshio Masuda, no Japão, a partir da década de 1940 (Masuda, 1989). Ele foi conhecido por desenvolver uma boia de navegação movida por ondas, equipada com uma turbina a ar. Esse dispositivo, posteriormente identificado como uma forma de Coluna de Água Oscilante (*Oscillating Water Column* - OWC) (Falcão, 2010).

Na era moderna, foi apenas durante a crise energética do início da década de 1970 que o campo voltou a despertar interesse, com o artigo publicado do Prof. Stephen Salter na revista científica *Nature* em 1974 (Pontes *et al.* 1997). No entanto, apesar dos esforços substanciais de pesquisa, especialmente no Reino Unido, as atividades na área foram novamente reduzidas ao longo dos anos 1980 e início dos anos 1990 (Drew *et al.* 2009).

No final do século passado, as atividades começaram a ganhar novo impulso, desta vez em diversos países ao redor do mundo, com maior concentração nos países costeiros da Europa. Na última década, o Reino Unido voltou a investir significativamente no desenvolvimento de energias renováveis marinhas, incluindo a energia das

ondas, e atualmente é considerado o líder mundial na área (Contestabile *et al.* 2015).

Existem um grande número de teorias para conversão de energia das ondas, onde mais de 1000 técnicas de conversão de energia das ondas foram patenteadas no Japão, América do Norte e Europa (Clément *et al.* 2002). Apesar desta grande variação no design, os WECs (*Wave Energy Converters* - Conversores de Energia das Ondas) são geralmente categorizados por localização e tipo.

A localização impacta a energia das ondas disponível, os custos de construção e manutenção, e a viabilidade de conexão à rede elétrica (Contestabile *et al.* 2015). Os dispositivos de conversão de energia das ondas podem ser classificados em três grandes localizações:

1. **Dispositivos costeiros** (*Shoreline* ou *onshore*): Esses dispositivos são fixados na linha costeira, frequentemente incorporados em estruturas como quebra-mares (Ahamed *et al.* 2020). Também conhecidos como dispositivos de primeira geração, permitem fácil acesso para construção, instalação e manutenção, e podem estar próximos aos centros consumidores, facilitando a distribuição da energia gerada (Zabihian; Fung, 2011; Aderinto; Li, 2019). No entanto, possuem menor potencial energético, pois as ondas que chegam à costa interagem com o leito oceânico, reduzindo sua energia. Um exemplo são Colunas de Água Oscilante (OWCs), como a LIMPET (Drew *et al.* 2009).
2. **Dispositivos próximos à costa** (*Nearshore*): Implantados em profundidades rasas a intermediárias (tipicamente inferiores a 20–25 metros) (Ahamed *et al.* 2020). Considerados dispositivos de segunda geração, aproveitam a proximidade com a costa para facilitar o transporte e a distribuição da energia gerada. Além disso, apresentam um potencial energético superior ao dos dispositivos costeiros (Aderinto; Li, 2019).
3. **Dispositivos em alto mar** (*Offshore*): Localizados em águas profundas (acima de 40–50 metros), onde o recurso de energia das ondas é mais intenso e consistente (Contestabile *et al.* 2015). Conhecidos como dispositivos de terceira geração, aproveitam o alto potencial energético das ondas em mar aberto. Contudo, enfrentam dificuldades de acesso para instalação e manutenção e a grande distância para o transporte da energia gerada, resultando em maiores perdas devido ao cabeamento de transmissão de energia (Ahamed *et al.* 2020).

Outra forma de categorizar os dispositivos de energia das ondas do mar é baseada em seu princípio de funcionamento, conforme definido por Falcão (2010) (Tabela 4, em conjunto com as Figuras 6 e 7). Muitos conceitos e projetos de conversores de energia das ondas foram desenvolvidos ao longo dos anos e podem ser

categorizados em três principais: corpos oscilantes, coluna de água oscilantes (OWC - *Oscillating Water Column*) e galgamento. A categorização é baseada na interação entre os dispositivos e as ondas (Figura 7b.). O crescimento da indústria é dificultado pela falta de critérios padrão para escolher a tecnologia adequada e pela dificuldade em quantificar os avanços nas técnicas de captação de energia, apesar dos esforços para melhorar os conceitos e designs existentes (Aderinto; Li, 2019).

TABELA 4 – DEFINIÇÃO DE CONVERSORES DE ENERGIA DE ACORDO COM SEU PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.

Princípio Físico	Posição	Característica/Exemplo
Corpos Oscilantes	Submersos	Essencialmente translação vertical. Ex: AWS
		Rotação através de placas articuladas ao fundo. Ex: WaveRoller, Oyester
	Flutuantes	Essencialmente translação vertical. Ex: AquaBuoy e WaveBob
		Rotação. Ex: Pelamis
Coluna d'água oscilante	Estrutura Fixa	Isolada. Ex: Limpet
	Estrutura Flutuante	Ex: Mighty Whale
Galgamento	Estrutura Fixa	Na costa. Ex: TAPCHAN
		Em quebra-mar. Ex: SSG
	Estrutura Flutuante	Ex: Wave Dragon

2.2.2.2 DISPOSITIVOS DE COLUNA D'ÁGUA OSCILANTES (OWC)

Os conversores de energia das ondas oceânicas (WECs) comercializados foram relatados pela primeira vez na década de 1960, quando foram usados para alimentar bóias de navegação no Japão e nos EUA (Masuda, 1989). Embora esses WECs não fossem denominados colunas de água oscilantes (OWCs), sua tecnologia de captura foi posteriormente identificada como similar à dos OWCs (Ahamed *et al.* 2020). Esses dispositivos consistem em uma câmara com uma abertura para o mar abaixo da linha de água. À medida que as ondas se aproximam do dispositivo, a água é forçada para dentro da câmara, aplicando pressão no ar (Figura 7a). Este ar escapa para a atmosfera através de uma turbina. Quando a água recua, o ar é aspirado pela turbina (Cruz; Sarmento, 2004; Zabihian; Fung, 2011; Xiros; Dhanak, 2016; Aderinto; Li, 2019; Gallutia *et al.* 2022). Uma turbina Wells de baixa pressão é frequentemente usada nesta aplicação, pois gira na mesma direção, independentemente da direção do fluxo, eliminando a necessidade de retificar o fluxo de ar (Drew *et al.* 2009). A turbina Wells é uma turbina axial que se caracteriza por ter pás com perfil simétrico, posicionadas radialmente ao longo do cubo (Dias *et al.* 2013).

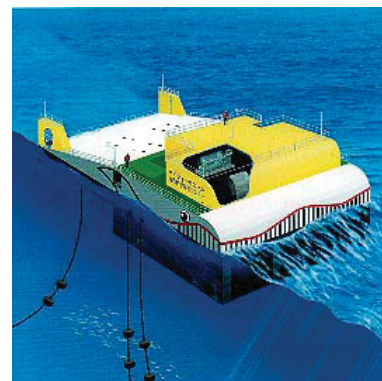
FIGURA 6 – ALGUNS CONVERSORES DE ENERGIA DE ONDAS. VER RELAÇÃO DE PRINCÍPIOS FÍSICOS E POSICIONAMENTO NA TABELA 4.



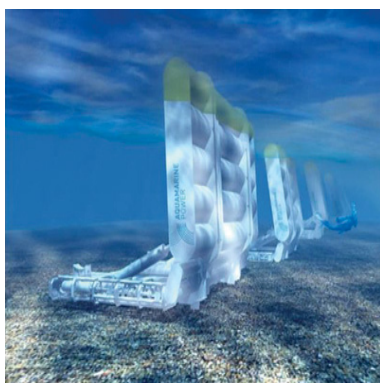
(a) AquaBuoy



(b) AWS



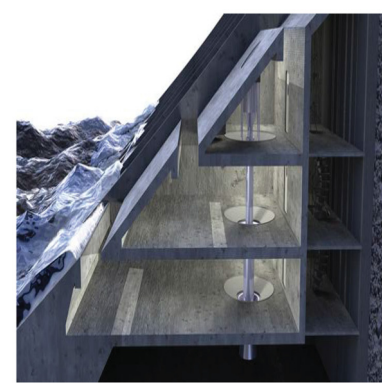
(c) MightyWhale



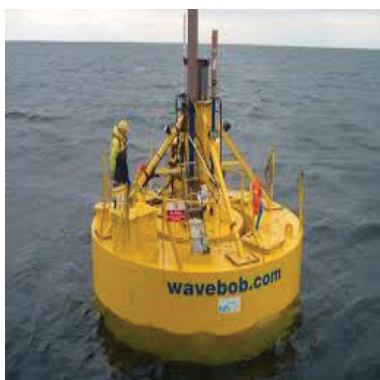
(d) Oyster



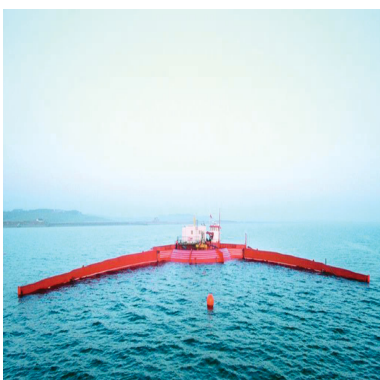
(e) Pelamis



(f) SSG



(g) WaveBob



(h) Wave Dragon



(i) Wave Roller

2.2.2.3 DISPOSITIVOS DE CORPOS OSCILANTES

Os sistemas corporais oscilantes, ou sistemas ativados por ondas, operam gerando movimento oscilatório durante a interação com as ondas do mar (Aderinto; Li, 2019). O movimento oscilatório é capturado por um mecanismo de tomada de força (PTO - *Power Take-Off*), que converte a energia mecânica do movimento das ondas em energia elétrica ou outra forma de energia útil (Têtu, 2017; Guo *et al.* 2022). Esse tipo de conversor de energia é capaz de captar ondas vindas de várias direções (Mustapa

et al. 2017). A maioria desses sistemas são dispositivos de elevação e inclinação, com os principais componentes flutuando na superfície da água (Guo *et al.* 2022) (Figura 7c).

Ao contrário dos dispositivos de OWC, que podem ser montados ao longo da costa ou em águas rasas, os sistemas de corpos oscilantes requerem áreas com profundidade adequada para acomodar os movimentos do corpo (Negri; Malavasi, 2018). A complexidade das estruturas offshore torna a implantação desses sistemas mais desafiadora. No entanto, com o aumento do conhecimento sobre a dinâmica dos corpos flutuantes, o estudo dos mecanismos de captura de energia desses sistemas tem avançado (Aderinto; Li, 2019) .

2.2.2.4 DISPOSITIVOS DE GALGAMENTO

O método de captura de energia das ondas oceânicas usando conversores do tipo galgamento diferente dos métodos anteriores. A Figura 7b ilustra como esses dispositivos capturam a água da crista da onda em um reservatório elevado acima do nível do mar (Xiros; Dhanak, 2016; Di Lauro *et al.* 2020). A água armazenada é então liberada gradualmente para acionar uma turbina hidráulica, convertendo a energia potencial em energia utilizável (Thennakoon *et al.* 2023). Ao contrário das colunas de água oscilantes e dos sistemas de corpos oscilantes, a energia capturada por esses dispositivos não depende diretamente do movimento das ondas, mas sim da diferença de altura entre o reservatório e o nível do mar, de maneira semelhante aos sistemas hidrelétricos convencionais (Aderinto; Li, 2019).

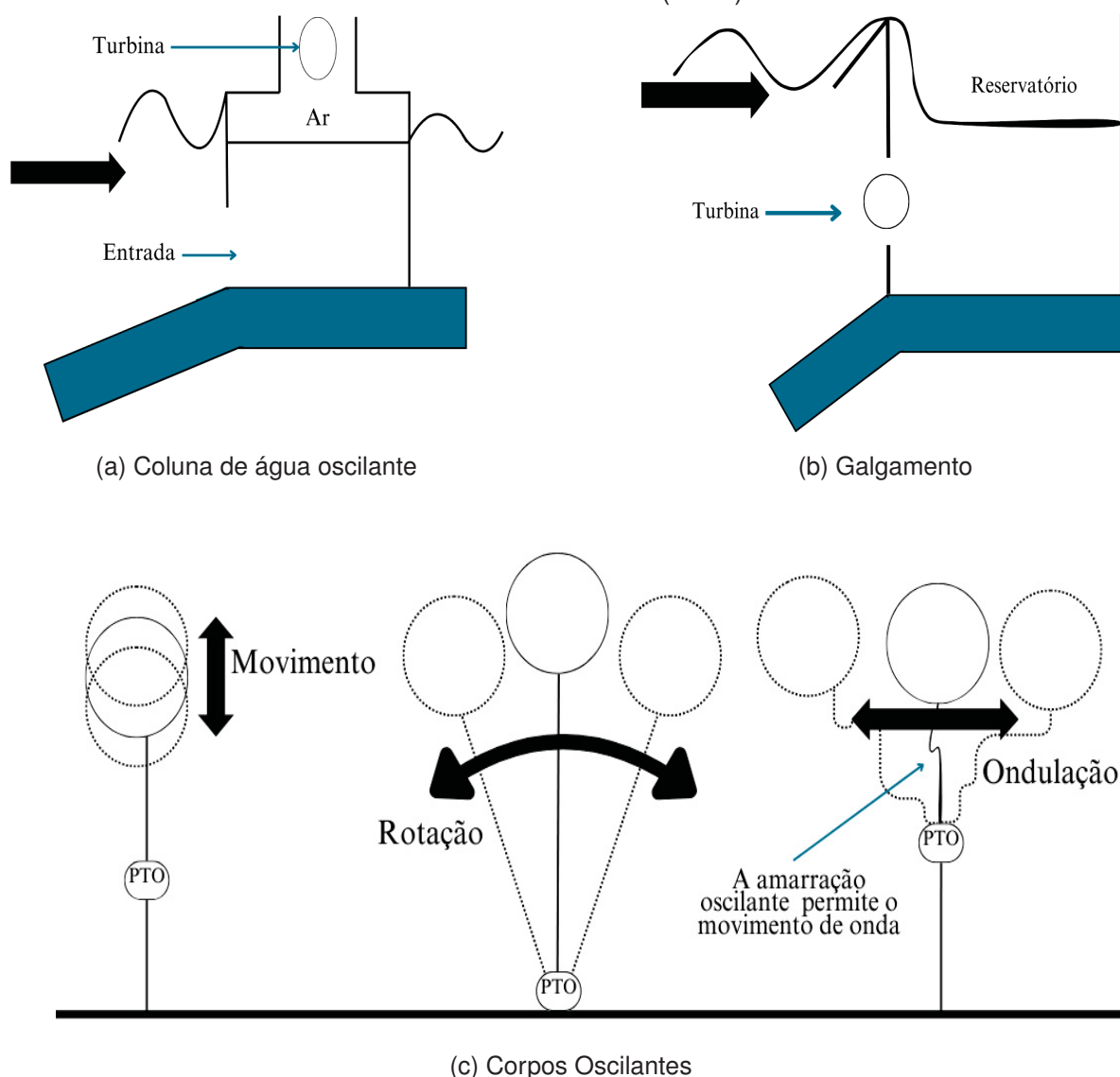
Segundo com Aderinto e Li (2019), o desempenho dos dispositivos de galgamento depende da disponibilidade de água no reservatório e da diferença de elevação. Esses dispositivos são especialmente eficazes em regiões com ondas significativamente altas.

Instalada no Porto de Pecém, no Ceará, a usina de ondas foi a primeira usina da América Latina a utilizar o movimento das ondas do mar para produção de energia elétrica. Este protótipo apresentou uma potência nominal de 50 kW e a energia produzida é consumida no porto onde está localizada (Wu *et al.* 2018). A usina funcionou de forma experimental de 2012 até 2014. Atualmente não se encontra informações atualizadas sobre o dispositivo.

Atualmente no estado do Paraná não possui nenhum estudo específico sobre conversores de energia da onda. Os estudos que envolvem o Paraná estão ligados somente a Plataforma Sul-Sudeste do Brasil (Kirinus *et al.* 2022), com um enfoque maior nos estados do Rio Grande do Sul, de Santa Catarina e de São Paulo.

Apesar da existência de diversos tipos de conversores, seus impactos são

FIGURA 7 – CLASSIFICAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS (WEC).



FONTE: Imagem adaptada de Aderinto e Li (2019)

poucos explorados. De acordo com um relatório publicado em 2020 pela *European Technology & Innovation Platform for Ocean Energy – ETIPOCEAN*, quatro principais impactos da implementação da energia oceânica foram identificados: risco de colisão de animais marinhos, ruído subaquático, campos eletromagnéticos e mudanças de habitat. Sendo que poucos estudos foram realizados objetivando esta avaliação, entretanto em 2016, a empresa SeaGen (MarineSpace Ltd, 2016) realizou a retirada de sua turbina de energia das marés localizada em Strangford Lough, Irlanda do Norte. Este processo de retirada gerou um relatório de impactos, indicando baixo impacto ambiental nas comunidades bentônicas e quase nenhum impacto cumulativo nos aspectos socioeconômicos locais.

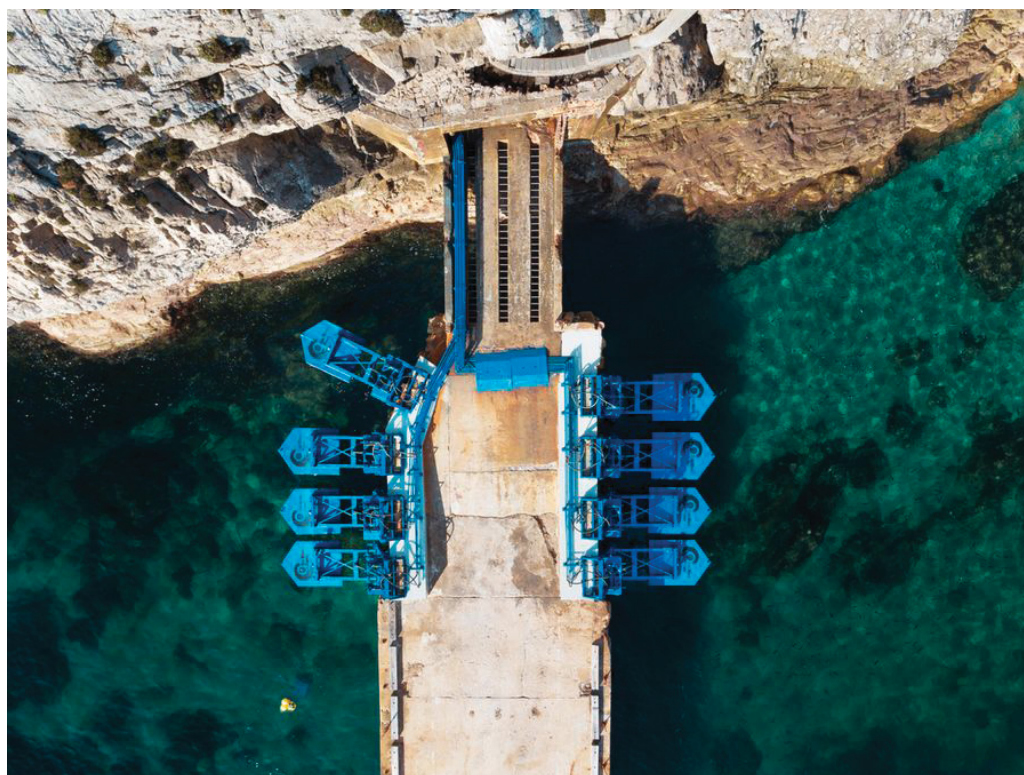
Nos últimos anos, avanços significativos nos conversores de energia das

ondas foram alcançados, mostrando que essas tecnologias estarão disponíveis para aplicação em larga escala para os próximos anos, principalmente em países da Europa (Venugopal *et al.* 2022), em contrapartida, o desenvolvimento e pesquisa dos recursos associados às ondas ainda permanecem pouco explorados em várias partes do mundo.

2.2.3 ECO WAVE POWER

A energia das ondas é uma fonte promissora de energia renovável devido à sua alta densidade energética e previsibilidade em comparação com outras fontes, como solar e eólica. Entre as tecnologias desenvolvidas na última década para converter a energia das ondas em eletricidade, destaca-se o conversor da empresa Eco Wave Power (EWP) (Figura 8), a empresa sueca com sede em Tel Aviv, Israel, que desenvolveu um sistema inovador de conversão de energia das ondas instalado em terra (*onshore*) (Ornes, 2020). Sua tecnologia foi projetada para ser integrada a estruturas costeiras já existentes, como quebra-mares, espigões e píeres, o que oferece vantagens significativas na redução de custos associados à instalação, manutenção e conexão à rede elétrica, em comparação com os sistemas *offshore* (Cascajo *et al.* 2019, 2020; Guillou *et al.* 2020).

FIGURA 8 – ECO WAVE POWER EM GILBRALTAR

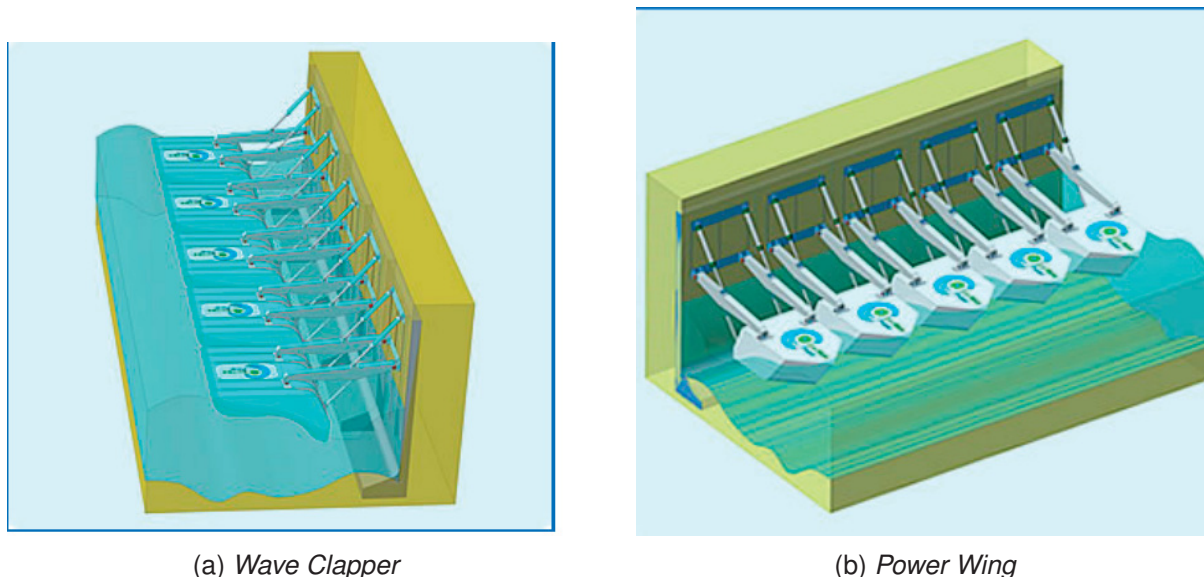


FONTE: Eco Wave Power (2025)

A tecnologia central do sistema utiliza flutuadores com formatos únicos que convertem a energia das ondas em eletricidade (Cascajo *et al.* 2020). Esses flutuadores, classificados como absorvedores pontuais (*point absorbers*) ou corpos ativados por

ondas (*wave-activated bodies*), sobem e descem conforme o movimento das ondas (Cascajo *et al.* 2019; Hernández *et al.* 2022; Clemente *et al.* 2023). Esse movimento é transmitido por meio de braços robustos até uma estação de energia localizada em terra, onde a energia mecânica é convertida em pressão hidráulica que aciona um gerador, produzindo eletricidade limpa (Cascajo *et al.* 2019). O sistema possui duas principais variantes de flutuadores: o “*Wave Clapper*” e o “*Power Wing*”, representados pelas Figuras 9a e 9b (Eco Wave Power, 2025). O dispositivo se destaca pela sua durabilidade, o sistema pode erguer seus braços mecânicos para fora da água durante tempestades severas para evitar danos (Ornes, 2020).

FIGURA 9 – DUAS PRINCIPAIS VARIANTES DE FLUTUADORES.



(a) *Wave Clapper*

(b) *Power Wing*

FONTE: Eco Wave Power (2025).

A Eco Wave Power possui diversos projetos de destaque, muitos dos quais são locais pilotos ou de teste.

- **Porto de Jaffa, Israel** (Figura 10a): Em abril de 2012, a primeira usina de energia (10 kW) operando em condições reais foi instalada sobre dois quebra-mares no Mar Negro, com o objetivo de coletar dados e realizar testes de tensão. O sistema operou em diferentes regimes de ondas por 18 meses e, em seguida, foi transportado para Israel, sendo instalado no Porto de Jaffa, onde permanece em operação até hoje (Cascajo *et al.* 2019).
- **Gibraltar** (Figura 10b): Este é o projeto mais emblemático da empresa e é reconhecido como o único conjunto de conversores de energia das ondas conectados à rede elétrica atualmente em operação no mundo (Ornes, 2020; Clemente *et al.* 2023). Instalado em 2016 sobre um antigo píer de munições, o conjunto é composto por oito flutuadores, com capacidade inicial de 100 kW, suficiente para

abastecer diversas dezenas de residências. A empresa planeja expandir essa capacidade para 5 MW, o que poderia suprir de 10 a 15% da demanda total de eletricidade de Gibraltar (Cascajo *et al.* 2019; Ornes, 2020; Clemente *et al.* 2023).

- **Porto de Leixões, Portugal** (Figura 10c): Em 2020, a Eco Wave Power assinou um Acordo de Concessão com a Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo (APDL) para utilizar quatro áreas sob sua gestão com potencial para a construção, operação e manutenção de uma usina de energia das ondas de até 20 MW. A concessão dos quebra-mares terá duração de 25 a 30 anos.

A usina será construída em etapas, iniciando com uma estação de 1 MW e, mediante certas condições, poderá ser ampliada para os 19 MW restantes.

Em março de 2024, a Eco Wave Power recebeu a última aprovação necessária para iniciar as obras do primeiro megawatt na cidade do Porto, por meio do Título de Utilização de Recursos Hídricos (TURH) concedido pela APDL. A empresa também emitiu uma garantia de execução como compromisso de iniciar o projeto comercial no prazo de dois anos. Acredita-se que este será o primeiro projeto de energia das ondas em escala comercial no mundo, representando um passo significativo rumo à comercialização da tecnologia (Ramos *et al.* 2022; Eco Wave Power, 2025).

- **Outros**

- A empresa assinou um acordo com a *MSMART Future Technology* para desenvolver um conjunto de geração de energia das ondas de 50 MW no Vietnã. A primeira fase do projeto envolve um estudo de viabilidade detalhado e a instalação de uma boia para medição das ondas.
- A empresa também possui planos para projetos futuros em locais como Itália, Países Baixos, Austrália, Estados Unidos e México, com uma capacidade total proposta de 190 MW.

O estudo feito por Cascajo *et al.* (2020) têm avaliado o desempenho do sistema da Eco Wave Power, destacando seu potencial, especialmente em ambientes com ondas de baixa intensidade, onde sistemas offshore podem não ser viáveis. Esse estudo avaliou a tecnologia para o Porto de Valência, na Espanha, calculou um alto fator de capacidade, entre 28,8% e 29%, valor superior ao da energia solar na mesma localidade. A eficiência do sistema apontou que é próxima de 50%.

Em comparação com outros conversores de energia das ondas, o sistema da Eco Wave Power apresenta alta escalabilidade, menor custo e operações de manutenção mais simples. Sua arquitetura permite que seja acoplado a quebra-mares

FIGURA 10 – ECO WAVE POWER INSTALAÇÕES.



(a) Porto de Jaffa, Israel



(b) Gibraltar



(c) Porto de Leixões

FONTE: Eco Wave Power (2025)

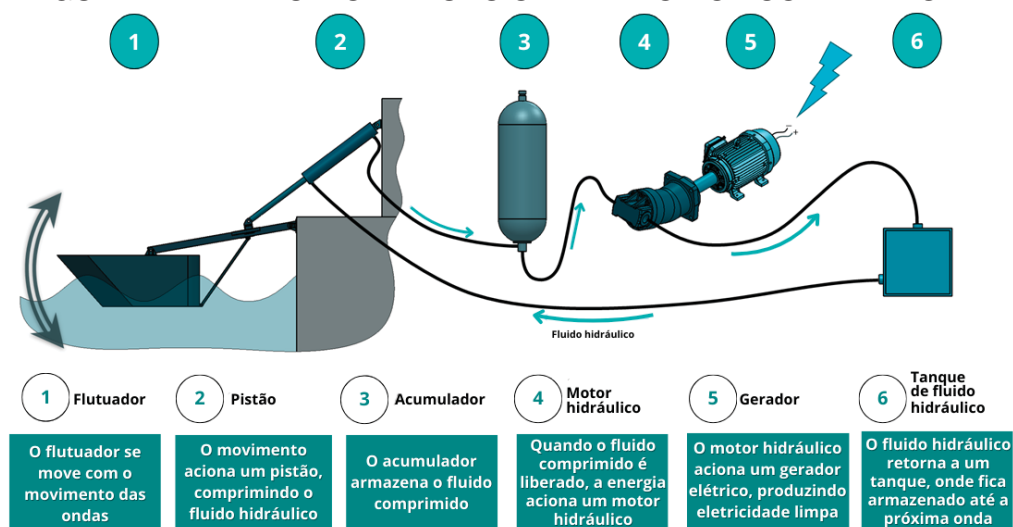
existentes, sem necessidade de integração completa, oferecendo assim maior flexibilidade (Cascajo *et al.* 2020).

A Eco Wave Power também está explorando soluções híbridas de energia. A empresa testou a integração de painéis solares fotovoltaicos sobre seus flutuadores em Jaffa e Gibraltar (Cascajo *et al.* 2020; Ramos *et al.* 2022). Essa inovação permite economia de espaço ao mesmo tempo em que fornece uma fonte adicional de energia renovável, o que representa um fator importante no desenho de futuras estruturas de abrigo portuário (Cascajo *et al.* 2020).

Embora a energia das ondas ainda enfrente custos elevados, com um Custo Nivelado de Energia (LCOE) variando de €225/MWh a €1220/MWh (R\$ 1.372,50

a 6.832)² em projetos iniciais, a abordagem da Eco Wave Power busca melhorar essa viabilidade econômica (Hernández *et al.* 2022; Clemente *et al.* 2023). Ao acoplar seus conjuntos de conversores de energia a estruturas costeiras já existentes, a empresa facilita a manutenção, reduz os custos com linhas de transmissão, minimiza interferências com atividades costeiras e diminui os impactos potenciais sobre a vida marinha, abrindo caminho para uma maior viabilidade econômica (Guillou *et al.* 2020; Hernández *et al.* 2022).

FIGURA 11 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO ECO WAVE POWER



FONTE: Eco Wave Power (2025)

2.2.4 POINT ABSORBER - CETO SYSTEM

CETO é um tipo de conversor de energia das ondas do tipo absorvedor pontual (*point absorber*), projetado e fabricado pela empresa australiana *Carnegie Clean Energy* (Silva, 2017; Jahangir; Motlagh, 2022). É classificado como um absorvedor pontual totalmente submerso, o que significa que seu principal componente flutuante opera inteiramente abaixo da superfície do oceano (Silva, 2017; Guo *et al.* 2022). Esse design oferece várias vantagens, incluindo impacto visual nulo a partir da costa, proteção contra condições meteorológicas extremas e tempestades, e mínima perturbação ambiental (Ding *et al.* 2016; Silva, 2017). A tecnologia é projetada para converter a energia cinética das ondas oceânicas em eletricidade sem emissões ou em água doce dessalinizada (Pyromallis, 2016; Rafiee; Fiévez, 2015).

O sistema CETO aproveita a energia das ondas por meio do movimento de um atuador flutuante submerso, preso ao leito marinho (Pyromallis, 2016; Orszaghova *et al.* 2016; Silva, 2017). À medida que as ondas passam, a boia se move com a água,

² Valor convertido com base na cotação de € 1,00 = R\$ 6,10, referente a outubro de 2024. Essa equivalência será mantida par ao trabalho todo.

acionando um sistema de PTO (Silva, 2017). A tecnologia evoluiu ao longo de várias gerações, sendo o CETO 5 e o CETO 6 as mais recentes. .

2.2.4.1 CETO 5

O sistema CETO 5 é composto por uma boia submersa conectada por um cabo de amarração a uma bomba hidráulica instalada no leito marinho (Pyromallis, 2016; Silva, 2017) (Figura 14). O movimento da boia induzido pelas ondas aciona a bomba, que pressuriza a água do mar e a transporta por uma tubulação até uma instalação em terra (Rafiee; Fiévez, 2015; Pyromallis, 2016). Já em terra, essa água de alta pressão pode ser usada para dois fins principais (Pyromallis, 2016):

1. **Geração de eletricidade:** Aciona uma turbina hidroelétrica padrão para produzir eletricidade para a rede.
2. **Dessalinização:** Alimenta uma planta de osmose reversa para produzir água doce.

Um teste em escala real com três unidades CETO 5 foi instalado como parte do Perth Wave Energy Project (PWEF), na Austrália (Rafiee; Fiévez, 2015; Ding *et al.* 2016; Rafiee *et al.* 2016). O projeto funcionou de novembro de 2014 até dezembro de 2015. A capacidade instalada foi de 0.72 MW. As especificações do CETO 5 são:

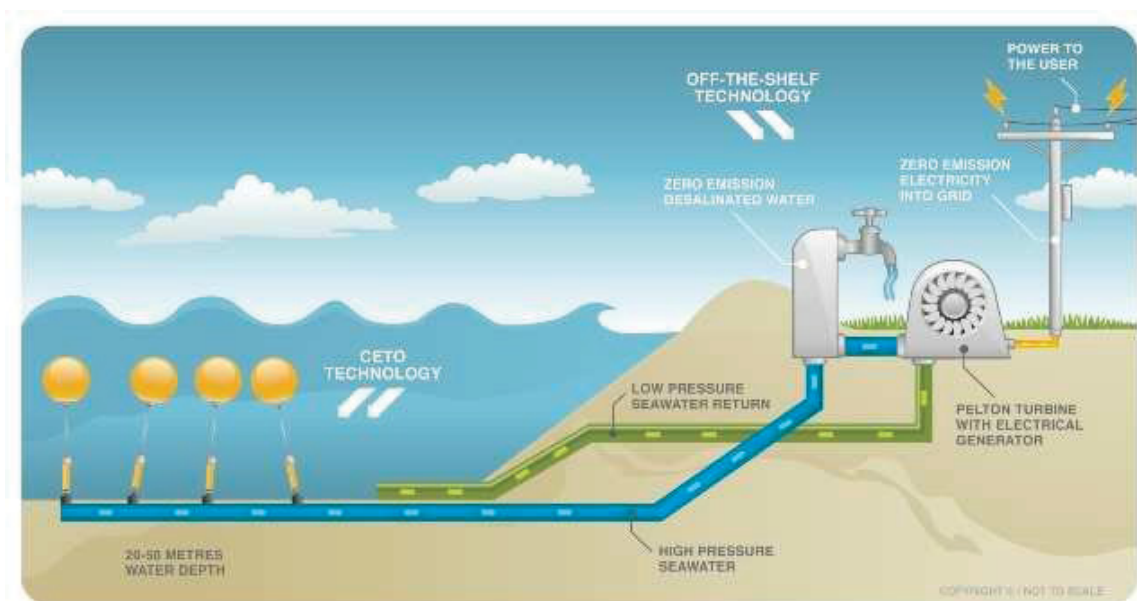
- **Potência nominal:** aproximadamente 240 kW a 260 kW (Babarit *et al.* 2012; Ding *et al.* 2016; Guo *et al.* 2022).
- **Dimensões:** 20 m de diâmetro × 6 m de altura (Rafiee; Fiévez, 2015).
- **Profundidade de operação:** 20-25m (Jahangir; Motlagh, 2022).

2.2.4.2 CETO 6

CETO 6 (Figura 13) representa a próxima geração da tecnologia, trazendo mudanças de projeto significativas em relação ao seu antecessor (Guo *et al.* 2022; Rafiee *et al.* 2016) As principais diferenças incluem:

1. **Geração de energia a bordo:** em vez de bombear água pressurizada para terra, a unidade CETO 6 possui um sistema de PTO integrado na própria boia, que gera eletricidade diretamente a bordo.

FIGURA 12 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO CETO 5



FONTE: Point Absorber – CETO System

2. **Sistema de múltiplos cabos:** utiliza um sistema de amarração com três cabos. Isso permite captar energia a partir de múltiplos modos de movimento, incluindo heave (vertical), surge (horizontal) e pitch (rotacional), o que visa aumentar a eficiência de captura de energia.

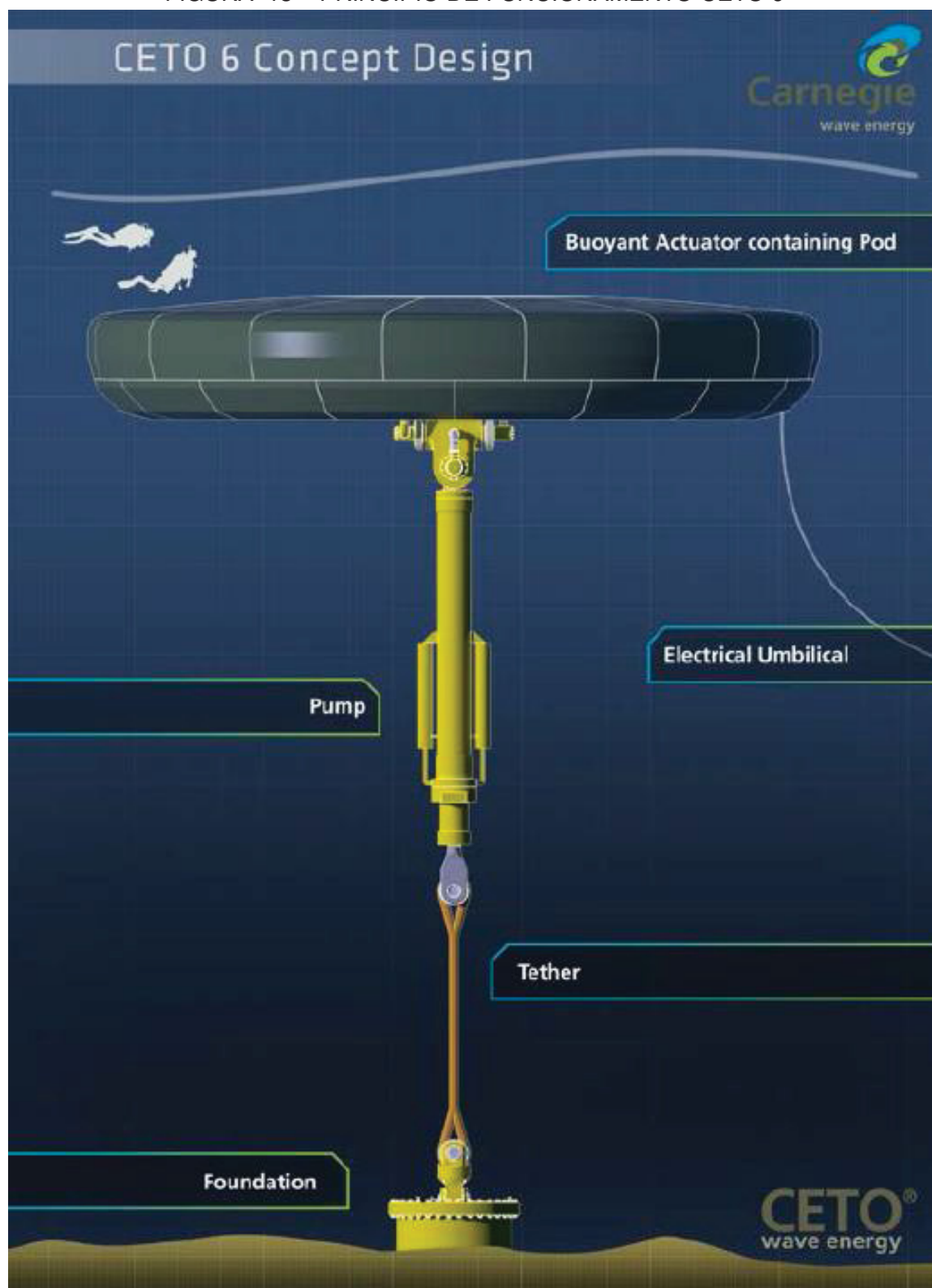
Especificações principais do CETO 6, são:

- **Potência nominal:** 1 MW. (Guo *et al.* 2022).
- **Dimensões:** Diâmetro de 25 metros e altura de 5 metros. (Guo *et al.* 2022).

Um estudo feito por Jahangir e Motlagh (2022) de viabilidade conduzido para três áreas costeiras no Irã ofereceu resultados sobre o desempenho real e a economia da tecnologia CETO. A produção média de uma única unidade CETO variou conforme o local, de 18,62 kW a 23,01 kW. O melhor desempenho foi em Konarak (Mar de Omã), onde a potência pode chegar a cerca de 30 kW, com média de 29 kW durante os meses de verão, quando a demanda de energia é mais alta.

O custo de energia para sistemas usando unidades CETO, variou de \$0,523/kWh a \$1,15/kWh (R\$ 2,78/kWh a R\$ 6,11/kWh), dependendo do sítio e do número de conversores instalados. Já o custo presente líquido, foi e entre \$4,49 milhões e \$13,4 milhões (cerca de R\$ 24 milhões a R\$ 72 milhões). Com isso, o estudo concluiu que o CETO é uma tecnologia cara em comparação com outras renováveis, como solar e eólica, mas suas vantagens incluem disponibilidade contínua de energia (dia e noite) e a inexistência de exigência de área em terra para instalação.

FIGURA 13 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO CETO 6



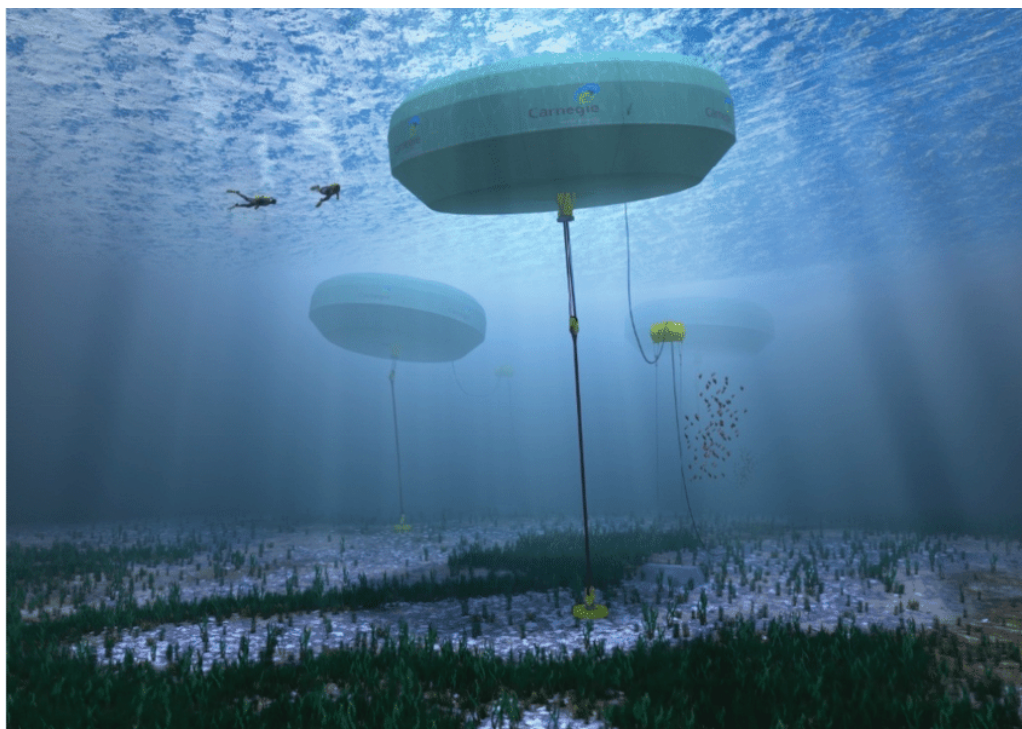
FONTE: Point Absorber – CETO System

O CETO tem sido alvo de extensa pesquisa para otimizar seu desempenho e garantir maior duração em ambientes oceânicos severos. Pesquisadores (Rafiee *et al.* 2016; Orszaghova *et al.* 2016) realizaram numerosos experimentos em tanques de

ondas para entender o comportamento do dispositivo em condições extremas.

A modelagem hidrodinâmica com modelos computacionais, desde métodos lineares até CDF (Dinâmica dos fluidos computacional) é usada para simular a interação do dispositivo com as ondas e prever melhor o seu desempenho (Schubert *et al.* 2020).

FIGURA 14 – PROTÓTIPO CETO



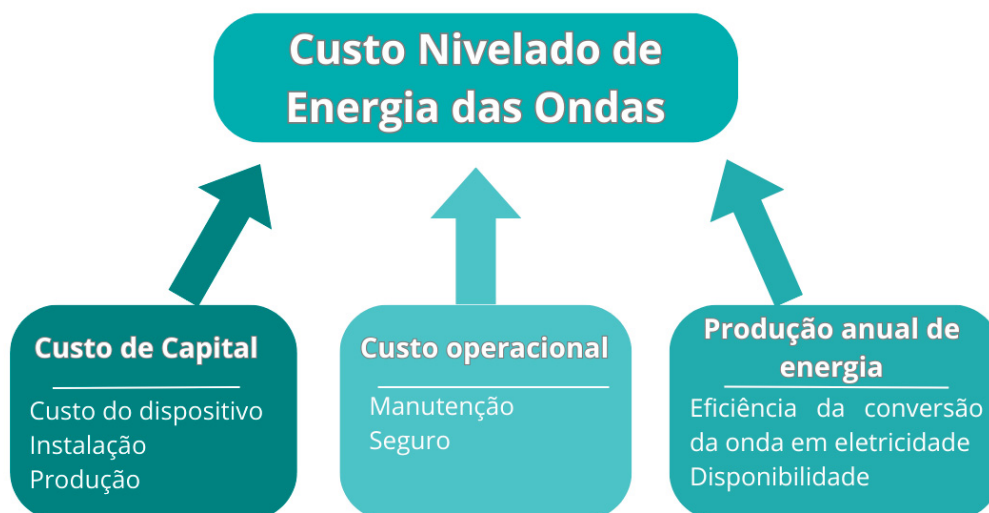
FONTE: Point Absorber – CETO System

2.3 SISTEMAS DE EXTRAÇÃO DE ENERGIA (*POWER TAKE-OFF*) PARA CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS

O sistema de extração de energia (*Power Take-Off - PTO*) de um conversor de energia das ondas é definido como o mecanismo pelo qual a energia absorvida pelo conversor primário é transformada em eletricidade utilizável (Ahamed *et al.* 2020). O conversor primário pode, por exemplo, ser uma câmara fechada para uma coluna de água oscilante ou uma boia absorvedora pontual. O sistema PTO é de grande importância, pois afeta diretamente não apenas a eficiência da conversão da energia das ondas em eletricidade, mas também contribui para a massa, o tamanho e a dinâmica estrutural do conversor de energia das ondas (Têtu, 2017).

Ao exercer essa influência direta sobre o conversor de energia das ondas, o sistema PTO tem um impacto direto no custo nivelado de energia (LCOE) (SI OCEAN, 2013). A confiabilidade do sistema PTO afeta a disponibilidade, ou seja, a produção de energia e os custos operacionais e de manutenção. A influência do PTO sobre o LCOE está esquematizada na Figura 15. O sistema PTO tem um impacto direto no

FIGURA 15 – VARIÁVEIS ECONÔMICAS QUE DEFINEM O CUSTO NIVELADO DE ENERGIA PARA CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS.



FONTE: Figura adaptada de SI OCEAN (2013).

custo de capital, no custo operacional e na produção anual de energia do dispositivo (SI OCEAN, 2013).

De acordo com Têtu (2017) sistema PTO é o subsistema crítico que converte o movimento mecânico lento e de alta força do corpo oscilante em eletricidade. Os sistemas de PTO mais comuns para esse tipo de WEC incluem:

- **Sistemas hidráulicos:** Esses sistemas utilizam o movimento induzido pelas ondas para acionar cilindros hidráulicos ou pistões, que pressurizam um fluido (geralmente óleo ou água) (Drew *et al.* 2009; Ahamed *et al.* 2020). Esse fluido sob alta pressão, por sua vez, aciona um motor hidráulico acoplado a um gerador (Têtu, 2017). Esse método é bem adequado à natureza de alta força e baixa velocidade do movimento das ondas e é utilizado em dispositivos como o Pelamis e o AquaBuOY (Drew *et al.* 2009; Astariz; Iglesias, 2015).
- **Acionamento mecânico direto:** Utilizam componentes mecânicos, para converter o movimento linear ou rotacional lento no movimento rotacional de alta velocidade necessário para um gerador convencional (Penalba; Ringwood, 2016; Têtu, 2017; Shadman *et al.* 2019; Ahamed *et al.* 2020).
- **Acionamento elétrico direto (geradores lineares):** Essa tecnologia converte diretamente o movimento linear (de subida e descida ou de avanço e recuo) do WEC em eletricidade, sem etapas intermediárias hidráulicas ou mecânicas (Xiros; Dhanak, 2016; Têtu, 2017). Um translador com ímãs permanentes se move em relação a um estator com bobinas, induzindo uma corrente elétrica (Coelho, 2018; Ahamed *et al.* 2020).

- **Massa rotativa:** Alguns dispositivos, utilizam o movimento de arfagem e balanço do casco para fazer com que uma grande massa interna (um pêndulo ou volante de inércia) gire, acionando diretamente um gerador (Guo *et al.* 2022; Said; Ringwood, 2021).

2.4 DESAFIOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS

A implementação em larga escala de energia das ondas inclui vários obstáculos. Os principais desafios associados à energia das ondas são:

- **Econômicos e financeiros:** A viabilidade comercial da energia das ondas é significativamente limitada pelos altos custos e pelos riscos financeiros (Gallutia *et al.* 2022; Ringwood *et al.* 2023).
 1. *Alto custo nivelado de energia:* O LCOE da energia das ondas é atualmente muito superior ao de outras fontes renováveis, como a eólica e a solar, bem como ao das fontes convencionais de energia (Guo *et al.* 2022; Astariz; Iglesias, 2015).
 2. *Altos custos de capital e investimento inicial:* Os conversores de energia das ondas apresentam custos iniciais substanciais relacionados à fabricação, construção e instalação (Zhang *et al.* 2023; Gallutia *et al.* 2022; Foteinis, 2022). Esses custos são impulsionados pela necessidade de projetos robustos que possam suportar condições oceânicas extremas, em vez de estados de mar mais comuns e suaves (Drew *et al.* 2009; Gallutia *et al.* 2022).
 3. *Operação e manutenção apresentam elevado custo:* O ambiente offshore hostil resulta em altos custos de operação e manutenção (Guo *et al.* 2022; Foteinis, 2022). A salinidade, as forças extremas e a bioincrustação contribuem para o desgaste dos equipamentos, e o acesso aos dispositivos para manutenção é difícil e caro (Ahamed *et al.* 2020; Thennakoon *et al.* 2023; Zhang *et al.* 2023).
 4. *Barreiras de financiamento e investimento:* A indústria da energia das ondas enfrenta dificuldades para atrair investimentos devido ao seu estágio inicial de desenvolvimento, à alta percepção de riscos, às incertezas tecnológicas e à falta de projetos comercialmente bem-sucedidos (Astariz; Iglesias, 2015; Ahamed *et al.* 2020; Foteinis, 2022).
- **Tecnológicos e técnicos:** Houve muitos conceitos e designs de conversores de energia das ondas ao longo dos anos. Muitos deles permaneceram nas fases de projeto, testes em laboratório ou testes com protótipos, enquanto apenas alguns poucos foram de fato implantados (Aderinto; Li, 2019; Zhang *et al.* 2023).

1. *Tempo de vida dos dispositivos*: Um dos principais desafios é projetar conversores de energia das ondas que consigam sobreviver a condições climáticas extremas e ondas de tempestade (Drew *et al.* 2009; Magagna *et al.* 2018). Essa exigência de robustez aumenta significativamente os custos de capital (Drew *et al.* 2009; Gallutia *et al.* 2022).
 2. *Eficiência na conversão de energia*: converter o movimento oscilatório, lento (cerca de 0,1 Hz) e de alta força das ondas em eletricidade estável e compatível com a rede elétrica é um problema técnico complexo (Drew *et al.* 2009; Zhang *et al.* 2023).
- **Integração à rede de energia e infraestrutura**: Conectar fazendas de energia das ondas à rede elétrica apresenta seu próprio conjunto de dificuldades.
 1. *Variabilidade da geração de energia*: A energia gerada pelas ondas é altamente variável e intermitente, devido à natureza dinâmica do oceano, o que complica a integração e o gerenciamento da energia na rede elétrica (Penalba; Ringwood, 2016; Said; Ringwood, 2021).
 2. *Falta de infraestrutura*: Muitos dos locais mais promissores para a energia das ondas estão situados em regiões *offshore* remotas, onde a infraestrutura de rede é precária ou inexistente (Thennakoon *et al.* 2023). O custo da instalação de cabos submarinos para conexão à rede elétrica é elevado (IRENA, 2020).
 3. *Qualidade da energia*: A energia bruta produzida pelos conversores de energia das ondas frequentemente não é adequada para conexão direta à rede. É necessário um condicionamento de energia para atender aos requisitos rigorosos de estabilidade de tensão e frequência exigidos pelos códigos da rede elétrica (Penalba; Ringwood, 2016; Said; Ringwood, 2021).
 4. *Armazenamento de energia*: Para suavizar a produção de energia flutuante, muitas vezes são necessários sistemas de armazenamento de energia, o que aumenta o custo e a complexidade total do projeto (Zhang *et al.* 2023).
 - **Ambientais, regulamentação e social**: Além dos obstáculos técnicos e econômicos, os projetos de energia das ondas enfrentam barreiras ambientais e administrativas.
 1. *Incerteza ambiental*: Os impactos ambientais de longo prazo das fazendas de energia das ondas sobre os ecossistemas marinhos ainda não são totalmente compreendidos (Cruz; Sarmiento, 2004; IRENA, 2020). Podendo incluir poluição sonora, efeitos sobre a vida marinha e alterações nos processos costeiros (Gallutia *et al.* 2022).

2. *Processos de regulamentação e de licitação*: A obtenção das permissões e licenças necessárias para projetos de energia das ondas pode ser um processo longo, complexo, envolvendo múltiplos órgãos administrativos (Ocean, 2020).
3. *Conflitos de uso do espaço marinho*: As fazendas de energia das ondas podem entrar em conflito com outros usos do mar, como a pesca, rotas de navegação, áreas de treinamento militar e atividades recreativas (Cruz; Sarmento, 2004).
4. *Falta de normas e dados*: Por ser um campo emergente, ainda há escassez de normas técnicas internacionais estabelecidas para o projeto e os testes dos dispositivos (Zhang *et al.* 2023). Além disso, a falta de dados de ondas com alta resolução e longo prazo pode dificultar a seleção de locais e o planejamento de projetos (Khare; Bhuiyan, 2022).

O desenvolvimento da energia das ondas também promove benefícios econômicos amplos, como a modernização da infraestrutura, reativação de setores como a construção naval e o surgimento de novas cadeias produtivas (Lavidas *et al.* 2020). A tecnologia estimula a economia azul e contribui para a diversificação da indústria marítima, gerando valor além da geração elétrica direta (Astariz; Iglesias, 2015). Adicionalmente, impulsiona a inovação tecnológica e demanda competências em engenharia oceânica, materiais avançados, controle automático e manufatura especializada (Zhang *et al.* 2023).

2.5 MODELOS E PREVISÃO

Modelos computacionais são uma ampla classe de métodos que utilizam o poder de computação para estudar fenômenos complexos (Quinn, 2020). Sendo assim, estes transformam observações em previsões sobre eventos futuros, servindo como ferramentas para testar hipóteses, extrair valor dos dados e analisar comportamentos. As respostas obtidas a partir desses modelos são fundamentais para compreender, projetar, gerenciar e prever sistemas e processos complexos, desde políticas públicas até sistemas autônomos. Atualmente, os modelos computacionais vão além dos domínios tradicionais da engenharia e da ciência, sendo amplamente utilizados em áreas tão diversas quanto finanças, economia, gestão empresarial, formulação de políticas públicas e planejamento urbano. (Calder *et al.* 2018)

Na década de 1990, através do uso de modelos numéricos de ondas geradas pelo vento, Pontes *et al.* (1997), apresentaram resultados promissores para uso de recursos de energia das ondas em mar aberto. A partir desse trabalho, os autores

desenvolveram um atlas de recursos energéticos Europeu (WERATLAS) (Pontes, 1998) para avaliar e monitorar parâmetros ondulatórios relacionados à conversão de energia.

Outros autores também relataram avanços no detalhamento de fontes e recursos associados a conversores de ondas, como: Pontes (1998), Cornett (2006), Reguero *et al.* (2015). Principalmente os estudos de Cornett (2006), que apresentou um inventário de recursos energéticos e previsão numérica de ondas ao redor de toda costa do Canadá e realizou um levantamento global sobre alteração dos recursos energéticos das ondas, através de 10 anos de dados do modelo WAVEWATCH III. No Brasil estudos de longo período sobre ondas e seu potencial energético ainda são incipientes e inovadores (Contestabile *et al.* 2015; Reguero *et al.* 2015; Espindola; Araújo, 2017).

2.6 MODELAGEM DAS ONDAS

A modelagem computacional é o processo de usar simulações matemáticas e baseadas em computador para representar e estudar sistemas, fenômenos ou processos do mundo real. Envolve a criação de algoritmos, simulações e técnicas numéricas para compreender e prever o comportamento de um sistema sob diferentes condições. A modelagem das ondas oceânicas é essencial por dois motivos principais: primeiro, permite uma compreensão abrangente da variabilidade temporal e espacial das condições de onda; segundo, apoia a identificação de locais adequados para o aproveitamento da energia das ondas.

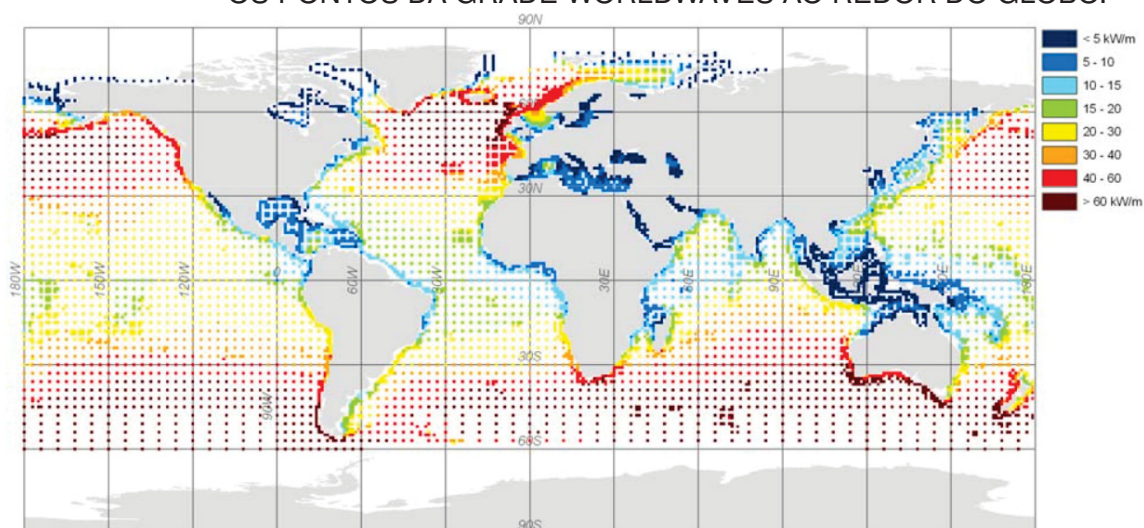
Ferramentas de modelagem numérica são comumente aplicadas durante o desenvolvimento e a otimização de conversores de energia das ondas (WECs), pois possibilitam a simulação do desempenho dos dispositivos sob diferentes estados de mar e condições específicas de cada local (Ringwood¹, 2022). Nesse contexto, o modelo TOMAWAC (openTELEMAC-MASCARET) foi utilizado neste estudo para simular as características das ondas e avaliar o potencial energético ao longo do litoral do Paraná, Brasil, contribuindo para o planejamento estratégico da implementação de WECs.

2.7 POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ONDAS

2.7.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Ao considerar a energia das ondas como fonte de produção de eletricidade é relevante e interessante olhar para as estimativas do tamanho do potencial de utilização. As primeiras estimativas da potência das ondas global disponível indicaram um potencial total de 2,7 TW (Isaacs; Schmitt, 1980). Mørk *et al.* (2010) apresentam um estudo mais detalhado e atualizado do potencial mundial de energia das ondas, ilustrado na Figura 16.

FIGURA 16 – POTÊNCIA TEÓRICA BRUTA ANUAL DAS ONDAS GLOBAIS PARA TODOS OS PONTOS DA GRADE WORLDWAVES AO REDOR DO GLOBO.

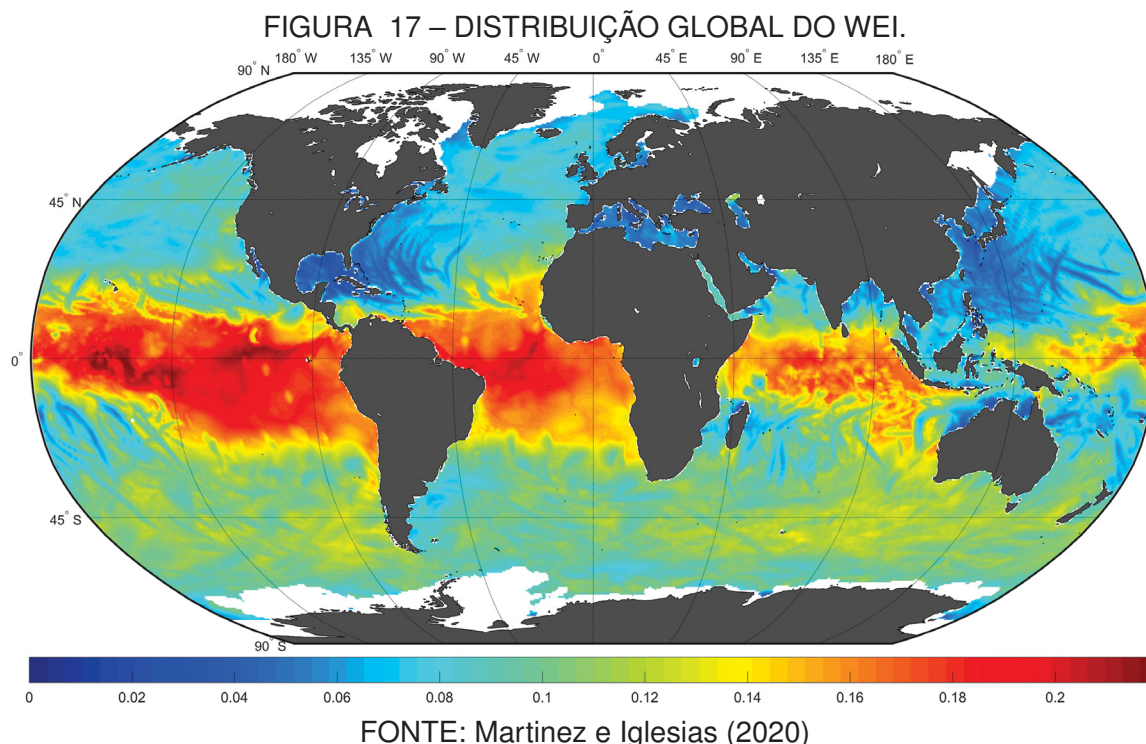


FONTE: Mørk *et al.* (2010)

O recurso teórico bruto global é estimado em cerca de 3,7 TW, 3,5 TW é o recurso calculado excluindo áreas com menos de 5 kW/m e o recurso líquido (onde também são excluídas áreas com potencial cobertura de gelo) é cerca de 3 TW; a redução total dos recursos brutos para os recursos líquidos é então de cerca de 20%. Na Europa, verifica-se uma diminuição de 25% entre os recursos brutos e os recursos líquidos, principalmente como resultado da cobertura de gelo, sendo os valores brutos e líquidos de 381 e 286 GW, respetivamente. Para contextualizar esses números, o consumo mundial total em 2008 foi de 142.300 TWh (Kofoed, 2017) o que corresponde a uma potência média diária de 16,2 TW. Em termos de consumo de eletricidade, os números correspondentes são 20.261 TWh e 2,3 TW (Kofoed, 2017). Assim, o recurso total de energia das ondas excede significativamente o consumo global de electricidade.

O potencial energético global das ondas é vasto e promissor, estimando-se que possa fornecer uma fonte significativa de energia renovável para atender à crescente demanda mundial por eletricidade. Estima-se que o potencial recurso mundial de energia das ondas seja de 2 TW (Thorpe, 1999).

Os resultados de Martinez e Iglesias (2020) apresentam uma nova abordagem para a avaliação e classificação dos recursos de energia das ondas, introduzindo o Índice de Explorabilidade das Ondas (WEI - *Wave Exploitability Index*) (Figura 17). Este índice oferece uma medida de uma área para a exploração de energia das ondas, levando em conta não apenas a potência média das ondas, mas também sua variabilidade. O WEI considera a altura significativa média das ondas e a altura máxima individual das ondas para identificar áreas onde as condições são mais favoráveis para a geração de energia. O artigo destaca que áreas com alta potência média das ondas



nem sempre são ideais devido à alta variabilidade. Em vez disso, regiões como o Chile e o sudoeste da Austrália, com altos valores de WEI e estabilidade nas condições das ondas, mostram grande potencial para o desenvolvimento futuro de energia das ondas.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Brasil tem uma costa de 7.367 km que se estende pelo oceano Atlântico. Com essa vasta área marítima, tem um enorme potencial para a geração de energia, com isso nos últimos anos (Lisboa *et al.* 2017), o país tem realizado estudos sobre a conversão de energia das ondas. Mesmo ainda sendo muito escassos e recentes, os estudos sobre a energia das ondas no Brasil encontram-se em fase inicial, sendo a ausência de dados do potencial energético disponível um dos principais motivos por ter pouca informação a respeito desse assunto.

O estudo realizado por Bastos *et al.* (2023) teve como foco avaliar o potencial de geração de energia das ondas no Brasil por meio de dispositivos de Coluna de Água Oscilante (OWC). O Brasil apresentou um potencial significativo para aproveitamento da energia das ondas, estimado em 114 GW (dividido entre amplitude das marés e energia das ondas). A pesquisa envolveu georreferenciamento de 319 locais adequados para implementação do OWC utilizando o *software* QGIS, muitos deles são principalmente afloramentos rochosos com encostas íngremes, cruciais para uma implantação eficaz de OWC. O estudo estima uma capacidade energética de 9,84 GW e uma geração anual de energia de 83.689 GWh nesses locais, o que representa o dobro do consumo anual de energia do estado do Rio de Janeiro. A utilização dessa energia das ondas poderia reduzir significativamente as emissões de CO_2 , contribuindo para as metas

de descarbonização do Brasil. A Tabela 5 mostra o potencial energético dos estados costeiros do Brasil.

TABELA 5 – POTENCIAL DE ENERGIA DOS ESTADOS COSTEIROS BRASILEIROS

Estado Costeiro	Potencial (GW)	Comprimento da Costa (km)
Amapá	7.81	600
Pará	7.30	562
Maranhão	8.35	640
Piauí	0.96	66
Ceará	8.38	573
Rio Grande do Norte	6.00	410
Paraíba	1.84	138
Pernambuco	2.94	187
Alagoas	3.60	229
Sergipe	2.47	163
Bahia	14.10	1103
Espírito Santo	5.94	400
Rio de Janeiro	9.80	635
São Paulo	9.60	622
Paraná	1.51	98
Santa Catarina	10.90	531
Rio Grande do Sul	12.80	622

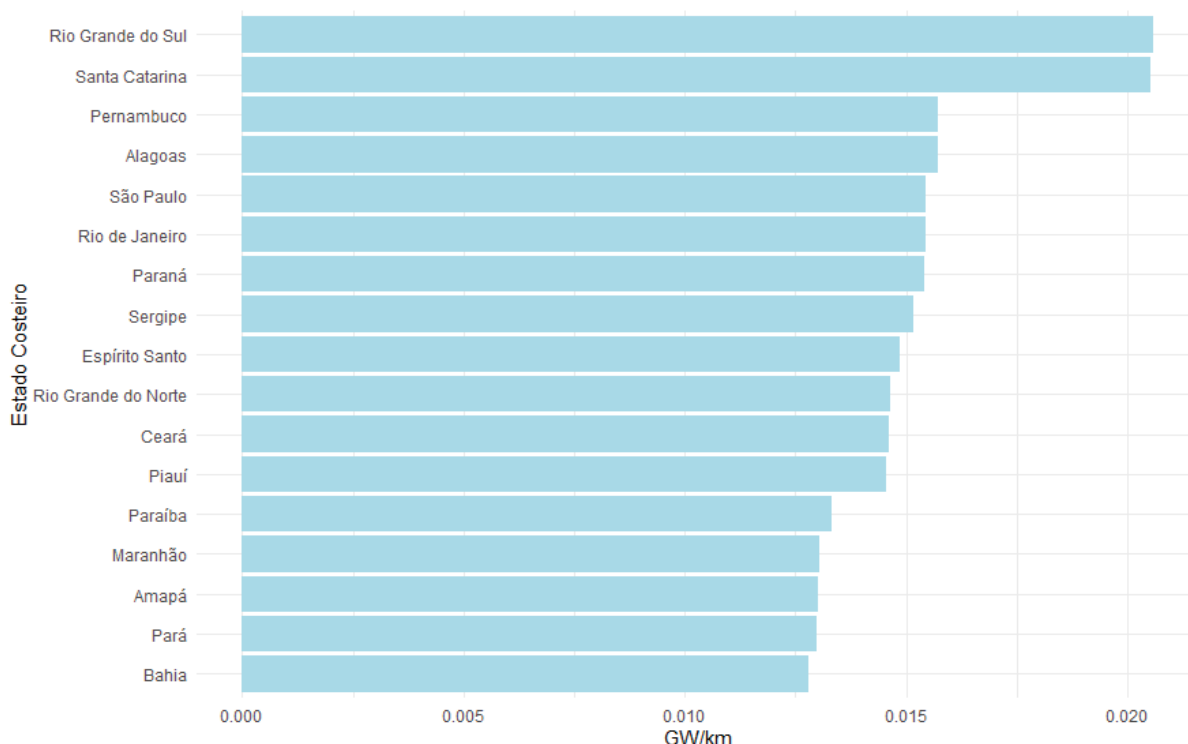
Fonte: Bastos *et al.* (2023)

A Figura 18 mostra o potencial energético de cada estado dividido pelo comprimento da costa de cada estado. A análise feita no gráfico permite otimizar a escolha dos locais para implantação, pois indica quais estados têm maior eficiência energética relativa ao seu litoral. A abordagem de normalizar o potencial por quilômetro de costa complementa a pesquisa ao oferecer uma métrica mais justa para comparação entre estados. Rio Grande do Sul e Santa Catarina apresentam os maiores valores de potencial energético padronizado. Isso indica que, apesar de seus litorais não serem os mais extensos, a densidade energética disponível nesses estados é relativamente alta.

Pernambuco e Alagoas também se destacam, sugerindo que essas regiões possuem boas condições para a captação de energia das ondas. Bahia, Pará e Amapá aparecem nas últimas posições, indicando que, apesar de terem grandes extensões de costa, a densidade de energia disponível por quilômetro é menor. Isso pode estar relacionado a fatores como a batimetria da plataforma continental, a incidência de ondas ou características geográficas locais.

Estados como Rio de Janeiro e São Paulo possuem valores intermediários, mostrando que, apesar de serem economicamente importantes, sua densidade energética em relação ao comprimento da costa não é das mais altas. Estados menores, como o Paraná e Sergipe, possuem valores mais altos do que estados com litoral

FIGURA 18 – POTENCIAL DE ENERGIA POR ESTADO COSTEIRO (GW/km).



FONTE: Bastos *et al.* (2023)

muito maior, como a Bahia, indicando que o potencial energético deve ser analisado proporcionalmente ao tamanho da costa e não apenas em termos absolutos.

Um outro estudo de 35 anos de resultados do modelo global ECMWF ERA-Interim realizado por Espindola e Araújo (2017), em 49 pontos situados em toda a costa brasileira, avaliando a variabilidade, clima das ondas e comparação com conversores existentes, concluiu que o Brasil possui de 8 a 21 kW/m de potencial médio das ondas. Sendo esses valores considerados baixos a médios em comparação ao Oceano Atlântico Norte, onde esse potencial pode ultrapassar 40 kW/m. Embora os valores do potencial de onda sejam apenas intermediários, a baixa variabilidade temporal indica que várias localidades brasileiras são adequadas para a conversão da energia das ondas. Esses locais não estão concentrados apenas na área sul, onde o potencial é maior (Kirinus *et al.* 2018).

Contestabile *et al.* (2015) analisaram os recursos energéticos das ondas na costa de Santa Catarina utilizando dados do modelo global ECMWF ERA-Interim e realizando modelagem numérica com o modelo MIKE-21. A pesquisa encontrou uma densidade média de potência entre 8 e 14,5 kW/m, além de identificar as direções e frequências mais relevantes para a conversão de energia de alta intensidade.

2.8 FATORES DETERMINANTES

De acordo com Stech e Lorenzzetti (1992), na plataforma continental sudeste do Brasil, a variabilidade da circulação das ondas no inverno é altamente dominada pela passagem de frentes frias. Indicando que essas frentes podem gerar ondas mais extremas devido ao aumento da incidência de eventos extremos na região.

A compreensão do processo de geração das ondas na região costeira do Paraná torna-se importante para a definição de locais de alto potencial energético e/ou baixa variabilidade desta fonte. Sendo assim, a dinâmica atmosférica nesta região se deve aos processos de geração das ondas, que variam a cada estação (Reguero *et al.* 2015). De acordo com Espindola e Araújo (2017), a direção das ondas apresenta clara distinção entre altas e baixas latitudes, ainda assim, as ondas possuem alta estabilidade nas regiões ao norte de 28°S (Contestabile *et al.* 2015).

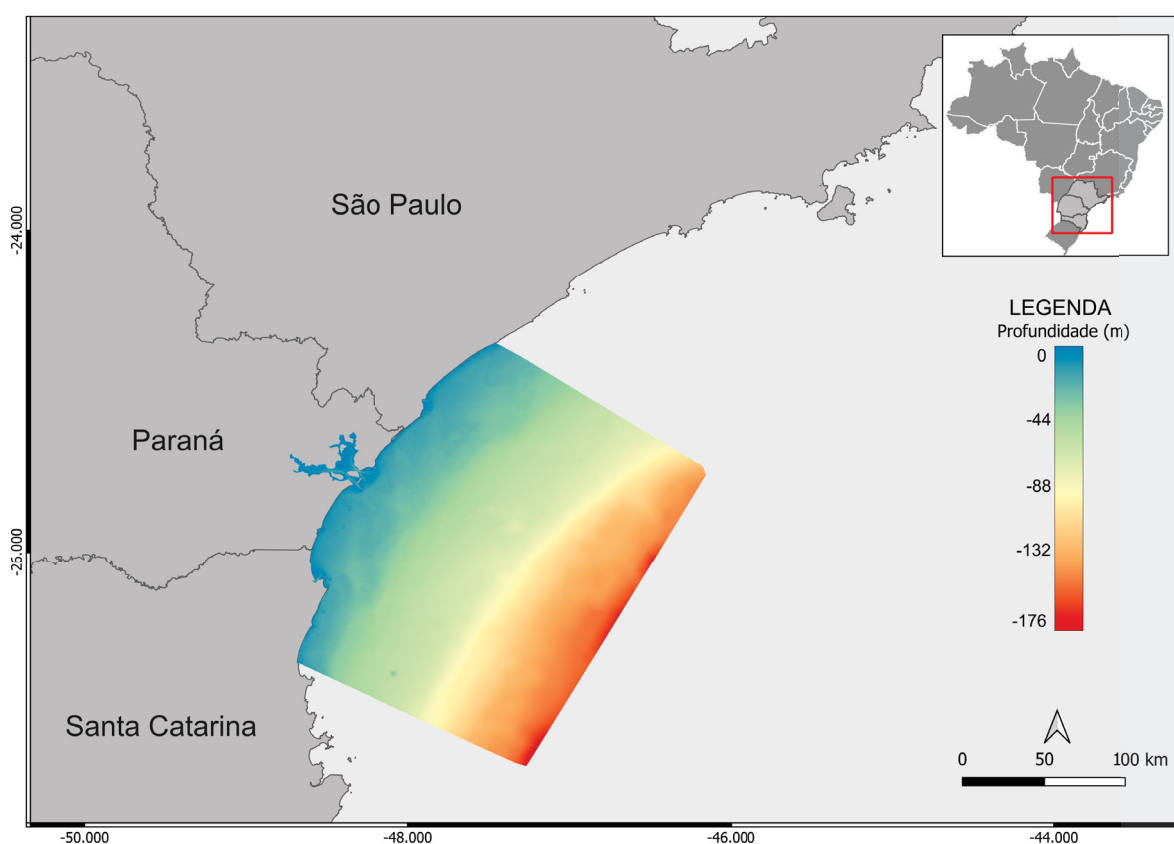
A circulação atmosférica da Baía Sudeste do Brasil (SBB) e da Plataforma Sul do Brasil (SBS) varia entre elas, pois o primeiro é influenciado diretamente pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (SASA) enquanto o último é uma zona de propagação para sistemas de baixa pressão geralmente portadores de frentes frias (Dereczynski; Menezes, 2015). O SASA é responsável pela boa estabilidade termodinâmica resultando em ventos nordeste (NE) de fraca intensidade em toda a SBB. De acordo com Stech e Lorenzzetti (1992), esses sistemas potencializam as rajadas de vento, estabelecendo a Zona de Convergência do Atlântico Sul durante os meses de novembro a março. Além disso, durante o inverno, há sistemas frontais frios transitórios que chegam do SBS.

Devido a este intenso e variável padrão de circulação atmosférica, a SSB e SBS possuem um grande potencial para exploração de energia marinha advinda das ondas. Entretanto, estudos ainda são necessários para aumentar o desenvolvimento e a possibilidade de implantação de dispositivos renováveis na costa paranaense, de forma a disponibilizar energia renovável e de baixo impacto ambiental à população. Neste contexto os resultados gerados deste projeto podem indicar a viabilidade do uso desse recurso no litoral do estado do Paraná, além de indicar locais com presença de potencial considerável. Sendo assim, frente ao exposto, é possível perceber a importância meteorológica do litoral paranaense frente às mudanças climáticas recentes. Aliado a isto, existe um significativo potencial energético das ondas passível de conversão e que deve ser mapeado e estimado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo está localizada no litoral paranaense contendo a região da plataforma continental interna até a profundidade de aproximadamente 160m, estendendo-se desde o norte do estado de Santa Catarina até o sul de São Paulo (Figura 19). Nesta região foram, captadas informações de ondas de bancos globais de acesso livre e implementados em um modelo de ondas de código aberto e acesso livre. Após a aquisição dos dados e subsequente modelagem, os resultados foram analisados e avaliados visando atender aos objetivos propostos.

FIGURA 19 – MAPA DA ÁREA DE ESTUDO COM A PROFUNDIDADE (M) LOCAL.



FONTE: GEBCO 2023 elaboração própria (QGIS/Blue Kenue)

3.1 MALHA COMPUTACIONAL

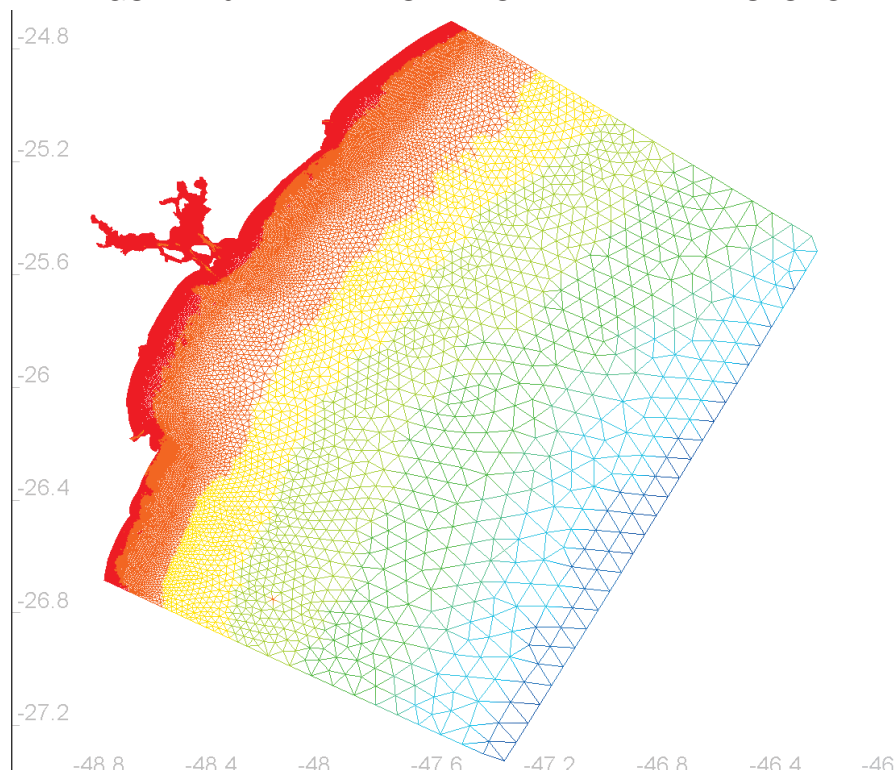
Para os dados de batimetria foi utilizado a grade global (Group, 2023), foi recortado ao retângulo que abrange o litoral do Paraná e adjacências, reprojetoado para SIRGAS 2000 / UTM 22S e interpolado para os nós da malha no Blue Kenue. Na zona costeira, aplicou-se refinamento de malha com dados extraídos de cartas náuticas.

O Blue Kenue foi desenvolvido pelo *Canadian Hydraulic Centre* (CHC) e agregado a lista de programas recomendados para usuários do sistema *open TELEMAC*.

MASCARET, sendo uma de suas funções a de criação de malhas de elementos finitos, além da visualização de resultados de saída do modelo.

A malha computacional desenvolvida para este trabalho teve seu número de nós de aproximadamente 75.000 (Figura 20).

FIGURA 20 – MALHA NUMÉRICA DA ÁREA DE ESTUDO.



FONTE: A Autora (2024)

3.2 MODELO ONDULATÓRIO - TOMAWAC

O sistema de modelagem *open* TELEMAC-MASCARET (Hervouet, 2007) é formado por um conjunto de módulos, em duas ou três dimensões, que podem ser utilizados para o estudo de aspectos relacionados à hidrodinâmica, transporte de sedimentos e ondas geradas pelo vento em regiões costeiras e oceânicas. O sistema utiliza o método de elementos finitos para solucionar as equações inerentes dos módulos utilizados. O módulo ondulatório TOMAWAC (*TELEMAC-Based Operational Model Addressing Wave Action Computation*) foi utilizado para avaliar a variabilidade das ondas na área de estudo por se tratar de um modelo espectral de terceira geração que resolve a equação da ação de onda em malha não-estruturada de elementos finitos, permitindo representar com eficiência a costa recortada do litoral do Paraná (baías, ilhas e canais) no mesmo ecossistema TELEMAC-MASCARET/Blue Kenue. O modelo opera em modo não-estacionário e inclui os principais termos-fonte costeiros requeridos para 0–160 m de profundidade (refração por batimetria, quebra por profundidade, atrito de fundo e *whitecapping*). Entre alternativas de 3ª geração (p.ex., SWAN, WAVEWATCH

III, WAM), o TOMAWAC foi preferido pela flexibilidade da malha, integração direta ao fluxo de trabalho já utilizado e adequação à transformação costeira necessária a este estudo. Neste trabalho foi utilizado a versão v7p2r3.

O modelo de onda de terceira geração TOMAWAC (Benoit, 2003) faz parte do sistema *open* TELEMAC-MASCARET, sendo um modelo espectral (Equação 3.1) baseado na equação da conservação da densidade de ação da onda (Equação 3.2), podendo ser utilizado na sua forma estacionária e não-estacionária, calculando o estado do mar resolvendo a equação da conservação da densidade de ação das ondas, para o espectro direcional de onda.

Neste estudo, utilizou-se exclusivamente o modo não-estacionário. Esse modo implica a decomposição do espectro direcional das ondas em um número limitado de frequências e direções de propagação. Tal modelo é classificado como de terceira geração, semelhante ao modelo WAM (*Wave Model*) (Komen *et al.* 1994) por não impor qualquer parametrização sobre a distribuição direcional ou espectral da energia ou da ação da onda. Cada componente do espectro da ação da onda evolui ao longo do tempo conforme os processos modelados pelo *software*.

$$N(x, k, t) = N(x, y, k_x, k_y, t) \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial N(f, \theta)}{\partial t} + \frac{\partial \dot{x}N}{\partial x} + \frac{\partial \dot{y}N}{\partial y} + \frac{\partial \dot{k}_x N}{\partial k_x} + \frac{\partial \dot{k}_y N}{\partial k_y} = Q(k_x, k_y, x, y, t) \quad (3.2)$$

Onde N é o espectro de onda direcional, k_x e k_y são os componentes direcionais x e y do vetor do número de onda e t é o tempo. $\dot{x}$, $\dot{y}$, $\dot{k}_x$ e $\dot{k}_y$ são taxas de transferência dadas pela teoria linear das ondas (Benoit, 2003).

Além disso, o espectro de energia das ondas, $E(f, \theta)$, pode ser associado a $N(f, \theta)$ através da Equação 3.3: Onde ρ e g são a massa específica da água e a aceleração da gravidade, respectivamente. A integração de $E(f, \theta)$, ao longo das frequências e direções discretizadas leva à Equação 3.4, devolvendo a energia por unidade de área das ondas multidirecionais aleatórias, onde a_m é a *amplitude* (m).

$$E(f, \theta) = N(f, \theta) \rho g \quad (3.3)$$

$$\sum_f^{f+d} \sum_\theta^{\theta+d\theta} \frac{1}{2} \rho g a_m^2 = E(f, \theta) df d\theta \quad (3.4)$$

Depois de apresentar as equações e o espectro, o próximo passo é informar ao modelo o estado inicial e o que entra e o que sai pelas bordas. Para isso, usamos dados do ECMWF (ERA5).

3.3 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

O *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) disponibiliza reanálises e previsões operacionais com vários produtos. Neste trabalho empregaram-se o ERA5 (vento a 10 m, componentes U_{10} e V_{10}) e o ERA5 (parâmetros de onda), amostrados a cada 6 h e com resolução espacial de $0,25^\circ$ (aprox. 28 km), disponíveis desde 1959 até o presente.

As condições de contorno do modelo ondulatório foram prescritas em termos do espectro direcional $E(f, \theta)$, reconstruído a partir de H_s , T_p e direção média D_p do ERA5. As componentes U_{10}/V_{10} do ERA5 foram aplicadas como forçantes de vento do TOMAWAC (não como condições iniciais ou de contorno). Variáveis atmosféricas como temperatura e pressão não foram utilizadas nesta configuração desacoplada do modelo de ondas. Os campos do ECMWF foram interpolados no tempo, de 6h para o passo interno do modelo ($\Delta t = 300$ s), por interpolação linear, e no espaço, por interpolação bilinear para os nós e elementos da malha. Assim, as variáveis ondulatórias entram no modelo exclusivamente via $E(f, \theta)$ nas fronteiras abertas, enquanto o vento atua como fonte de geração por vento ao longo do domínio.

A Tabela 6 resume a parametrização adotada no TOMAWAC (período, discretização espectral e direcional, passo de tempo, condição/contorno de ondas, vento e dissipações), conforme o *steering file* utilizado, assegurando alinhamento com os dados e procedimentos metodológicos descritos.

A discretização espectral adotou 25 frequências em grade logarítmica, iniciando em $f_{\min} = 0,0333$ Hz com razão 1,15225, o que cobre períodos de 30 a 1 s com maior resolução nas baixas frequências, mantendo o custo computacional controlado. No domínio angular, 24 direções (passo de 15°) capturam mudanças de rumo típicas da plataforma interna. Para evitar choque numérico, a condição inicial foi um mar fraco ($H_s = 1$ m, $T_p = 7,8$ s, direção 305°). Nas fronteiras abertas, o espectro $E(f, \theta)$ foi reconstruído via *JONSWAP* ($\gamma = 3,3$, $\sigma_a = 0,07$, $\sigma_b = 0,09$) com espalhamento $\cos^{2s}$, combinação padrão para converter H_s – T_p –direção do ERA5 em espectro direcional compatível com o modelo.

O vento a 10 m do ERA5 (U_{10}/V_{10} , passo de 6 h) entrou como forçante no termo de geração por vento, permitindo o crescimento/ajuste local do mar. Para a transformação costeira, ativaram-se as dissipações por atrito de fundo ($C_f = 0,038$), arrebenção por profundidade (modo 3) e *whitecapping* (coeficiente 4,5), parâmetros

TABELA 6 – Resumo da configuração do modelo de ondas (TOMAWAC).

Item	Parametrização adotada
Período de simulação	2014 (01 jan–31 dez)
Passo de tempo (s)	90
Frequências (N; $f_{\min}$; razão)	25; 0,0333 Hz; 1,15225
Direções (N)	24
Condição inicial	$H_s = 1$ m; $T_p = 7,8$ s; direção 305°
Contorno de ondas	JONSWAP ($\gamma = 3,3$; $\sigma_a = 0,07$; $\sigma_b = 0,09$) + $\cos^{2s}$
Forçante de vento	ERA5 U_{10}/V_{10} (6 h)
Atrito de fundo (C_f)	0,038
Arrebentação por profundidade	ativada (modo 3)
Whitecapping (coef.)	ativado (4,5)
Paralelismo (cores)	12
Saídas (período)	a cada 40 passos (1 h)

na faixa de referência para a plataforma interna. A execução utilizou 12 processos paralelos (MPI) e saídas horárias (a cada 40 passos), compatíveis com a escala temporal dos dados e das análises subsequentes.

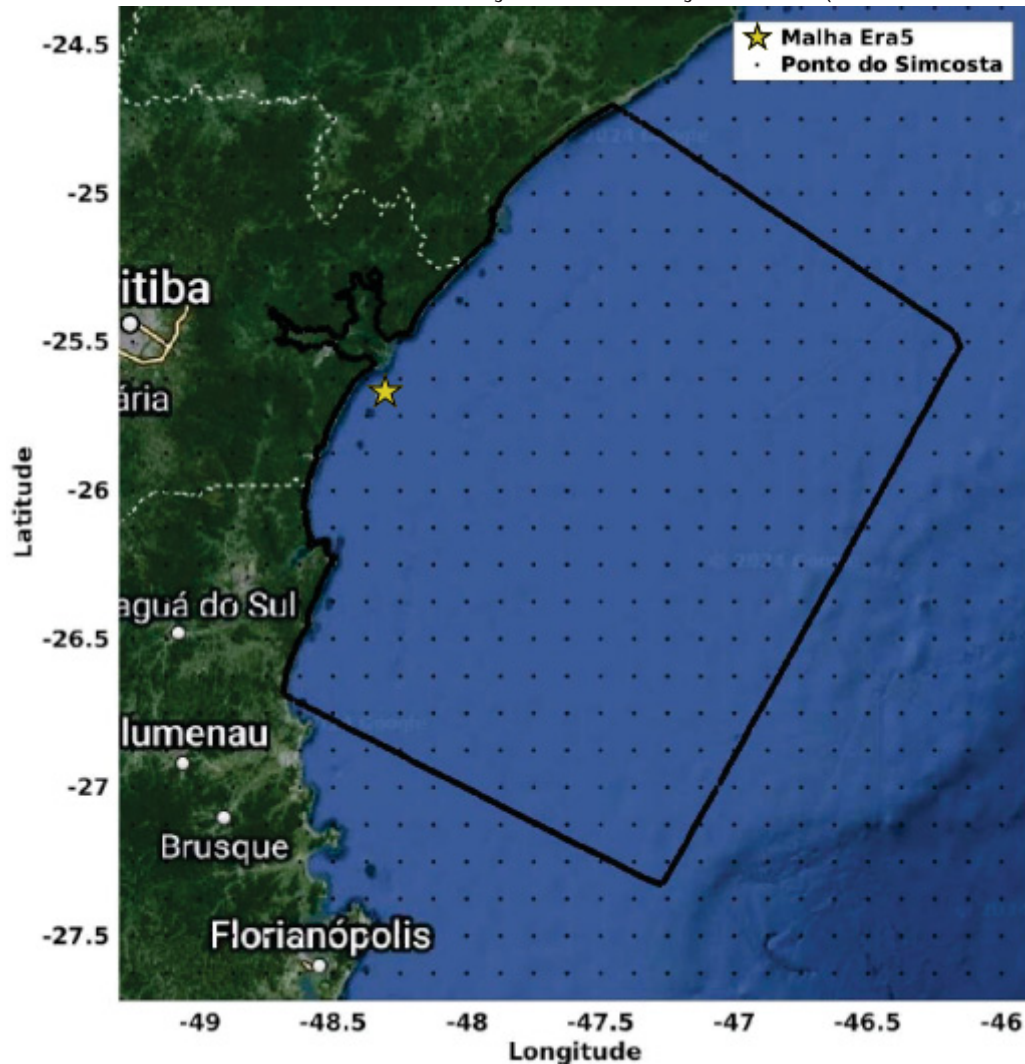
3.4 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DE ONDAS

O processo de validação de um modelo consiste em comparar seus resultados com os dados observados "*in situ*" (Bourban *et al.* 2012). Neste caso, o ano de 2014 foi escolhido para essa simulação devido à existência de dados gratuitos da boia PR-1 do projeto SiMCosta (2024). O Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira (SiMCosta) é uma rede integrada de plataformas flutuantes ou fixas, dotadas de instrumentos e sensores, com funcionamento autônomo e capacidade de coletar regularmente variáveis oceanográficas e meteorológicas, imediatamente disponibilizando gratuitamente os dados processados ao público alvo. Sendo assim, a simulação das ondas foi calibrada com os dados advindos do SiMCosta.

Para melhor avaliar as comparações, indicadores de performance foram utilizado de acordo com Hallak e Pereira Filho (2011). Os parâmetros estatísticos utilizados para a validação dos dados de H_s e T_p do ERA5 e estação PR-1, foram:

- **Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE):** É usada para expressar a precisão dos resultados numéricos com a vantagem de que o RMSE apresenta valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada. O indicador de performance está representada na Equação 3.5. O resultado desejado é quanto menor, melhor

FIGURA 21 – PONTOS DA GRADE GLOBAL DO ERA5 NA ÁREA DE ESTUDO. CONTORNO DA MALHA E A LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO PR-1 (PONTO AMARELO).



a concordância entre o modelo e observação.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (obs - mod)^2}{n}} \quad (3.5)$$

- **Erro Médio Absoluto (MAE):** Por ser menos afetado por pontos com valores anormalmente extremos (*outliers*), o MAE é considerado preciso e robusto como medida da habilidade de modelos numéricos em reproduzir a realidade (Fox, 1981). A Equação 3.6 mostra o indicador de performance. O ideal é que quanto menor, melhor a concordância entre o modelo e a observação.

$$MAE = \frac{\sum |obs - mod|}{n} \quad (3.6)$$

- **Relação de Variância (RVAR):** Relaciona o modelo e a observação indicando superestimação ou subestimação. Deve ser próxima a 1, indicando que as variân-

cias entre dados observados e modelados são iguais. A Equação 3.7 mostra o indicador de performance.

$$RVAR = \frac{mod_{var}}{obs_{var}} \quad (3.7)$$

- **Erro Relativo (ER):** Quantidade da diferença média entre os dois dados analisados. O resultado desejado é quanto menor, melhor a concordância entre o modelo e a observação. O parâmetro pode ser observado na Equação 3.8.

$$ER = \frac{\left| \left(\frac{\sum mod}{n} \right) - \left(\frac{\sum obs}{n} \right) \right|}{\left| \frac{\sum obs}{n} \right|} \quad (3.8)$$

- **Viés:** Valor médio da diferença entre os resultados do modelo e observações. Estima os erros sistemáticos que podem ter como origem na falta de habilidade do modelo em representar o ambiente estudado (Melo *et al.* 2008; Delle Monache *et al.* 2011; Edwards *et al.* 2014b). O objetivo desse parâmetro é verificar a tendência do modelo: se o valor é positivo, indica que o modelo tende a superestimar as medições; se for negativo, sugere uma tendência de subestimar. O valor ideal para esse parâmetro seria zero. A Equação 3.9 mostra o parâmetro.

$$Viés = \frac{\sum(mod - obs)}{n} \quad (3.9)$$

- **Viés Relativo (rViés):** Apresenta o viés como uma fração da média dos dados observados. Ou seja, estima a densidade relativa dos erros ao invés da verdadeira densidade de erros (Viés) (Khan *et al.* 2016). O resultado desejado desse parâmetro se o resultado é positivo, o modelo tende a superestimar medições, se negativo, o modelo tende a subestimar as medições. O valor ideal seria igual a zero. O indicador de performance está representado abaixo (Equação 3.10).

$$rViés = \frac{Bias}{obs_{mean}} \quad (3.10)$$

- **Índice de Espelhamento (SI):** Apresenta a porcentagem da diferença entre o erro quadrático médio e a média dos dados observados, ou seja, indica a porcentagem do erro esperado para determinado parâmetro (Melo *et al.* 2008; Edwards *et al.* 2014b). Para o resultado desejado, quanto menor, melhor a concordância entre modelo e observação. O indicador de performance está na Equação 3.11.

$$SI = \frac{RMSE}{obs_{mean}} \quad (3.11)$$

- **Inclinação Quadrática Média (SS):** Resultado de uma análise de regressão na qual nenhum dos dois conjuntos de dados é considerado como perfeito, mas ambos contribuem igualmente para o erro (Melo *et al.* 2008; Dos Santos, 2009). O parâmetro está representado pela Equação 3.12. Situação ideal SS=1. Valores de SS menores que 1 significam subestimativa do modelo e valores maiores significam superestimativa.

$$SS = \sqrt{\frac{\sum(mod)^2}{\sum(obs)^2}} \quad (3.12)$$

- **Coeficiente de Correlação de Pearson (R):** O coeficiente de Pearson reflete a correlação linear entre os dados comparados (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), 1989; Legates; McCabe Jr, 1999; Edwards *et al.* 2014b). Quanto mais próximo a 1 indica melhor correlação linear. A Equação 3.13 mostra o parâmetro.

$$R = \frac{\sum[(mod - mod_{mean})(obs - obs_{mean})]}{\sqrt{[\sum(mod - mod_{mean})^2][\sum(obs - obs_{mean})^2]}} \quad (3.13)$$

- **Coeficiente de Correlação de Spearman (r_s):** O coeficiente de Spearman demonstra a força da correlação monotônica entre os dados, e pode ser utilizada no caso de dados não lineares como período e direção de ondas (Wilks, 2011). Valores próximos a 1 indicam maior correlação, sendo o resultado desejado. O parâmetro está representado pela Equação 3.14.

$$r_s = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (3.14)$$

Nas equações acima tem-se n : Quantidade de dados observados, obs : Dado observado, mod : Dados modelado, obs_{mean} : Média dos dados observados, mod_{mean} : Média dos dados modelados, obs_{var} : Variância dos dados observados, mod_{var} : Variância dos dados modelados e d_i Diferença entre a boia e modelo.

Como D_p é uma variável circular (0° e 360° representam a mesma direção), a validação foi conduzida com métricas que evitam artefatos de descontinuidade. Inicialmente, o erro angular foi calculado como a diferença mínima entre as direções modelada e observada, garantindo que o erro pertença ao intervalo $[180^\circ, 180^\circ]$ (Rogers; Wang, 2007).

3.5 ECO WAVE POWER E CETO-6

Neste estudo serão analisados dois tipos de conversores de energia das ondas (WECs), selecionados por aderência ao regime energético local e às condições logísticas da costa do Paraná, a Tabela 7:

- Eco Wave Power (EWP), dispositivo *nearshore/onshore* integrado a infraestrutura costeira existente (aproximadamente 28m de largura), com cota de fundação e calado compatíveis com a faixa de profundidades rasas (zona de arrebentação/maré). O Molhe/Espigão na cidade litorânea de Matinhos (Figura 22) é uma estrutura costeira que se estende sobre o mar e apresenta condições favoráveis para a instalação do EWP.
- CETO-6, dispositivo *point absorber* submerso instalado *nearshore*. Instalado a alguns metros da costa (profundidades entre 8–15 m), posicionada de forma a maximizar exposição a trens de ondas de quadrante sul/sudeste.

TABELA 7 – COMPARAÇÃO DOS CONVERSORES

WEC	Local de instalação	Potência nominal adotada (kW)	Largura de captação (m)
Eco Wave Power	Espigão de Matinhos	100 (10 floaters × 10 kW)	28
CETO-6	Praia de Leste (faixa nearshore)	200 (cenário base)	20

Notas: (i) Potências adotadas para o estudo; (ii) análises de sensibilidade podem considerar CETO-6 com até 1.000 kW (teto).

3.6 MÉTODOS E ANÁLISE DE DADOS

Para a avaliação dos dados estimados neste projeto, foram realizadas médias espaciais/temporais, frequência de ocorrência de parâmetros ondulatórios e de vento, e estimativas energéticas.

Para as análises intra-anuais (2017) utilizou-se o índice de variabilidade mensal (MV) (Kirinus *et al.* 2018) representada pela Equação 3.15. Este parâmetro é eficaz para quantificar a variabilidade relativa em relação a sua média em uma escala de tempo mensal e não é influenciado pela variabilidade em escalas de tempos mais curtos.

$$MV = \frac{P_{M1} - P_{M4}}{P_{ano}} \quad (3.15)$$

FIGURA 22 – ESPIGÃO LOCALIZADO NA CIDADE DE MATINHOS - PR



Foto: Alessandro Vieira/CC

Onde: P_{M1} é a média do parâmetro (ou seja, altura da onda ou potência) para o mês mais alto, enquanto P_{M4} é a média para o mês mais baixo e P_{ano} é a média anual para todo o período.

Para calcular a potência absorvida por cada conversor, foi primeiro calculado o consumo mensal por unidade consumidora das regiões escolhidas com maior potencial energético (Equação 3.16). Os valores colocados na Equação 3.16 foram obtidos do IPARDES (2024), que apresenta, tanto para Pontal do Paraná quanto Matinhos, o consumo anual de energia elétrica da classe residencial (MWh/ano) e o número de unidades consumidoras residenciais (UC). A partir desses dois campos, o consumo médio mensal por UC é calculado por média simples com conversão de unidades: divide-se o consumo anual residencial pelo total de UCs (obtendo o consumo anual por UC), converte-se de MWh para kWh ($\times 1000$) e divide-se por 12 para chegar ao valor mensal em kWh/UC·mês.

$$C_{UC,mês} = \frac{C_{res}^{anual} [MWh/ano] \times 1000}{N_{UC}^{res} \times 12} \quad [kWh/UC \cdot ms] \quad (3.16)$$

Na Equação 3.16, o termo $C_{UC,mês}$ denota o consumo médio mensal por unidade consumidora residencial (kWh/UC·ms). Esse valor é obtido a partir do consumo residencial total anual C_{res}^{anual} (MWh/ano), dividido pelo número de unidades consumidoras residenciais N_{UC}^{res} e pelo número de meses do ano (12), aplicando-se ainda o fator 1000 para converter MWh em kWh. Em outras palavras, $C_{UC,mês}$ quantifica, em média,

quanto cada conta residencial consome por mês no município/região analisada. Esse parâmetro será utilizado adiante para estimar o atendimento em residências por mês de cada conversor, por meio da razão $E_{\text{mês}}/C_{\text{UC,mês}}$, em que $E_{\text{mês}}$ é a energia elétrica mensal estimada para cada cenário.

Para estimar o número de residências atendidas por mês por cada conversor, adotaram-se dois cenários: (i) otimista, com o potencial energético máximo das ondas J_{max} , e (ii) realista, com a potencial energético médio das ondas $\bar{J}$ (ambas em kW m^{-1}). Em cada cenário, calcula-se a potência incidente sobre o conversor como o produto entre o potencial energético de ondas, J , e a largura efetiva de captação, L (Equação 3.17). A potência de saída adotada é limitada pela potência nominal do equipamento, por meio de $P_{\text{out}} = \min(P_{\text{inc}}, P_{\text{nom}})$ (Equação 3.18). A partir de P_{out} , obtém-se a energia diária E_{dia} (Equação 3.19) e, assumindo 30 dias, a energia mensal $E_{\text{mês}}$ (Equação 3.20). Por fim, o atendimento residencial mensal resulta da razão entre a energia mensal e o consumo médio mensal por unidade consumidora, $C_{\text{UC,mês}}$ (Equações 3.16 e 3.21).

$$P_{\text{inc}} = J \cdot L \quad [\text{kW}] \quad (3.17)$$

$$P_{\text{out}} = \min(P_{\text{inc}}, P_{\text{nom}}) \quad [\text{kW}] \quad (3.18)$$

$$E_{\text{dia}} = 24 P_{\text{out}} \quad [\text{kWh}/\text{dia}] \quad (3.19)$$

$$E_{\text{mês}} = 720 P_{\text{out}} \quad [\text{kWh}/\text{ms}] \quad (3.20)$$

$$\text{Res}_{\text{mês}} = \frac{E_{\text{mês}}}{C_{\text{UC,mês}}} \quad [\text{UC}/\text{ms}] \quad (3.21)$$

Por fim, realizou-se uma análise econômico-ambiental por meio do custo nivelado de energia (LCOE), de forma adaptada e adequada à disponibilidade de dados deste estudo. Adotaram-se valores hipotéticos (realistas) para CAPEX¹ (R\$/kW) e OPEX² anual (como fração do CAPEX), bem como taxa de desconto real r e vida útil $n = 20$ anos. Os valores foram assumidos como hipotéticos devido, entre outros fatores,

¹ **CAPEX** (*capital expenditures*): investimento inicial do projeto. Inclui aquisição de equipamentos, obras civis/fundações/ancoragem, instalação/comissionamento, conexão elétrica, engenharia e licenças. Não inclui custos recorrentes de operação e manutenção.

² **OPEX** (*operational expenditures*): despesas operacionais *anuais e recorrentes*, como O&M preventiva/corretiva, seguros, taxas/regulatórios, monitoramento, reposições/peças, mão de obra e eventuais arrendamentos.

à ausência de orçamentos locais detalhados, à forte dependência do sítio (obras civis, conexão à rede, logística), à maturidade tecnológica dos conversores e às incertezas regulatórias e de operação.

O CAPEX total foi estimado pela forma paramétrica custo específico de investimento por kW instalado (c_{kW}) (R\$/kW) (Equação 3.22), já para o OPEX anual, como um percentual (α) do CAPEX, (Equação 3.23).

$$\text{CAPEX} = c_{kW} \cdot P_{\text{inst}} \quad (\text{R}\$) \quad (3.22)$$

$$\text{OPEX}_{\text{anual}} = \alpha \cdot \text{CAPEX} \quad (\text{R}\$/\text{ano}) \quad (3.23)$$

O LCOE foi obtido na forma anualizada pelo fator de recuperação de capital (CRF³), conforme as Equações 3.24 e 3.25, usando a energia anual estimada a partir dos cenários realista e otimista:

$$\text{CRF} = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (3.24)$$

$$\text{LCOE} = \frac{\text{CAPEX} \cdot \text{CRF} + \text{OPEX}_{\text{anual}}}{E_{\text{anual}}} \quad (\text{R}\$/\text{kWh}) \quad (3.25)$$

A energia anual E_{anual} foi derivada das estimativas de potência/energia dos conversores para cada cenário, por soma dos valores mensais ou, quando conveniente, pelas aproximações da Equação 3.26:

$$E_{\text{anual}} \approx 12 E_{\text{ms}} \quad \text{ou} \quad E_{\text{anual}} \approx 8760 P_{\text{out}} \quad (3.26)$$

Com os métodos e dados descritos na Seção 3, apresento agora os resultados. Todas as análises se referem a jan–dez/2014; portanto, tratam-se de um dado anual, e não de uma climatologia de longo prazo.

³ **CRF** (*capital recovery factor*): fator que converte um investimento único em um fluxo anual equivalente ao longo de n anos, dada a taxa de desconto r .

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todas as análises desta seção referem-se ao período janeiro a dezembro de 2014. Por se tratar de uma série anual única, os valores obtidos não devem ser interpretados como dados de longo prazo, mas como um retrato do ano estudado.

4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO DE ONDAS

A validação do modelo de ondas TOMAWAC consistiu em rodar o modelo, com diversos setups e configurações, até atingir elevada precisão frente ao banco de dados do sensor do SiMCosta com localização apresentada na Figura 21.

Dessa forma, a Figura 23 ilustra os dados comparados entre o modelo e os dados observados da altura significativa da onda, período de pico e direção de pico. Os resultados mostram que os dados do banco de dados global do ERA5 que foram utilizados como condições iniciais e de contorno no modelo TOMAWAC, além do setup adotado, apresentam elevada reprodutibilidade das condições observadas pelo sensor do SiMCosta. Frente a variável de Altura significativa de pico (H_s), observa-se diferenças sensíveis em momentos de valores extremos (segunda quinzena de fevereiro), e em determinados momentos de oscilações rápidas na intensidade de H_s , como pode ser observado no mês de julho.

FIGURA 23 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS DADOS DE H_s , T_p E D_p DO ERA5 E DA ESTAÇÃO PR-1.



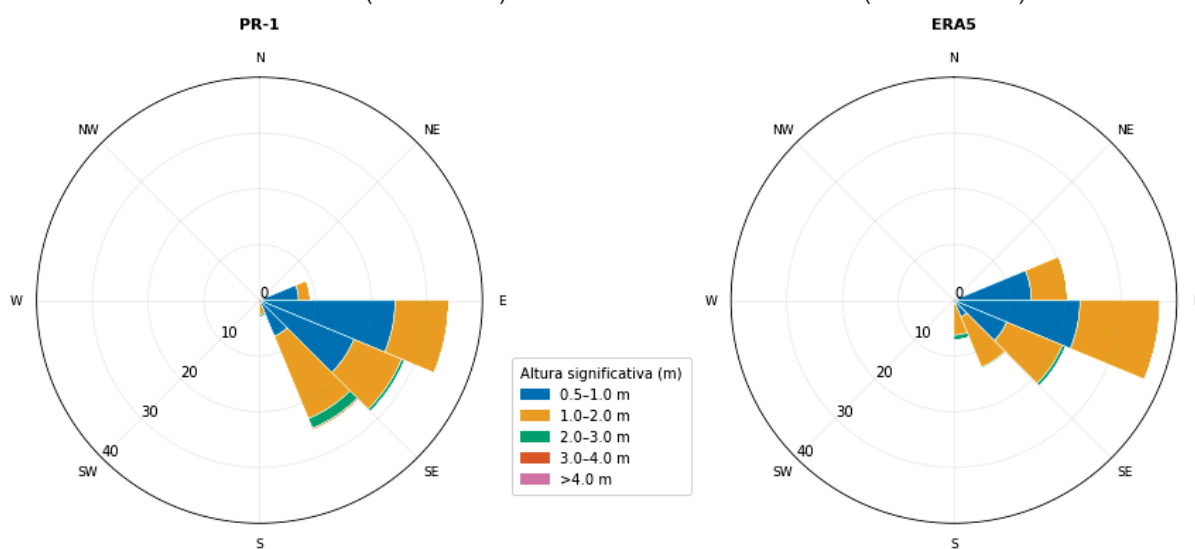
Entretanto, ao observar o período de pico, percebe-se diferenças maiores entre modelo e o dado observado, ao passo que o modelo TOMAWAC mantém uma

tendência de valores inferiores de período de pico (T_p) inferior ao dado do SiMCosta. A subestimação do T_p permanece por quase todo o ano simulado, entretanto, o padrão e as tendências de aumento/redução do período de pico se mantêm equiparado ao dado observado. O mesmo pode ser dito sobre a direção de pico (D_p), indicando assim, a boa capacidade no modelo TOMAWAC de representar as características das ondas no litoral paranaense.

As Figuras 24 e 25 mostram que tanto para H_s quanto para T_p , o clima é fortemente direcional, com a maior parte das ocorrências chegando do quadrante Leste, principalmente E–SE (E, ESE e SE). Indicando que a energia da onda no ponto não é distribuída igualmente em todas as direções. Para H_s , em PR-1, predominam classes intermediárias, principalmente na faixa entre 0,5m e 2 m, e os eventos mais energéticos de aproximadamente de 2m a 4m que aparecem mais concentrados no setor E–ESE/SE. Já para o modelo, acaba reproduzindo bem o setor direcional dominante, mas a rosa fica mais concentrada em E.

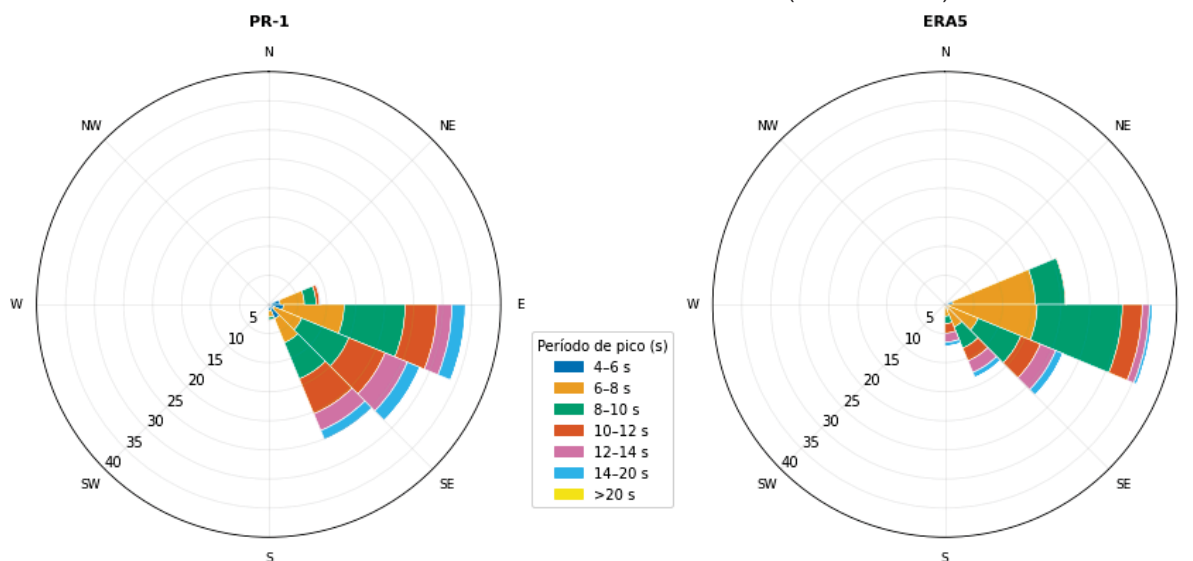
Para o T_p (Figura 25) os dados do SiMCosta em PR-1, mostra que os períodos se distribuem com maior frequência em faixas intermediárias (tipicamente 6–12 s), mas com presença mais longas (até aproximadamente 14–20 s) principalmente no setor E–SE. Os dados obtidos através do modelo mantém novamente o mesmo setor principal, porém com uma distribuição mais compacta. O que colabora com os dados obtidos na Figura 23, uma aderência linear e monotônica semelhantes para T_p , sugerindo que o modelo captura de forma consistente a tendência e a variabilidade direcional do período, enquanto as discrepâncias em H_s se concentram principalmente na representação das classes mais altas e na dispersão direcional.

FIGURA 24 – ROSA DE ALTURA DAS ONDAS DOS DADOS DA ESTAÇÃO PR-1 (SiMCosta) E DOS DADOS DO ERA5 (TOMAWAC).



Os histogramas (Figuras 26, 27 e 28) indicam que as séries da PR-1 (SiM-

FIGURA 25 – ROSA DE PERÍODO DE ONDAS DOS DADOS DA ESTAÇÃO PR-1 (SiMCosta) E DOS DADOS DO ERA5 (TOMAWAC).



Costa) e do modelo do ERA5/TOMAWAC apresentam padrões gerais coerentes, porém com diferenças sistemáticas na distribuição. Para H_s (Figura 26) ambas as bases exibem distribuição assimétrica à direita, com maior frequência de estados de mar moderados e baixa ocorrência de eventos extremos; contudo, o TOMAWAC concentra mais valores em torno do pico da distribuição e apresenta menor participação de alturas mais baixas, sugerindo uma tendência de superestimação do ou uma representação de condições mais calmas quando comparado ao observado.

Para o T_p (Figura 27), o modelo tende a concentrar os períodos em uma faixa mais estreita (tipicamente entre 8 a 10 s), enquanto a PR-1 mostra maior dispersão e presença mais expressiva de períodos longos (aproximadamente 10–14 s e superiores), o que pode estar associado a maior contribuição de swell e eventos mais persistentes no dado observado. Essa diferença reforça a interpretação de que o modelo reproduz bem a tendência central, mas suaviza a variabilidade e reduz a frequência de valores elevados de T_p .

Por fim, o histograma de direção de pico D_p (Figura 28) indica que o clima de ondas é predominantemente do quadrante Leste, com maior ocorrência entre aproximadamente 80° e 160° , de qual a direção a onda está vindo, em concordância com as rosas (Figuras 24 e 25). Entretanto, o ERA5/TOMAWAC apresenta distribuição direcional mais concentrada em direções próximas de E, enquanto a PR-1 indica maior espalhamento para ESE–SE, sugerindo que o modelo captura adequadamente o setor dominante, mas com menor dispersão direcional e leve viés para direções mais a Leste.

Os boxplots da Figura 29 sintetizam as diferenças entre a PR-1 (SiMCosta) e o ERA5/TOMAWAC em termos de tendência central e variabilidade. Para H_s (Figura 29a), observa-se que o TOMAWAC apresenta a mediana deslocada para valores mais

FIGURA 26 – HISTOGRAMA DA ALTURA SIGNIFICATIVA DA ONDA DA ESTAÇÃO PR-1 (SiMCosta) E DOS DADOS DO ERA5 (TOMAWAC)

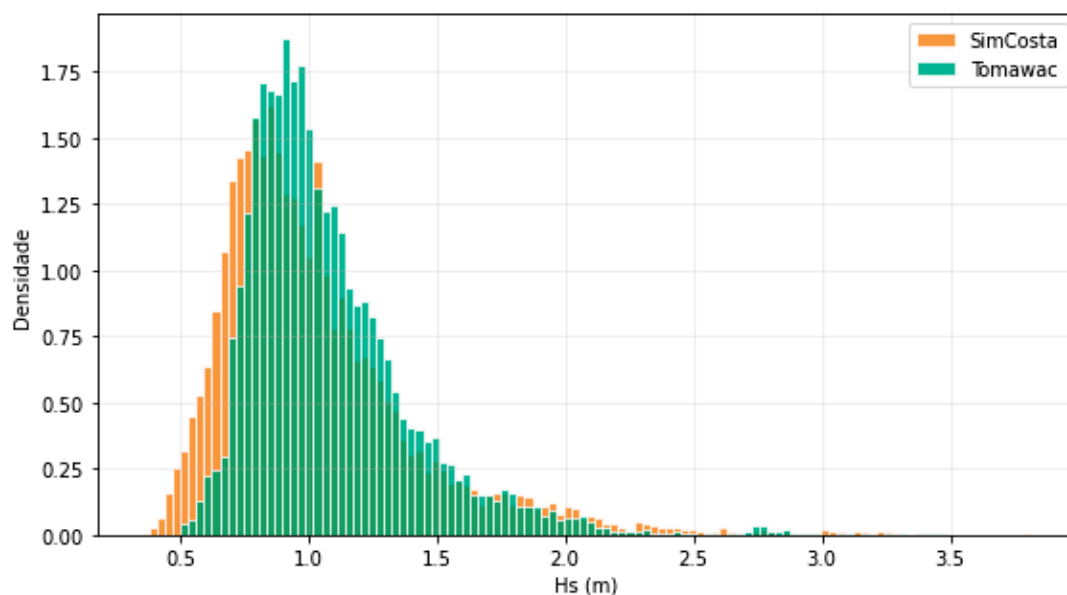


FIGURA 27 – HISTOGRAMA DE PERÍODO DA ONDA DA ESTAÇÃO PR-1 (SiMCosta) E DOS DADOS DO ERA5(TOMAWAC).

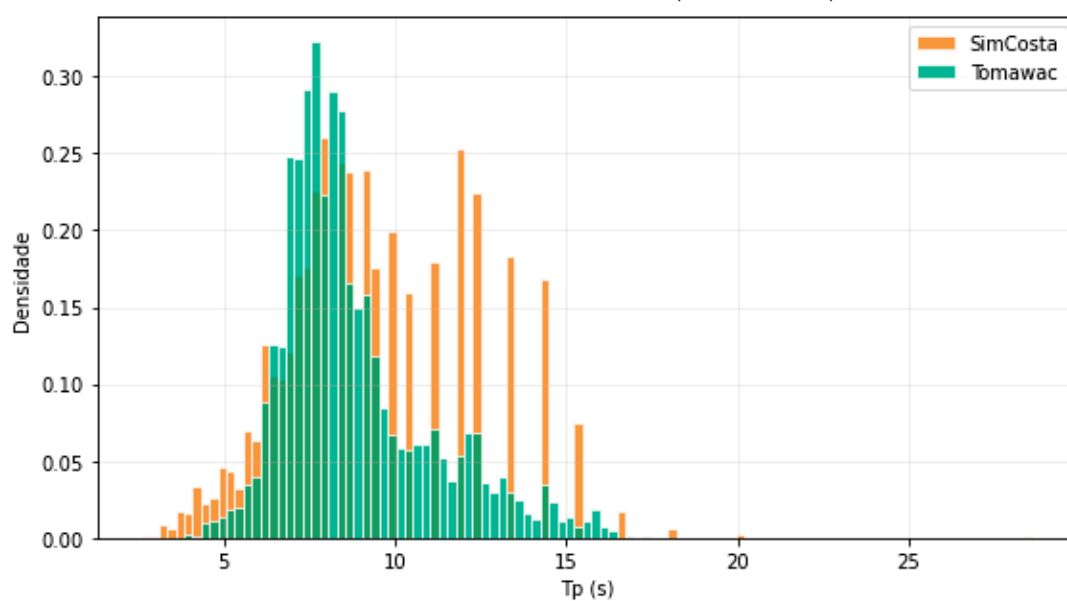
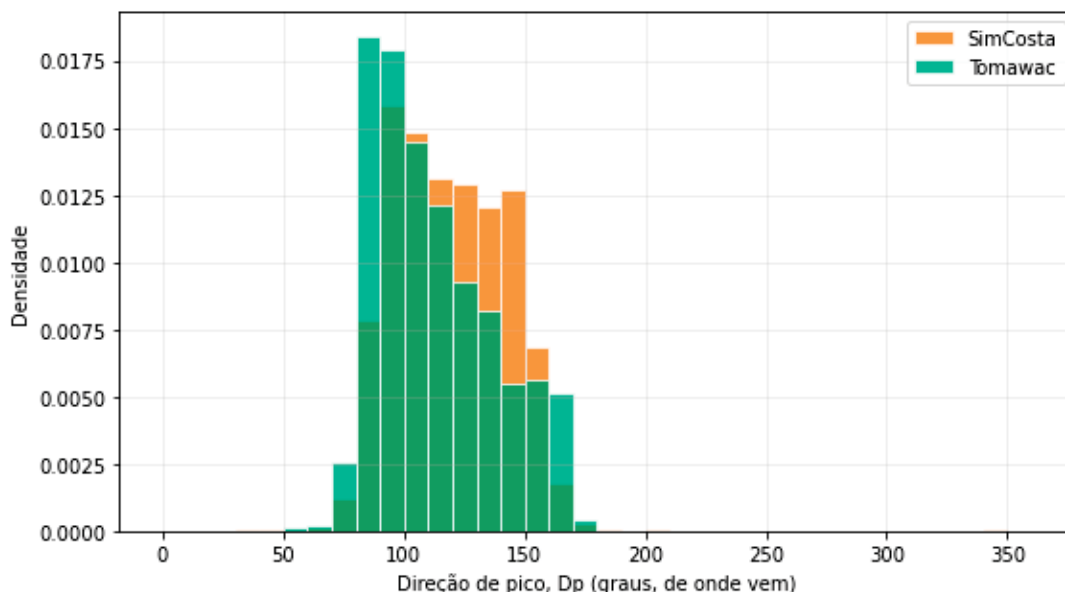


FIGURA 28 – HISTOGRAMA DE DIREÇÃO DE PICO DA ESTAÇÃO PR-1 (SiMCosta) E DOS DADOS DO ERA5(TOMAWAC)



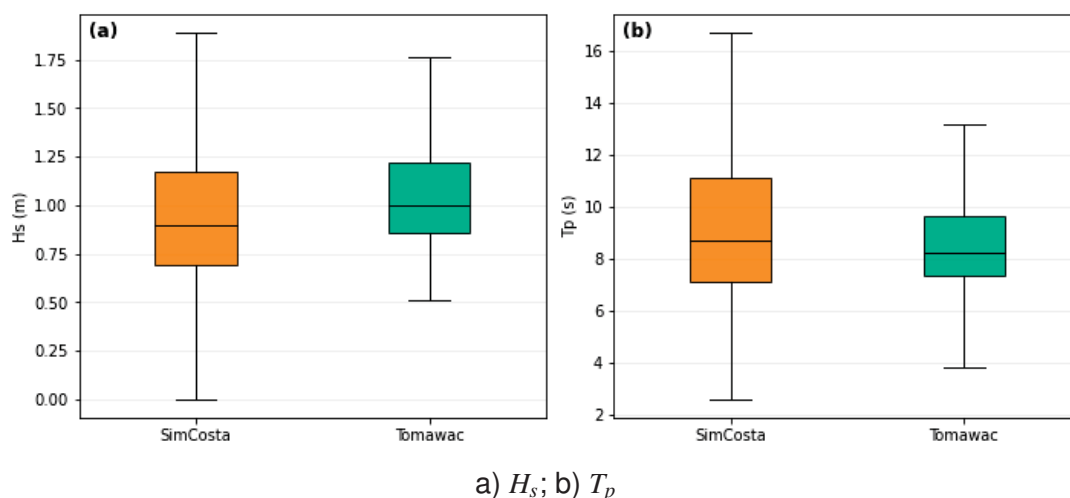
elevados em relação ao observado, com o intervalo interquartil igualmente posicionado em alturas maiores, indicando uma tendência de superestimação do estado médio de mar. Além disso, a PR-1 exibe maior extensão para valores baixos (whisker (bigodes) inferior mais próximo de condições muito calmas), sugerindo que o dado observado registra com maior frequência situações de baixa energia que são menos representadas pelo modelo.

Para T_p (Figura 29b), a PR-1 apresenta maior dispersão (caixa e whiskers mais amplos) e maior alcance para períodos elevados, enquanto o TOMAWAC concentra os valores em uma faixa mais estreita, com mediana inferior, evidenciando suavização da variabilidade e menor ocorrência de T_p longos no conjunto modelado. Em conjunto, os boxplots reforçam que o ERA5/TOMAWAC reproduz o comportamento geral, porém com viés na representação de H_s e com sub-representação de eventos associados a maior período, coerente com os padrões observados nos histogramas e nas rosas direcionais.

Frente a isso, parâmetros de comparação estatística foram utilizados e estão presentes na Tabela 8, que apresenta a comparação de H_s e T_p do modelo e do SiMCosta. Como D_p é uma variável circular (0° e 360° representam a mesma direção), a validação foi conduzida com métricas que evitam artefatos de descontinuidade. Inicialmente, o erro angular foi calculado como a diferença mínima entre as direções modelada e observada, garantindo que o erro pertença ao intervalo $[180^\circ, 180^\circ]$ (Tabela 9).

Dentro dos parâmetros estatísticos calculados, o RMSE foi utilizado porque atribui maior peso a grandes erros do que erros menos no cálculo dos resultados finais.

FIGURA 29 – BOXPLOT DA ESTAÇÃO PR-1 (SimCosta) E DOS DADOS DO ERA5 (TOMAWAC)



a) H_s ; b) T_p

TABELA 8 – RESULTADOS DOS PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA OS DADOS DE H_s E T_p DO ERA5 E ESTAÇÃO PR-1.

Parâmetro estatístico	H_s	T_p
Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)	0,704 m	2,072 s
Erro Médio Absoluto (MAE)	0,636 m	1,269 s
Relação de Variância (RVAR)	1,610	0,753
Erro Relativo (ER)	60%	3,2%
Viés	-0,612 m	-0,290 s
Viés Relativo	-0,593	-0,032
Índice de Espalhamento (SI)	0,681	0,227
Inclinação quadrática média (SS)	0,592	0,961
Coeficiente de correlação de Pearson (R)	0,724	0,628
Coeficiente de correlação de Spearman (rs)	0,429	0,612

O RMSE é amplamente empregado nesse tipo de análise (Edwards *et al.* 2014a), pois, como os modelos nunca são perfeitamente adequados, o RMSE desconsidera pequenas diferenças em uma série temporal que não são consideradas erros significativos. O RMSE de H_s encontrado é de 0,704m, um valor ligeiramente inferior aos obtidos em outros estudos de validação (Lalbeharry, 2002; Edwards *et al.* 2014a). Tabela 8 indica que, para H_s , os erros médios são moderados (RMSE aproximadamente de 0,70 m e MAE 0,63 m), com viés negativo, sinalizando subestimação pelo modelo.

O RVAR perto de 1 sugere que a variabilidade simulada é semelhante à observada, ainda que ligeiramente menos dispersa. Para T_p (variável não linear), os erros são maiores (RMSE aproximadamente 2s e o MAE aproximadamente 1,26s, mas

com RVAR próximo de 1. As correlações de Pearson e Spearman são próximas para T_p (indicando aderência linear e monotônica semelhantes) e, em H_s , o valor de Pearson supera o de Spearman, o que é consistente com uma relação linear razoável e alguma influência de não linearidades/outliers na monotonicidade.

Os valores do Erro Relativo, apresentou um valor baixo para T_p , tendo uma melhor concordância entre o modelo e a observação. Os valores de SS menores que 1 na Tabela 8 indicam que o modelo tende a subestimar as medições de H_s e T_p .

Entre as métricas adotadas, o RMSE foi utilizado por penalizar mais fortemente os grandes desvios, enquanto o MAE fornece a magnitude média do erro de forma menos sensível a outliers. O viés indica a tendência média (negativo equivale a subestimação), e o RVAR compara a variabilidade simulada com a observada (aproximadamente 1 é desejável). Os coeficientes de correlação de Pearson (linear) e Spearman (monotônica) foram usados de forma complementar: valores semelhantes apontam aderência monotônica e linear próximas; $\text{Pearson} > \text{Spearman}$ sugere relação essencialmente linear com alguma não linearidade ou outliers.

Os resultados obtidos para D_p (Tabela 9) indicam desempenho consistente do modelo na representação da direção predominante. O RMSE de $17,2^\circ$ e o MAE de $12,2^\circ$ apontam erros angulares médios moderados, enquanto o viés de $-6,2^\circ$ sugere uma tendência sistemática pequena, com o modelo estimando direções ligeiramente menores do que as observadas. Isso é uma rotação média no sentido de direções mais próximas de E/ENE. A $\text{RVAR} = 1,152$ indica que a variabilidade angular do conjunto simulado é cerca de 15% maior que a observada. Com a correlação de Spearman de aproximadamente de 0,803 reforça que a relação é também monotônica/consistente ao longo do tempo. Por fim, os índices relativos ($\text{ER} = 6,8\%$ e $\text{SI} = 9,5\%$, normalizados por 180°) corroboram que, em termos proporcionais ao erro máximo possível, as discrepâncias são baixas.

De forma integrada, as métricas estatísticas indicam que o TOMAWAC forçado por ERA5 apresenta desempenho satisfatório para representar o regime médio de ondas na região da PR-1, com boa capacidade de reproduzir padrões centrais e variabilidade associados a H_s , T_p e D_p , ainda que com limitações esperadas para condições menos frequentes e eventos extremos.

Apesar da escassez de séries observacionais contínuas em áreas costeiras no litoral do Paraná, não foram identificados estudos publicados de validação de modelos de ondas especificamente para essa região. Ainda assim, trabalhos de validação do TOMAWAC com observações em ambiente costeiro reportam boa concordância entre modelagem espectral e medições, com $\text{RMSE}(H_s)$ tipicamente entre 0,5 e 0,6m e correlações entre aproximadamente 0,86 e 0,91, bem como desempenho consistente para $\text{RMSE}(T_p)$ (Oleinik *et al.* 2019). Esses resultados fornecem uma faixa de

TABELA 9 – RESULTADOS DOS PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA OS DADOS DE D_p DO ERA5 E ESTAÇÃO PR-1.

Parâmetro estatístico	D_p
RMSE	17,2°
MAE (°)	12,2°
RVAR	1,152
ER	6,8%
Viés	-6,2°
Viés Relativo	-3,4
SI	9,5%
rs	0,803

referência coerente com o desempenho obtido no presente estudo, reconhecendo-se que diferenças locais, como batimetria, transformação costeira, direção dominante e qualidade/representatividade das condições de contorno, podem alterar os erros de forma espacialmente dependente.

Assim, os resultados desta validação devem ser interpretados como representativos para a estimativa do recurso médio e para a comparação de cenários de conversores de energia de ondas na região, recomendando-se cautela na extrapolação para eventos extremos, nos quais discrepâncias de magnitude e direção podem ser amplificadas. Em síntese, as análises apresentadas sustentam a confiabilidade do TOMAWAC em reproduzir o ambiente de ondas observado na PR-1 (Fig. 23) para os objetivos desta pesquisa, ao mesmo tempo em que reforçam a importância de ampliar medições *in situ* e campanhas dedicadas para reduzir incertezas e aprimorar futuras calibrações/validações.

Após a etapa de validação, as condições de contorno do modelo foram implementadas com base em pontos do ERA5 distribuídos ao longo de toda a extensão do contorno. Os dados foram atribuídos aos nós da malha mais próximos, conforme ilustrado na Fig. 21; quando a atribuição direta não foi possível na borda da malha, os valores correspondentes foram obtidos por interpolação.

4.2 RESULTADOS DO MODELO ONDULATÓRIO

O módulo ondulatório TOMAWAC foi utilizado para avaliar a variabilidade das ondas na área de estudo. A disponibilidade de ondas para utilização como recurso energético foi avaliada com base em simulações numérica num período de 1 ano (2014) com resolução temporal diária para todo o litoral paranaense, utilizando um modelo

numérico de elementos finitos. As Figuras 30, e 31 a seguir mostram a média da altura significativa da onda (H_s), período de pico (T_p), e energia das ondas na área de estudo.

FIGURA 30 – MÉDIA DO H_s (M) e T_p (S) NA ÁREA DE ESTUDO.

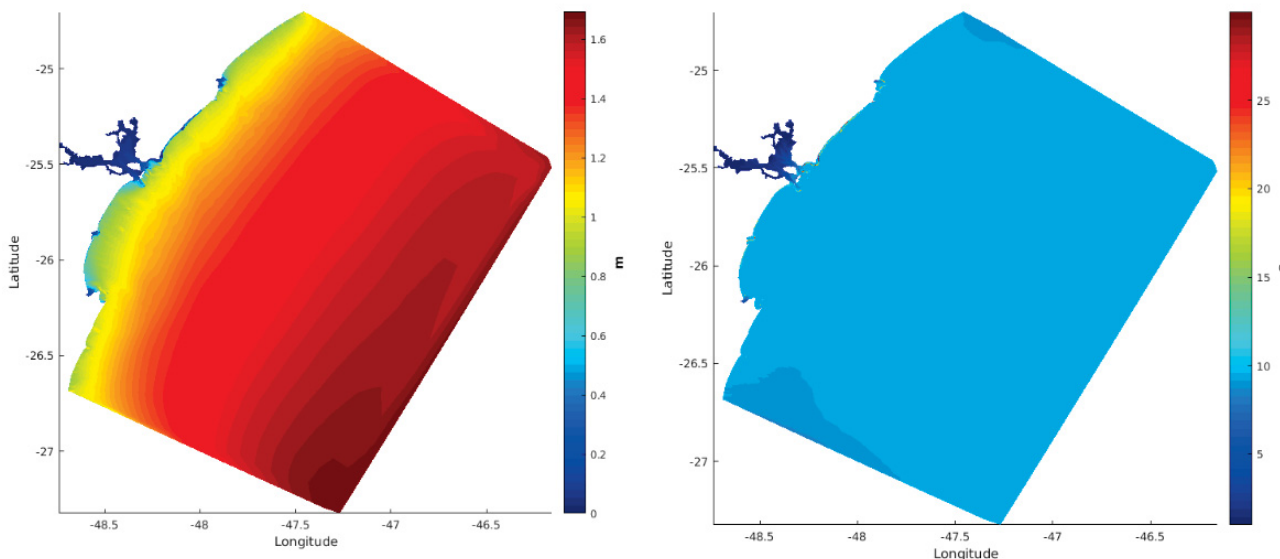
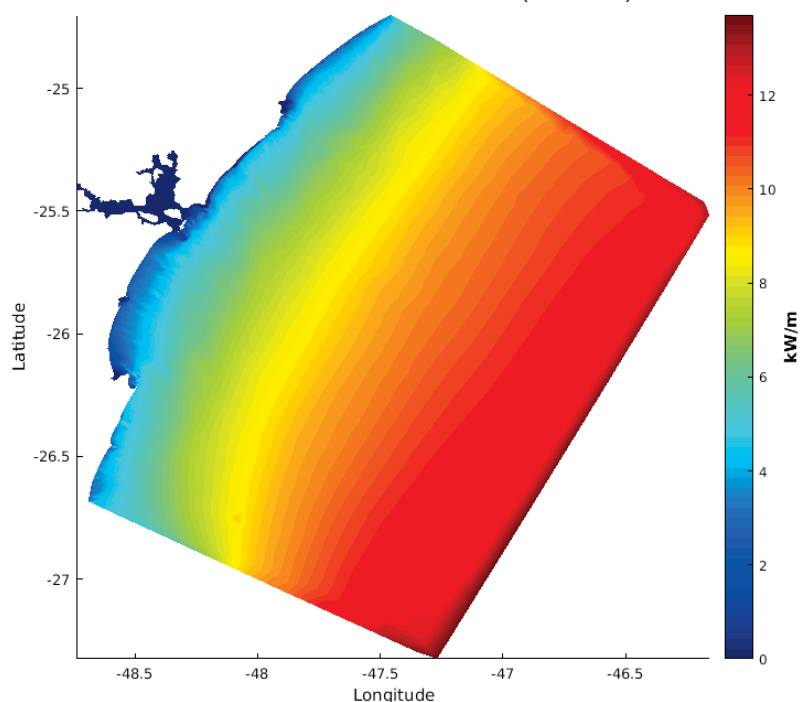


FIGURA 31 – MÉDIA DA ENERGIA DAS ONDAS (kW m^{-1}) NA ÁREA DE ESTUDO.



Sendo assim, após a validação, os resultados do modelo envolvendo as ondas indicaram variações significativas na potência das ondas entre diferentes pontos analisados, sendo os três principais locais: Matinhos (-48.502, -25.816), Praia de Leste (-48.420, -25.682) e Ilha do Mel (-48.273, -25.564) (Figura 32). A Figura 31 mostra um padrão consistente de aumento da energia de ondas no sentido costa mar aberto.

À medida que a linha de costa se afasta, o (H_s) cresce gradualmente junto com o potencial energético das ondas.

No litoral do Paraná, os máximos sazonais de H_s concentram-se entre o outono e o inverno, quando a passagem de frentes frias e a atuação de ciclones extratropicais e subtropicais intensificam ventos de quadrante sul e geram swell de S–SE com períodos mais longos. Na plataforma interna, a propagação predominante é SSE/SE, e os eventos de maior energia registrados estão ligados a esses sistemas de baixa pressão no Atlântico Sudoeste (Pianca, 2010). Enquanto a potência máxima da onda na Ilha do Mel permaneceu estável durante todo o período analisado, os maiores picos de Matinhos e principalmente Praia de Leste ocorreu na transição entre o clima quente e o frio.

Quanto ao T_p , a Figura 30 sugere um gradiente mais suave, com variações bem menores do que as de H_s , indicando um regime de ondas com períodos relativamente uniformes na escala dentro da área de estudo, com isso é notável que a refração, *shoaling* e dissipação costeira atuam mais fortemente sobre a altura do que sobre o período médio (Stewart, 2008).

Séries temporais da potência máxima nos três pontos supracitados foram desenvolvidas (Figura 33). Durante o período de alta intensidade observado entre 15 e 18 de fevereiro, Praia de Leste registrou um pico máximo de 40,846 kW/m, significativamente mais alto do que Matinhos (31,482 kW/m) e Ilha do Mel (10,980 kW/m). O episódio de 15–18/fev é útil para discutir resiliência a extremos: a diferença de amplitude entre os pontos evidencia como orientação da costa, sombreamento e batimetria modulam a transformação das ondas na plataforma interna.

A curvatura da costa e a presença da Ilha do Mel tendem a reduzir a exposição direta a ondas de quadrante sul–sudeste nos setores de Matinhos e Ilha do Mel, criando uma “sombra” relativa de energia. Já Praia de Leste fica mais “de frente” para as direções dominantes do swell (S–SE) (Pianca, 2010; Oliveira, 2017), recebendo maiores valores médios de H_s e de energia das ondas. Isso se reflete nas estatísticas pontuais: Praia de Leste apresenta a maior média anual de potência (3,57 kW/m) e também o maior desvio-padrão (3,42 kW/m), indicando um regime mais energético e mais variável ao longo do ano. Matinhos ocupa um degrau intermediário (média 3,16 kW/m; STD 2,82 kW/m), com boa disponibilidade e variabilidade moderada. Já a Ilha do Mel exibe a menor média (2,88 kW/m) e o menor STD (1,89 kW/m), caracterizando um sítio mais “manso” e estável.

A Tabela 10 indica os valores máximos (Máx), média ($\bar{X}$) e desvio padrão (STD) de cada ponto. Falnes (2007) lista outros processos de ondas costeiras que têm alguma influência nas variações de energia, como reflexão de ondas, difração, atrito do fundo e efeitos de quebra induzidos pela profundidade.

Além da média mais alta, Praia de Leste apresenta também desvio-padrão maior, sinalizando um recurso mais variável ao longo do ano. Do ponto de vista de aproveitamento energético, isso costuma significar maior energia disponível (bom para produção), porém com exigências maiores de projeto (estruturas e ancoragens dimensionadas para picos mais altos) e gestão operacional (janelas de manutenção ajustadas à meteorologia). Em contraste, Matinhos exhibe um regime moderado e relativamente mais estável, compatível com soluções *onshore/nearshore* que se beneficiam da infraestrutura do espigão e de menores cargas de projeto. A Ilha do Mel, com média e variabilidade inferiores, tende a ser menos competitiva para geração elétrica, embora possa ser interessante para aplicações de menor escala.

FIGURA 32 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS ESCOLHIDOS DENTRO DA ÁREA DE ESTUDO. P1: MATINHOS; P2: PRAIA DE LESTE; P3: ILHA DO MEL

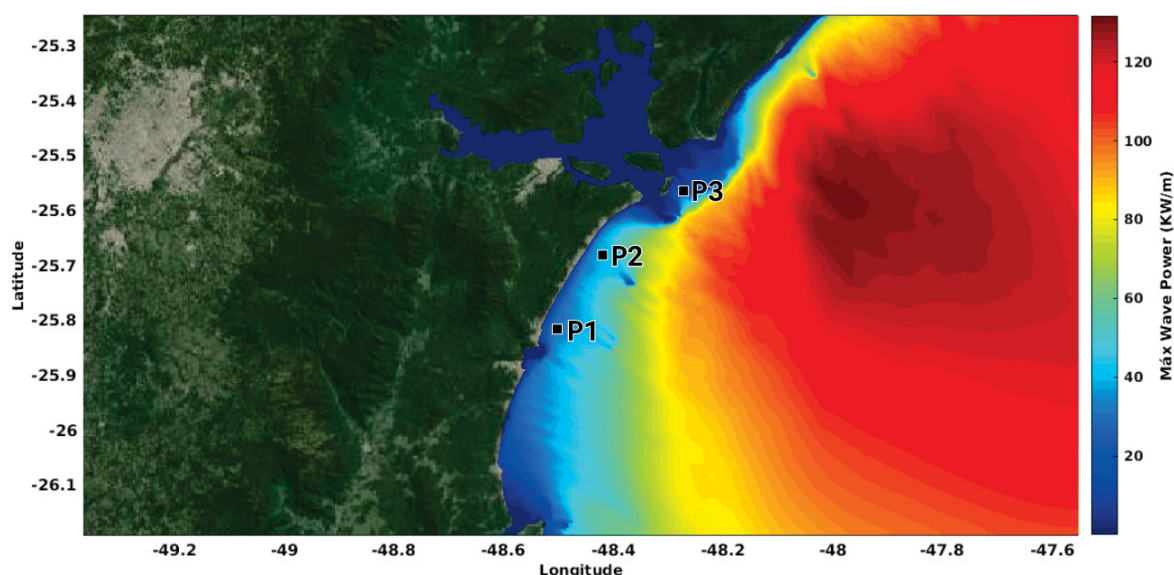


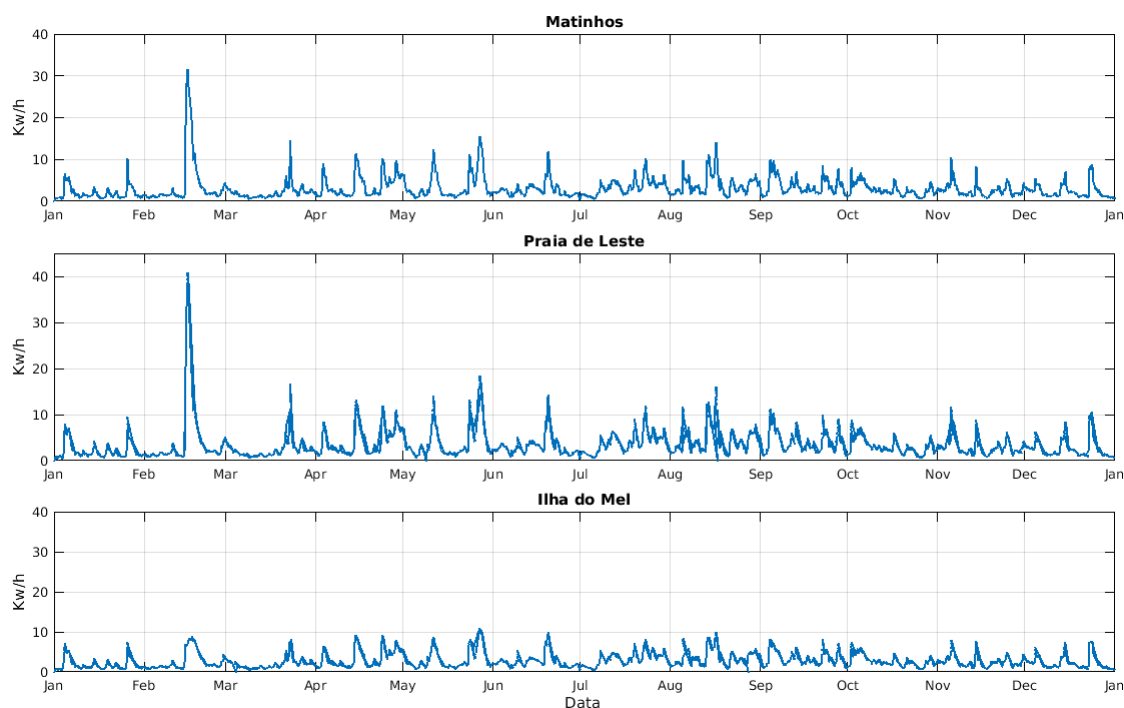
TABELA 10 – DADOS DE POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ONDAS (kW m^{-1})

Local	Máx	$\bar{X}$	STD
Matinhos	31,482	3,16	2,823
Praia de Leste	40,846	3,57	3,42
Ilha do Mel	10,98	2,88	1,893

4.3 VARIABILIDADE MENSAL

A série mensal evidencia uma sazonalidade marcada do potencial de ondas no litoral do Paraná: os maiores valores concentram-se no inverno, com pico em agosto, enquanto o mínimo ocorre no verão, em janeiro. Para quantificar essa oscilação, foi

FIGURA 33 – POTÊNCIA MÁXIMA DA ONDA NOS PONTOS SELECIONADOS.



calculado a variabilidade mensal de Praia de Leste utilizando a Equação 3.15, que estima a média do mês mais intenso em relação ao menos intenso em relação à média anual. O índice obtido ($MV = 0,81$) indica que a diferença pico–vale corresponde a 81% da média anual, ou seja, a variação sazonal é elevada.

Esse comportamento é coerente com a climatologia regional. No outono–inverno, a passagem de frentes frias e a atuação de ciclones extratropicais/subtropicais no Atlântico Sudoeste geram swell de S–SE, com períodos mais longos e maior eficiência de propagação sobre a plataforma, elevando H_s e o potencial energético (Stech; Lorenzetti, 1992; Contestabile *et al.* 2015). No verão, prevalecem condições mais brandas, com maior contribuição ondas produzida por ventos períodos mais curtos e maior dissipação costeira, reduzindo a energia disponível (Pianca, 2010). Além disso, a exposição direcional da costa modula a sazonalidade: Praia de Leste, mais alinhada a S–SE, apresenta contraste mensal mais acentuado do que trechos parcialmente sombreados pela geometria costeira (como a Ilha do Mel). Além disso, os ventos relacionados com a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), cuja localização varia para norte durante o verão e para sul durante o inverno (Cotrim *et al.* 2022).

Do ponto de vista de aproveitamento energético, a sazonalidade observada tem implicações diretas. Meses de maior energia favorecem a produção, mas exigem atenção a cargas extremas e janelas de manutenção; meses de menor energia tendem a ser mais adequados para intervenções.

4.4 TAXAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Com base no levantamento do IPARDES (2024), que relaciona consumo anual e número de Unidades Consumidoras (UC) em Pontal do Paraná (Tabela 16) e em Matinhos (Tabela 17; ver Apêndice 5.1), estimou-se o consumo médio mensal por UC a partir da Equação 3.16. Obtiveram-se aproximadamente $C_{UC,mês} = 125 \text{ kWh/UC}\cdot\text{mês}$ para Pontal do Paraná e aproximadamente $C_{UC,mês} = 134 \text{ kWh/UC}\cdot\text{mês}$ para Matinhos, ambos inferiores à média nacional (cerca de $185 \text{ kWh/UC}\cdot\text{mês}$ ANEEL 2023).

Com o consumo médio mensal por residência já definido, foi estimado o número de unidade consumidora (UC) atendidas por mês pelos dois conversores: o *Eco Wave Power* (EWP), instalado em estruturas costeiras em Matinhos, e o *CETO*, conversor do tipo *point absorber* totalmente submerso próximo à Praia de Leste no município de Pontal do Paraná. Para quantificar o atendimento mensal por conversor, adotaram-se dois cenários de recurso: (i) *otimista*, com a densidade de potência máxima J_{max} , e (ii) *realista*, com a densidade média $\bar{J}$ (ambas em kW m^{-1}). Em cada cenário, calculou-se a potência incidente P_{inc} como $J \times L$ (Equação 3.17); em seguida, limitou-se a potência de saída pela nominal do equipamento, $P_{out} = \min(P_{inc}, P_{nom})$ (Equação 3.18); a partir de P_{out} , obteve-se a energia mensal $E_{mês} = 720 P_{out}$ (Equação 3.20); por fim, o número de UCs atendidas por mês resultou de $Res_{mês} = E_{mês}/C_{UC,mês}$ (Equação 3.21). Os valores adotados para largura de captação e potência nominal de cada tecnologia estão descritos na Seção 3.5.

Os resultados sintetizados nas Tabelas 11 (EWP em Matinhos) e 12 (CETO-6 em Praia de Leste) mostram dois comportamentos relevantes. Primeiro, no EWP, o cenário realista ($\bar{J}$) entrega $P_{out} \approx 88,5 \text{ kW}$ e atende em torno de 475 UC/mês; já no cenário otimista, embora P_{inc} seja muito maior, P_{out} satura no limite nominal de 100 kW, elevando o atendimento apenas para cerca de 537 UC/mês. Isso evidencia o teto imposto pela potência instalada em situações de mar energético. Segundo, no CETO-6, o cenário realista fornece $P_{out} \approx 63,2 \text{ kW}$ (Em torno de 361 UC/mês), enquanto o cenário otimista atinge o limite nominal de 200 kW (Em torno de 1.144 UC/mês); uma análise de sensibilidade mostra que, se a unidade for de 1 MW, o mesmo recurso levaria a aproximadamente 4.671 UC/mês. Em termos comparativos, a maior densidade de potência média em Praia de Leste favorece o CETO-6 no regime realista, ao passo que, em regime de pico, o ganho marginal do EWP fica limitado pela sua menor potência nominal.

Essas estimativas devem ser interpretadas como um piso técnico-econômico simplificado: não se aplicaram fatores de disponibilidade, perdas eletromecânicas/da cadeia de conversão, indisponibilidades operacionais, nem modulação sazonal do consumo; ainda assim, elas são úteis para ordenar cenários e apoiar decisões de dimensionamento preliminar dos arranjos.

TABELA 11 – CENÁRIOS REALISTA E OTIMISTA DO EWP EM MATINHOS

Cenário	P_{inc} (kW)	P_{out} (kW)	Dia (kWh)	Mês (kWh)	UC/mês
Realista ($J_{médio}: 3,16 \times 28$)	88,48	88,48	2.123,52	63.705,6	475
Otimista ($J_{máx}: 31,482 \times 28$)	881,50	100	2.400,00	72.000,0	537

Notas: Largura = 28 m; Potência nominal adotada = 100 kW; Consumo médio residencial (Matinhos) = 134,18 kWh/UC·mês.

TABELA 12 – CENÁRIOS REALISTA E OTIMISTA DO EWP EM PRAIA DE LESTE

Cenário	P_{inc} (kW)	P_{out} (kW)	Dia (kWh)	Mês (kWh)	UC/mês
Realista ($J_{médio}: 3,16 \times 20$)	63,20	63,20	1.516,80	45.504,0	361
Otimista ($J_{máx}: 40,846 \times 20$)	816,92	200	4.800,00	144.000,0	1.144

Notas: Largura = 20 m; Potência nominal adotada (base) = 200 kW; Consumo médio residencial (Pontal do Paraná) = 125,91 kWh/UC·mês.

As estimativas apresentadas são “pisos” técnico: não consideram disponibilidade (tempo fora de operação), perdas eletromecânicas, paradas de manutenção, bioincrustação, janelas meteorológicas, nem a sazonalidade do consumo. Também usam um ano de recurso, o que traz incerteza interanual. Esses fatores tendem a reduzir a energia útil e, portanto, o número de UCs atendidas. A variabilidade mensal do recurso implica que o atendimento tende a ser maior no inverno e menor no verão.

Existem vários outros elementos que devem ser considerados, para a integração da rede, a conexão deve considerar: (i) nível de tensão adequado ao porte do arranjo, (ii) proteções e seccionamento, (iii) qualidade de energia e (iv) capacidade de acolhimento da rede no alimentador mais próximo.

As áreas de implantação (Matinhos e Praia de Leste) situam-se na extremidade de alimentadores da rede de distribuição, onde há maior sensibilidade a quedas de tensão e perdas em períodos de alta carga. Observa-se sazonalidade de consumo acentuada no verão (turismo). Por outro lado, a geração por ondas apresenta maior persistência no outono–inverno e menor no verão, resultando em um descompasso sazonal entre oferta e demanda. Assim, os WECs devem ser entendidos como alívio estrutural do alimentador e suprimento de base fora da alta temporada, mas não como solução única para os picos estivais.

No EWP, a eletrônica de potência pode ficar em terra, próxima ao espigão, o que simplifica painéis e inspeções e reduz comprimentos de cabo até o ponto de conexão. No CETO, há um trecho submarino até a costa e, o que exige estudo térmico e de curto-circuito dos cabos, análise de correntes induzidas e proteção contra falhas à terra no mar. Recomenda-se estudo elétrico completo (fluxo de potência, curto-circuito, harmônicas) e consulta prévia à concessionária local para definir requisitos de proteção, medição e obras de interface (posteação, condutores, eventual transformador e religadores).

O perfil de Operação e Manutenção difere entre as tecnologias. O EWP, por estar fixo a estruturas costeiras, tende a ter acesso mais simples (via píer/espigão), permitindo inspeções visuais frequentes, trocas de componentes e mobilização leve. Já o CETO, submerso, exige embarcações e janelas de mar calmo para içamento/soltura de unidades, o que alonga tempos de parada e eleva custo logístico. Para ambos, corrosão marinha e bioincrustação são pontos de pressão sobre disponibilidade e OPEX.

O EWP, por aproveitar infraestrutura existente (espigão/quebra-mar), tende a ter pegada física menor no fundo e, em muitos casos, tramitação ambiental mais simples, ainda que demande avaliação de interferências paisagísticas, ruído, segurança de acesso público. O CETO requer ancoragens e cabos no leito, o que implica estudos de interferência com pesca artesanal, rotas de embarcações, habitats bentônicos e risco de engalhe/arrasto. Para ambos, pedem-se levantamentos de batimetria, sensibilidade ambiental local, uso do espaço marítimo e planos de instalação/retirada. Com isso, recomenda-se iniciar pré-consulta com órgãos e usuários locais (comunidades pesqueiras, capitânias), apresentar planos de monitoramento (ruído subaquático, turbidez na obra, integridade de fauna/flora, interação com pesca e banhistas), prever procedimentos de emergência (deriva de componentes, cabo exposto) e compromissos de descomissionamento.

4.5 CUSTO NIVELADO DE ENERGIA (LCOE): PROCEDIMENTOS E RESULTADOS

Por fim, estimou-se o custo nivelado de energia (LCOE) para ambos os conversores avaliados, Eco Wave Power (EWP, 100 kW, Matinhos) e CETO-6 (200 kW, Praia de Leste). O cálculo seguiu a formulação anualizada apresentada nas Equações 3.24 e 3.25, com vida útil $n = 20$ anos e taxa de desconto real r por cenário. O investimento total (CAPEX) foi modelado de forma paramétrica em função do custo específico por kW e da potência instalada (Equação 3.22), e os custos operacionais anuais ($OPEX_{\text{anual}}$) foram representados como uma fração α do CAPEX (Equação 3.23). A energia anual E_{anual} foi obtida a partir das estimativas energéticas dos cenários realista e otimista (Seção anterior), pela aproximação da Equação 3.26.

TABELA 13 – HIPÓTESES (VALORES HIPOTÉTICOS REALISTAS, EM R\$ CORRENTES, SEM INFLAÇÃO) PARA CÁLCULO DO LCOE.

Cenário	r	n (anos)	EWP c_{kW} (R\$/kW)	α_{EWP}	CETO c_{kW} (R\$/kW)	α_{CETO}
Baixo	6%	20	18.000	4%	25.000	5%
Médio	8%	20	25.000	6%	35.000	7%
Alto	12%	20	35.000	8%	50.000	10%

Notas: c_{kW} = custo específico de investimento; α = fração anual do CAPEX usada para estimar o OPEX anual ($OPEX_{\text{anual}} = \alpha \cdot \text{CAPEX}$).

Os resultados sintetizados são apresentados nas Tabelas 14 e 15. Em ambas, reporta-se r , n , o custo específico c_{kW} , a fração α , e o LCOE calculado para os cenários Realista ($\bar{J}$) e Otimista ($J_{\max}$).

TABELA 14 – LCOE - EWP (100 kW, MATINHOS) PARA CENÁRIOS BAIXO/MÉDIO/ALTO.

Cenário	r	n	c_{kW} (R\$/kW)	α	LCOE (Realista)	LCOE (Otimista)
Baixo	6%	20	18.000	4%	0,30 R\$/kWh	0,27 R\$/kWh
Médio	8%	20	25.000	6%	0,53 R\$/kWh	0,47 R\$/kWh
Alto	12%	20	35.000	8%	0,98 R\$/kWh	0,87 R\$/kWh

Notas: $P_{\text{inst}} = 100$ kW. $\text{CAPEX} = c_{kW} \cdot P_{\text{inst}}$. $\text{OPEX}_{\text{anual}} = \alpha \cdot \text{CAPEX}$.

TABELA 15 – LCOE - CETO (200 kW, PRAIA DE LESTE) PARA CENÁRIOS BAIXO/MÉDIO/ALTO.

Cenário	r	n	c_{kW} (R\$/kW)	α	LCOE (Realista)	LCOE (Otimista)
Baixo	6%	20	25.000	5%	1,26 R\$/kWh	0,40 R\$/kWh
Médio	8%	20	35.000	7%	2,20 R\$/kWh	0,70 R\$/kWh
Alto	12%	20	50.000	10%	4,28 R\$/kWh	1,35 R\$/kWh

Notas: $P_{\text{inst}} = 200$ kW. $\text{CAPEX} = c_{kW} \cdot P_{\text{inst}}$. $\text{OPEX}_{\text{anual}} = \alpha \cdot \text{CAPEX}$.

Em síntese, o EWP apresenta LCOE entre 0,30 e 0,98 R\$/kWh no cenário realista (e entre 0,27 e 0,87 R\$/kWh no otimista), refletindo a saturação frequente em P_{nom} e um CAPEX específico menor. O CETO-6 mostra maior sensibilidade ao cenário energético: no realista, o LCOE varia de 1,26 a 4,28 R\$/kWh, enquanto no otimista cai para 0,40–1,35 R\$/kWh, acompanhando o aumento de E_{anual} . Esses valores constituem *piso técnico* (não incorporam indisponibilidade, perdas e custos de conexão específicos) e são úteis para ordenar alternativas e orientar o dimensionamento preliminar.

Os valores de LCOE estimados para o EWP (100 kW) e para o CETO-6 (200 kW) representam o custo médio por kWh ao longo de toda a vida útil, considerando a recuperação do investimento inicial via CRF, os custos operacionais anuais e a energia efetivamente gerada em cada cenário. Em termos práticos, o LCOE é um indicador de competitividade: quanto menor, mais próximo o projeto está de competir com alternativas locais de suprimento ou com tarifas de referência (IRENA, 2020; Lazard, 2021; IEA, 2023; OES, 2015).

Adotaram-se três cenários (Baixo/Médio/Alto) porque os custos de tecnologias de ondas e o custo de capital para projetos costeiros ainda apresentam incertezas relevantes. Cada cenário combina: (i) taxa de desconto real r , que reflete risco e condições de financiamento; (ii) custo específico c_{kW} (CAPEX por kW instalado), que sintetiza obras civis, mecânicas e elétricas; e (iii) fração anual α do CAPEX para estimar o OPEX ($\text{OPEX}_{\text{anual}} = \alpha \cdot \text{CAPEX}$). Esse arranjo segue a prática de pré-viabilidade quando não há orçamento executivo, permitindo varrer um intervalo plausível de custos financeiros e tecnológicos (IRENA, 2020; OES, 2015).

Os resultados das Tabelas 14 e 15 mostram comportamentos distintos:

- EWP (Matinhos) — O LCOE situa-se em 0,30–0,98 R\$/kWh no cenário realista e 0,27–0,87 R\$/kWh no otimista. A diferença é moderada porque, nos picos de recurso, P_{out} satura no limite nominal de 100 kW; assim, ganhos em J elevam pouco E_{anual} . Para o EWP, reduções de c_{kW} e α tendem a impactar mais o LCOE do que aumentos de recurso de pico.
- CETO-6 (Praia de Leste) — O LCOE é mais sensível ao cenário energético: no realista, 1,26–4,28 R\$/kWh; no otimista, 0,40–1,35 R\$/kWh. Como o rating é maior (200 kW) e o sítio tem J médio superior, os picos contribuem mais para E_{anual} . Reduzir c_{kW} , α e ajustar o rating (ou número de módulos) são medidas decisivas para empurrar o LCOE a patamares competitivos.

Três leituras complementares decorrem desses achados:

1. **Sensibilidade a custos financeiros** — O LCOE cresce com r . Em tecnologias emergentes, o custo de capital é elevado por risco tecnológico e de implantação; políticas de redução de risco têm alto efeito no LCOE (IRENA, 2020).
2. **Dimensão e saturação de potência** — Quando P_{out} é frequentemente limitado por P_{nom} , o ganho de recurso não se converte linearmente em E_{anual} . Para o EWP, vale avaliar *rating* e modularidade para melhor casar a conversão ao regime local.
3. **O&M e integração** — A fração α captura logística, corrosão/bioincrustação e janelas de mar. Tecnologias com acesso costeiro (EWP) tendem a α menor; soluções submersas (CETO) exigem embarcações/janelas e podem ter α maior. Reduzir α via desenho de manutenção e modularidade é caminho direto para baixar o LCOE (IEA, 2023).

Por fim, ressalta-se que estes LCOEs são piso técnico: não incluem indisponibilidade, perdas adicionais da cadeia de conversão, custos de conexão específicos, contingências e tributos. Como próximos passos, recomenda-se: (i) análise de sensibilidade ampliada no triângulo $r - c_{\text{kW}} - \alpha$; (ii) estudo rating vs. saturação para o EWP; (iii) inclusão de disponibilidade/ perdas elétricas; e (iv) comparação com bandas de referência de LCOE de renováveis costeiras (IRENA, 2020; Lazard, 2021; IEA, 2023; OES, 2015).

5 CONCLUSÕES

Este trabalho mapeou e avaliou o potencial energético das ondas no litoral do Paraná, combinando simulações numéricas com o TOMAWAC (dados obtidos através do ERA5) e a calibração/validação com a boia PR-1 (SiMCosta) para o ano de 2014. O desenho metodológico permitiu caracterizar a variabilidade espaço-temporal do recurso, testar a capacidade do modelo em reproduzir a dinâmica ondulatória regional e traduzir o potencial em métricas de conversão elétrica para dois WECs (Conversores de energia) representativos (Eco Wave Power e CETO), além de fornecer resultados para uma análise econômico-ambiental preliminar via LCOE.

A validação do modelo de ondas, em síntese, compara as séries observadas na estação PR-1 (SiMCosta) e as simulações do TOMAWAC modelados através do ERA5 (Figura 23) indica que o modelo é capaz de representar de forma consistente o comportamento geral de ondas na área de estudo. As rosas direcionais e os histogramas (Figuras 24, 25, 26, 27 e 28) confirmam um regime fortemente direcional, com predominância de incidência no quadrante Leste (principalmente entre E e SE), reproduzido pelo modelo com distribuição direcional ligeiramente de forma mais concentrada. De modo complementar, os boxplots (Figura 29) reforçam diferenças na tendência central e na dispersão, sugerindo que parte das discrepâncias está associada à representação do estado médio e à suavização da variabilidade em determinados intervalos, especialmente para T_p .

De modo quantitativo, as estatísticas representadas na Tabela 8 apontando erros moderados para H_s (RMSE = 0,704m; MAE = 0,636m), refletindo que a série simulada não reproduz perfeitamente a distribuição observada ao longo de todo o espectro de condições (incluindo eventos mais calmos ou eventos mais energéticos). Para T_p , os erros são mais elevados (RMSE = 2,072s; MAE = 1,269s), porém com dispersão relativamente menor no conjunto simulado (RVAR < 1), o que é consistente com a concentração do modelo em uma faixa mais estreita de períodos observada nos histogramas. Para a direção de pico, por se tratar de variável circular, a avaliação foi conduzida com métricas adequadas (Tabela 9), indicando erros angulares médios moderados (RMSE = 17,2°; MAE = 12,2°), baixa discrepância proporcional (ER = 6,8%).

Assim, os resultados desta validação sustentam a utilização do TOMAWAC/ERA5 como base para a estimativa do recurso médio e para a comparação de cenários na região, especialmente quando o objetivo é caracterizar padrões ondulatórios e diferenças relativas entre alternativas. Recomenda-se, contudo, cautela na extrapolação para eventos extremos e para análises sensíveis à distribuições, uma vez que discrepâncias de magnitude, variabilidade e dispersão direcional podem ser amplificadas nessas

condições. Por fim, a validação obtida fornece suporte metodológico para a adoção das condições de contorno derivadas do ERA5 na etapa subsequente de simulação, reforçando a importância de campanhas *in situ* adicionais para reduzir incertezas e aprimorar futuras calibrações/validações no litoral do Paraná.

Os resultados dentro do modelo ondulatório indicam que o potencial energético das ondas dentro da área de estudo apresenta um padrão espacial definido, com aumento de H_s e, conseqüentemente, da potência das ondas no sentido costa a mar aberto (Figuras 30 e 31). Esse gradiente é consistente, mas com maior incidência em condições de ondas em áreas mais profundas e expostas ao swell, proveniente ao quadrante sul/sudeste. Enquanto aos processos costeiros, como refração, shoaling, dissipação por fundo e quebra, indicam de forma mais intensa a altura das ondas do que o período de pico.

A comparação entre os três pontos de interesse (Matinhos, Praia de Leste e Ilha do Mel) (Figura 32) evidencia que a variabilidade local é controlada principalmente pela orientação da linha de costa, pela presença da Ilha do Mel e pela batimetria, que favorecem a formação de zonas relativamente abrigadas e redistribuem a energia incidente na plataforma interna. Nesse contexto, a Praia de Leste apresenta o regime mais energético e mais variável, com maior média anual de potência ($\bar{P} = 3,57 \text{ kW m}^{-1}$) e maior desvio-padrão ($\text{STD} = 3,42 \text{ kW m}^{-1}$), além do maior pico de potência ($\text{Máx} = 40,846 \text{ kW m}^{-1}$; Tabela 10). Matinhos ocupa uma condição intermediária ($\bar{P} = 3,16 \text{ kW m}^{-1}$; $\text{STD} = 2,823 \text{ kW m}^{-1}$), enquanto a Ilha do Mel se caracteriza como o setor relativamente mais “manso” e estável ($\text{Máx} = 10,98 \text{ kW m}^{-1}$; $\bar{P} = 2,88 \text{ kW m}^{-1}$; $\text{STD} = 1,893 \text{ kW m}^{-1}$), coerente com o efeito de abrigo geomorfológico e com a menor exposição direta ao swell incidente.

Do ponto de vista do aproveitamento energético, a maior potência média e a maior variabilidade observadas na Praia de Leste sugerem melhor disponibilidade de recurso, porém com maior exigência de projeto estrutural e de planejamento operacional, dado o aumento da ocorrência de eventos intensos. Em contraste, Matinhos apresenta um compromisso entre energia disponível e estabilidade do regime, potencialmente favorável a soluções com menor complexidade de ancoragem/instalação em ambientes mais costeiros. Por fim, a Ilha do Mel, apesar de menos competitiva para maximização de geração, pode ser relevante para aplicações de menor escala ou para estratégias em que maior previsibilidade e menor severidade sejam desejáveis. Assim, os resultados do modelo fornecem uma base consistente para a etapa subsequente de avaliação de conversores e comparação entre cenários, destacando a importância de considerar simultaneamente magnitude, variabilidade e condicionantes morfodinâmicos locais na seleção de sítios ao longo do litoral paranaense.

A análise mensal evidencia uma sazonalidade do potencial energético das

ondas no litoral do Paraná, com intensificação no outono-inverno (máximos no inverno, com pico em agosto) e redução no verão (mínimos em janeiro), conforme indicado pelas séries temporais de potência máxima nos pontos selecionados (Figura 33). O índice de oscilação mensal ($MV = 0,81$) mostra essa amplitude, indicando que a variação sazonal corresponde a aproximadamente 81% da média anual, ou seja, trata-se de um regime com forte contraste entre meses mais e menos energéticos.

Esse comportamento é consistente com a climatologia regional, na qual a maior frequência de frentes frias e a atuação de ciclones extratropicais/subtropicais no Atlântico Sudoeste durante o outono-inverno favorecem a geração e propagação de swell (predominantemente de S-SE), com períodos mais longos e maior eficiência de transporte de energia sobre a plataforma. Em contrapartida, no verão predominam condições mais brandas, com maior participação de ondas geradas localmente por ventos mais curtos e maior dissipação costeira, reduzindo a energia disponível. Adicionalmente, a orientação da linha de costa e o sombreamento geomorfológico (por exemplo, associado à Ilha do Mel) modulam a exposição direcional e podem acentuar as diferenças mensais entre os sítios, reforçando que a variabilidade sazonal resulta da combinação entre forçantes atmosféricas regionais e condicionantes locais.

Para o aproveitamento energético, os meses de maior energia tendem a aumentar o potencial de geração, mas também impõem maiores solicitações estruturais e operacionais, enquanto os meses de menor energia podem ser mais favoráveis para instalação, inspeções e manutenção. Assim, a sazonalidade observada deve ser considerada tanto na estimativa do recurso quanto no planejamento operacional e na seleção de estratégias de conversão, especialmente ao comparar tecnologias e cenários ao longo do litoral paranaense.

Para a estimativa de conversão de energia de ondas em eletricidade, aplicada aos conversores Eco Wave Power (EWP) e CETO-6, indica que o atendimento mensal em unidades consumidoras (UC) é fortemente condicionado pela potência nominal do equipamento e pela relação entre potência incidente (P_{inc}) e potência de saída (P_{out}) limitada pela capacidade instalada. No caso do EWP (Matinhos), observa-se que, no cenário realista, P_{out} permanece com frequência abaixo ou próximo do limite nominal, resultando em atendimento moderado (ordem de centenas de UC/mês), enquanto no cenário otimista o ganho marginal é reduzido devido à saturação em P_{nom} , evidenciando que aumentos adicionais de recurso não se traduzem linearmente em energia útil quando a potência instalada se torna o fator limitante. Para o CETO-6 (Praia de Leste), o maior recurso disponível tende a favorecer o desempenho no cenário realista, com P_{out} mais elevado e maior energia mensal, ao passo que no cenário otimista a saturação também se manifesta, embora em um patamar superior, coerente com a maior potência nominal do arranjo.

Considerando $P_{\text{onda}} 2,5\text{--}3,6$ kW/m e consumo residencial de referência em torno de 125–134 kWh/UC·mês, estimaram-se, para um módulo EWP (largura ativa de aproximadamente 28 m e eficiências globais de 20–40%), energias mensais da ordem de 10–20 MWh (centenas de UCs/mês). Para uma unidade CETO em cenários conservador/central/otimista (18,6–29 kW médios), as estimativas foram entre 13 e 21 MWh/mês (também centenas de UCs/mês). Em síntese, ambas as tecnologias apresentam mesma ordem de grandeza, com escalabilidade proporcional ao número de módulos/unidades.

A orientação costeira e a batimetria local modulam o recurso e as cargas extremas; projetos em Praia de Leste tendem a exigir dimensionamento mais robusto, enquanto Matinhos favorece integração a estruturas (espigão) e manutenção facilitada.

Esses resultados reforçam que comparações entre tecnologias devem considerar não apenas a densidade de potência média local, mas também o dimensionamento (potência nominal e modularidade), a exposição direcional e os condicionantes de instalação e operação. Além disso, as estimativas obtidas devem ser interpretadas como um piso técnico simplificado e resumido, pois não incorporam disponibilidade, perdas eletromecânicas e elétricas, restrições operacionais, bioincrustação/corrosão e a modulação sazonal do consumo. Ainda assim, o exercício fornece uma ordem de grandeza consistente para orientar decisões preliminares de dimensionamento e para embasar a etapa econômica subsequente, destacando a importância de integrar recurso, tecnologia e condições locais de rede na avaliação de viabilidade.

De modo geral, os LCOEs estimados para o EWP (100kW, Matinhos) e para o CETO-6 (200kW, Praia de Leste) evidenciam comportamentos distintos e uma forte sensibilidade às hipóteses de custo e financiamento. Para o EWP, os valores de LCOE situam-se em faixas mais baixas e com menor variação entre cenários realista e otimista, refletindo o menor CAPEX específico adotado e, principalmente, a ocorrência frequente de limitação por potência nominal, de modo que aumentos do recurso de pico elevam pouco a energia anual efetivamente convertida. Para o CETO-6, o LCOE apresenta maior amplitude e maior dependência do cenário energético, uma vez que a maior disponibilidade de recurso no sítio contribui para elevar E_{anual} , enquanto os parâmetros financeiros e de custo específico (c_{kW} , r , α) exercem influência expressiva sobre o resultado final.

Nesse contexto, os resultados devem ser interpretados como estimativas exploratórias de pré-viabilidade, úteis para ordenar alternativas e identificar alavancas de redução de custo, mas ainda insuficientes para conclusões definitivas, pois não incorporam, de forma completa, indisponibilidades, perdas adicionais da cadeia de conversão, custos de conexão e reforços de rede, contingências ambientais e requisitos de licenciamento. Assim, a análise econômica complementa a avaliação do recurso e

reforça que a competitividade dos conversores depende simultaneamente de desempenho energético, adequação ao sítio e condições reais de implantação e operação no litoral paranaense.

Em termos de limitações, os resultados devem ser interpretados com cautela por se basearem em uma série temporal restrita a um único ano (2014), o que reduz a representatividade climática em escalas interanuais/decadais e limita a robustez na caracterização de extremos. Além disso, discrepâncias estatísticas pontuais, como valores de RVAR superiores a 1 para H_s em alguns locais e a presença de viés em T_p , indicam que a aderência do modelo varia espacialmente e que extrapolações diretas podem introduzir incertezas adicionais. No que se refere à conversão energética, adotou-se uma abordagem simplificada, sem incorporar disponibilidade operacional, perdas adicionais na cadeia eletromecânica e requisitos de conexão/licenciamento, fatores que tendem a reduzir a energia útil e, portanto, o número de unidades consumidoras atendidas. Por fim, a estimativa de LCOE foi conduzida com hipóteses paramétricas de CAPEX/OPEX e parâmetros financeiros (r , n), sem orçamentos, devendo ser entendida como uma triagem comparativa para ordenar cenários e tecnologias, e não como um valor definitivo de viabilidade econômico-financeira.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

(a) Rodar todos os dados disponíveis no ERA5 desde de 1940 até o presente para quantificar variabilidade interanual/decadal e reduzir incerteza amostral; (b) Incluir análise de excedência sazonal e percentis mensais por sítio, além de distribuição direcional; (c) Incorporar T_e direto quando disponível e/ou validar o fator β local (T_e/T_p) contra observações; (d) Estimar energia e LCOE em cenários (CETO/EWP), com limites por potência nominal e disponibilidade; (e) Avaliar impactos ambientais locais (hidrodinâmica costeira, biofouling, ruído subaquático) e integração com outras renováveis; (f) Curva de potência; (g) Modelar o Eco Wave Power dentro do espigão de Matinhos.

REFERÊNCIAS

- ABRELL, J.; KOSCH, M.; RAUSCH, S. **The Economic Cost of Carbon Abatement with Renewable Energy Policies**. Zurich, 2017. (Economics Working Paper Series, 17/273). DOI: 10.3929/ethz-b-000176290.
- ADELAJA, A.; MCKEOWN, C.; CALNIN, B.; HAILU, Y. Assessing offshore wind potential. **Energy Policy**, Elsevier, v. 42, p. 191–200, 2012. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.11.072.
- ADERINTO, T.; LI, H. Review on Power Performance and Efficiency of Wave Energy Converters. **Energies**, v. 12, n. 22, 2019. ISSN 1996-1073. DOI: 10.3390/en12224329.
- AHAMED, R.; MCKEE, K.; HOWARD, I. Advancements of wave energy converters based on power take off (PTO) systems: A review. **Ocean Engineering**, Elsevier, v. 204, p. 107248, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107248>.
- ASTARIZ, S.; IGLESIAS, G. The economics of wave energy: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 397–408, 2015. ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.061>.
- BABARIT, A.; HALS, J.; MULIAWAN, M. J.; KURNIAWAN, A.; MOAN, T.; KROKSTAD, J. Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters. **Renewable energy**, Elsevier, v. 41, p. 44–63, 2012. DOI: 10.1016/j.renene.2011.10.002.
- BANE, J. M.; HE, R.; MUGLIA, M.; LOWCHER, C. F.; GONG, Y.; HAINES, S. M. Marine hydrokinetic energy from western boundary currents. **Annual Review of Marine Science**, Annual Reviews, v. 9, p. 105–123, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010816-060423>.
- BASTOS, A. S.; SOUZA, T. R. C. d.; RIBEIRO, D. S.; MELO, M. d. L. N. M.; MARTINEZ, C. B. Wave Energy Generation in Brazil: A Georeferenced Oscillating Water Column Inventory. **Energies**, v. 16, n. 8, 2023. ISSN 1996-1073. DOI: 10.3390/en16083409.
- BEDARD, R.; JACOBSON, P. T.; PREVISIC, M.; MUSIAL, W.; VARLEY, R. An overview of ocean renewable energy technologies. **Oceanography**, JSTOR, v. 23, n. 2, p. 22–31, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5670/oceanog.2010.40>.
- BEN. **Balanco Energético Nacional 2024: ano base 2023**. Rio de Janeiro: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2024. <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2024.
- BENOIT, M. Logiciel TOMAWAC de modélisation des états de mer en éléments finis. Notice de la version 5.2. **Rapport HP-75/02/065/A, EDF-LNHE**, 2003.

BLAIR, T. H. Solar and Wind Energy. In: *ENERGY Production Systems Engineering*. 1. ed. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2016. cap. 28, p. 663–679. DOI: 10.1002/9781119238041.ch28.

BORTONI, E. C.; GUARDIA, E. C.; GUERRINI, A. B.; LOPES, E. A.; FERREIRA, T. V.; NETO, R. A. Probabilistic and Possibilistic Approaches for LCOE Appraisal of Renewable Generation. In: IEEE. 2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). [S.l.: s.n.], 2022. P. 01–05.

BOURBAN, S.; DURAND, N.; TURNBULL, M.; WILSON, S.; CHEESEMAN, S. Coastal shelf model of northern European waters to inform tidal power industry decisions. **XIXth TELEMAR-MASCARET User Conference**, 2012.

BURKE, M. J.; MELGAR, R. SDG 7 requires post-growth energy sufficiency. **Frontiers in Sustainability**, v. 3, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/frsus.2022.940958>.

CAI, Y.; LI, E. Technology, Geometry, Performance and Challenges in Wave Energy Converters. **Highlights in Science, Engineering and Technology**, v. 52, p. 105–118, jul. 2023. DOI: 10.54097/hset.v52i.8842.

CALDER, M.; CRAIG, C.; CULLEY, D.; CANI, R. de; DONNELLY, C. A.; DOUGLAS, R.; EDMONDS, B.; GASCOIGNE, J.; GILBERT, N.; HARGROVE, C.; HINDS, D.; LANE, D. C.; MITCHELL, D.; PAVEY, G.; ROBERTSON, D.; ROSEWELL, B.; SHERWIN, S.; WALPORT, M.; WILSON, A. Computational modelling for decision-making: where, why, what, who and how. **Royal Society Open Science**, v. 5, n. 6, p. 172096, 2018. DOI: 10.1098/rsos.172096.

CARLEY, S.; KONISKY, D. M. The justice and equity implications of the clean energy transition. **Nature Energy**, Nature Publishing Group UK London, v. 5, n. 8, p. 569–577, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0641-6>.

CASCAJO, R.; GARCÍA, E.; QUILES, E.; CORRECHER, A.; MORANT, F. Integration of marine wave energy converters into seaports: A case study in the port of Valencia. **Energies**, mdpi, v. 12, n. 5, p. 787, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12050787>.

CASCAJO, R.; GARCÍA, E.; QUILES, E.; MORANT, F.; CORRECHER, A. Wave energy assessment at valencia gulf and comparison of energy production of most suitable wave energy converters. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, MDPI, v. 17, n. 22, p. 8473, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17228473>.

CASTELLO, J. P.; KRUG, L. C. (Ed.). **Introdução às Ciências do Mar**. Pelotas: Textos, 2015. P. 602. ISBN 978-85-68539-00-2.

- CHEN, W.-B. Analysing seven decades of global wave power trends: The impact of prolonged ocean warming. **Applied Energy**, v. 356, p. 122440, 2024. ISSN 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122440>.
- CLÉMENT, A.; MCCULLEN, P.; FALCÃO, A.; FIORENTINO, A.; GARDNER, F.; HAMMARLUND, K.; LEMONIS, G.; LEWIS, T.; NIELSEN, K.; PETRONCINI, S.; PONTES, M.-T.; SCHILD, P.; SJÖSTRÖM, B.-O.; SØRENSEN, H. C.; THORPE, T. Wave energy in Europe: current status and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 6, n. 5, p. 405–431, 2002. ISSN 1364-0321. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00009-6).
- CLEMENTE, D.; CALHEIROS-CABRAL, T.; ROSA-SANTOS, P.; TAVEIRA-PINTO, F. Blue seaports: the smart, sustainable and electrified ports of the future. **Smart Cities**, MDPI, v. 6, n. 3, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/smartcities6030074>.
- COELHO, G. M. S. **Otimização do Conversor de energia das ondas CECO**. 2018. Diss. (Mestrado) – Universidade do Porto (Portugal).
- COLLADO, P. H. Análise dos efeitos poluentes dos gases metano e dióxido de carbono advindos da agricultura no Brasil e principais países emissores. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2023.
- CONTESTABILE, P.; FERRANTE, V.; VICINANZA, D. Wave energy resource along the coast of Santa Catarina (Brazil). **Energies**, MDPI, v. 8, n. 12, p. 14219–14243, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/en81212423>.
- CORNETT, A. **Inventory of Canada's Marine Renewable Energy Resources**. Canadian Hydraulics Centre, National Research Council of Canada; April 2006. [S.l.], 2006.
- COTRIM, C. d. S.; SEMEDO, A.; LEMOS, G. Brazil Wave Climate from a High-Resolution Wave Hindcast. **Climate**, v. 10, n. 4, 2022. ISSN 2225-1154. DOI: [10.3390/cli10040053](https://doi.org/10.3390/cli10040053).
- CRUZ, J. M.; SARMENTO, A. J. **Energia das ondas: introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais**. Lisboa: Instituto do Ambiente, 2004. Instituto Superior Técnico; WEC – Wave Energy Centre. ISBN 972-8577-11-7.
- CURTIN, J.; MCINERNEY, C.; GALLACHÓIR, B. Ó.; HICKEY, C.; DEANE, P.; DEENEY, P. Quantifying stranding risk for fossil fuel assets and implications for renewable energy investment: A review of the literature. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Pergamon, v. 116, p. 109402, dez. 2019. ISSN 1364-0321. DOI: [10.1016/J.RSER.2019.109402](https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.109402).
- DE BASTIANI, M.; LARINI, V.; MONTECUCCO, R.; GRANCINI, G. The levelized cost of electricity from perovskite photovoltaics. **Energy Environ. Sci.**, The Royal Society of Chemistry, v. 16, p. 421–429, 2 2023. DOI: [10.1039/D2EE03136A](https://doi.org/10.1039/D2EE03136A).

DE QUEIROZ, R.; KOPPE, E.; GRASSI, P.; TARTAS, B.; LAZZARE, K.; BOZZETTO, C.; KEMERICH, P. D. D. C. Geração de energia elétrica através da energia hidráulica e seus impactos ambientais. **Revista eletrônica em gestão, educação e tecnologia ambiental**, v. 13, n. 13, 2013.

DELLE MONACHE, L.; NIPEN, T.; LIU, Y.; ROUX, G.; STULL, R. Kalman filter and analog schemes to postprocess numerical weather predictions. **Monthly Weather Review**, v. 139, n. 11, p. 3554–3570, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1175/2011MWR3653.1>.

DERECZYNSKI, C. P.; MENEZES, W. F. 1 - METEOROLOGIA DA BACIA DE CAMPOS. In: MARTINS, R. P.; GROSSMANN-MATHESON, G. S. (Ed.). **Meteorologia e Oceanografia**. Rio de Janeiro: Campus, 2015. P. 1–54. ISBN 978-85-352-6208-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-85-352-6208-7.50008-8>.

DI LAURO, E.; MAZA, M.; LARA, J. L.; LOSADA, I. J.; CONTESTABILE, P.; VICINANZA, D. Advantages of an innovative vertical breakwater with an overtopping wave energy converter. **Coastal Engineering**, Elsevier, v. 159, p. 103713, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103713>.

DIAS, G. d. C.; SANTOS, S. M. d.; SANTOS, E. D. d.; ROCHA, L. A. O.; OLINTO, C. R. Análise teórica da influência de perfis sobre a potência de uma Turbina Wells empregada em dispositivos de conversão de energia das ondas. **VETOR - Revista de Ciências Exatas e Engenharias**, v. 23, n. 1, p. 44–56, jul. 2013.

DING, B.; CAZZOLATO, B. S.; ARJOMANDI, M.; HARDY, P.; MILLS, B. Sea-state based maximum power point tracking damping control of a fully submerged oscillating buoy. **Ocean Engineering**, Elsevier, v. 126, p. 299–312, 2016.

DOS SANTOS, R. B. **Estudo do potencial energético de ondas geradas pelo vento para a plataforma continental sul do Brasil**. 2009. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande Porto Alegre, Brazil.

DREW, B.; PLUMMER, A. R.; SAHINKAYA, M. N. **A review of wave energy converter technology**. [S.l.]: Sage Publications Sage UK: London, England, 2009. DOI: 10.1243/09576509JPE782.

ECO WAVE POWER. **Eco Wave Power – Onshore Wave Energy**. Acesso em: 10 dez. 2024. 2025. Disponível em: <<https://www.ecowavepower.com/>>.

EDWARDS, E.; CRADDEN, L.; INGRAM, D.; KALOGERI, C. Verification within Wave Resource Assessments. Part 1: Statistical Analysis. **International Journal of Marine Energy**, v. 8, out. 2014. DOI: 10.1016/j.ijome.2014.10.003.

EDWARDS, E.; CRADDEN, L.; INGRAM, D.; KALOGERI, C. Verification within wave resource assessments. Part 1: Statistical analysis. **International Journal of Marine Energy**, Elsevier, v. 8, p. 50–69, 2014. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ijome.2014.10.003>.

EMAMI, Y.; MEHRANGIZ, S.; ETEMADI, A.; MOSTAFAZADEH, A.; DARVISHI, S. A brief review about salinity gradient energy. **Int. J. Smart Grid Clean Energy**, v. 2, n. 2, p. 295–300, 2013. DOI: 10.12720/sgce.2.2.295-300.

EPE. **Caderno de Preços da Geração**. Brasília: EMPRESA DE PESQUISA

ENERGÉTICA, 2021. [https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-](https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Caderno-de-Preços-da-Geração)

[abertos/publicacoes/Caderno-de-Preços-da-Geração](https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Caderno-de-Preços-da-Geração). Acesso em: 11 nov. 2024.

ESPINDOLA, R. L.; ARAÚJO, A. M. Wave energy resource of Brazil: An analysis from 35 years of ERA-Interim reanalysis data. **PLoS One**, Public Library of Science San Francisco, CA USA, v. 12, n. 8, e0183501, 2017. DOI:

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183501>.

EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE WEATHER FORECASTS (ECMWF).

Verification Study: Global WAM Model, December 1987 - November 1988. Reading, United Kingdom, 1989. Acesso em: 19 set. 2022.

FALCÃO, A. F. d. O. Wave energy utilization: A review of the technologies. **Renewable and sustainable energy reviews**, Elsevier, v. 14, n. 3, p. 899–918, 2010.

FALNES, J. A review of wave-energy extraction. **Marine Structures**, v. 20, n. 4, p. 185–201, 2007. ISSN 0951-8339. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2007.09.001>.

FOTEINIS, S. Wave energy converters in low energy seas: Current state and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 162, p. 112448, 2022.

ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112448>.

FOX, D. G. Judging air quality model performance: A summary of the AMS workshop on dispersion model performance, woods hole, Mass., 8–11 September 1980. **Bulletin of the American Meteorological Society**, American Meteorological Society, v. 62, n. 5, p. 599–609, 1981.

FRANJIĆ, S. Unleashing Sustainable Energy: The Sun, Earth's Largest and Most Powerful Source. **Journal of Sustainable Development**, v. 4, n. 2, p. 1–9, 2023. DOI: 10.56388/susd230615.

GALLUTIA, D.; FARD, M. T.; SOTO, M. G.; HE, J. Recent advances in wave energy conversion systems: From wave theory to devices and control strategies. **Ocean Engineering**, Elsevier, v. 252, p. 111105, 2022. DOI:

10.1016/j.oceaneng.2022.111105.

GARRISON, T. **Fundamentos de oceanografia**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016. P. 213–239. Tradução de: *Essentials of Oceanography* (7th ed.). ISBN: 978-85-221-2421-3.

GEOSCIENCE AUSTRALIA AND BUREAU OF RESOURCES AND ENERGY ECONOMICS. **Australian Energy Resource Assessment**. 2nd. Canberra, Australia: Geoscience Australia, 2014. P. 265.

GIELEN, D.; BOSHELL, F.; SAYGIN, D.; BAZILIAN, M. D.; WAGNER, N.; GORINI, R. The role of renewable energy in the global energy transformation. **Energy Strategy Reviews**, v. 24, p. 38–50, 2019. ISSN 2211-467X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>.

GOLDTHAU, A.; EICKE, L.; WEKO, S. The Global Energy Transition and the Global South. In: *THE Geopolitics of the Global Energy Transition*. [S.l.]: Springer, 2020. P. 319–339. DOI: 10.1007/978-3-030-39066-2_14.

GROUP, G. C. **GEBCO 2023 Grid: Global 15 arc-second bathymetric grid (MSL)**. Dataset. [S.l.: s.n.], 2023.

GUILLOU, N.; LAVIDAS, G.; CHAPALAIN, G. Wave energy resource assessment for exploitation—a review. **Journal of Marine Science and Engineering**, MDPI, v. 8, n. 9, p. 705, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse8090705>.

GUO, B.; WANG, T.; JIN, S.; DUAN, S.; YANG, K.; ZHAO, Y. A Review of Point Absorber Wave Energy Converters. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, n. 10, 2022. ISSN 2077-1312. DOI: 10.3390/jmse10101534.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 26, p. 591–608, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862011000400009>.

HANNAN, M. A.; AL-SHETWI, M. A. H.; KER, P. J.; HUSSAIN, A.; MAHLIA, T. M. I.; MANSUR, M. A Fuzzy-Rule-Based PV Inverter Controller to Enhance the Quality of Solar Power Supply: Experimental Test and Validation. **Electronics**, v. 8, n. 11, p. 1335, 2019. DOI: 10.3390/electronics8111335.

HARARI, J. **Noções de oceanografia**. 1. ed. [S.l.]: Universidade de São Paulo. Instituto Oceanográfico, 2021. P. 255–273. Acesso em: 25 abr. 2024. DOI: 10.11606/9786599585401.

HERNÁNDEZ, J.; GARCÍA, D.; VARONA, H. L.; CALZADA, A. E.; RODRIGUEZ, A.; REYES, D.; CARRACEDO, D. Wave energy: State of the art and current development. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 17, n. 2, p. 176–189, 2022. DOI: <http://doi.org/10.54451/PanamJAS.17.2.176>.

HERVOUET, J. Free surface flows: Modelling with the finite element methods. **England: Wiley & Sons**, 2007. DOI: 10.1002/9780470319628.

IEA. **World Energy Outlook 2023**. Paris, 2023. Acesso em: 28 jan. 2024.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Edição: R. K. Pachauri e L. A. Meyer. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. P. 151. Core Writing Team.

IRENA. **Innovation outlook: Ocean energy technologies**. Abu Dhabi, 2020. Acesso em: 28 jan. 2024. ISBN 978-92-9260-287-1.

_____. **Salinity Gradient Energy – Technology Brief**. Abu Dhabi, 2014. Acesso em: 30 jan. 2024.

ISAACS, J. D.; SCHMITT, W. R. Ocean Energy: Forms and Prospects. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 207, n. 4428, p. 265–273, 1980. ISSN 00368075, 10959203. DOI: 10.1126/science.207.4428.265.

JAHANGIR, M. H.; MOTLAGH, S. G. Feasibility study of CETO wave energy converter in Iranian coastal areas to meet electrical demands (a case study). **Energy for Sustainable Development**, Elsevier, v. 70, p. 272–289, 2022. DOI: 10.1016/j.esd.2022.07.017.

JOHNSTONE, I. SDG 13-Climate Action Open Science: Accelerating Practices. **Journal of Science Policy Governance**, Journal of Science Policy e Governance, Inc., v. 21, 02 dez. 2022. DOI: 10.38126/jspg210206.

JOSELIN HERBERT, G.; INIYAN, S.; SREEVALSAN, E.; RAJAPANDIAN, S. A review of wind energy technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n. 6, p. 1117–1145, 2007. ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.08.004>.

KERR, D. Marine energy. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, The Royal Society London, v. 365, n. 1853, p. 971–992, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1959>.

KHAN, M. N. I.; HIJBEEK, R.; BERGER, U.; KOEDAM, N.; GRUETERS, U.; ISLAM, S. Z.; HASAN, M. A.; DAHDOUH-GUEBAS, F. An evaluation of the plant density estimator the Point-Centred Quarter Method (PCQM) using Monte Carlo simulation. **PLoS One**, Public Library of Science San Francisco, CA USA, v. 11, n. 6, e0157985, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0157985>.

KHARE, V.; BHUIYAN, M. A. Tidal energy-path towards sustainable energy: A technical review. **Cleaner Energy Systems**, v. 3, p. 100041, 2022. ISSN 2772-7831. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cles.2022.100041>.

- KIRINUS, E.; OLEINIK, P. H.; COSTI, J.; MARQUES, W. C. Long-term simulations for ocean energy off the Brazilian coast. **Energy**, Elsevier, v. 163, p. 364–382, 2018. DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.080.
- KIRINUS, E. d. P.; MARQUES, W. C. Viabilidade do uso de turbinas hidrocinéticas na Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira. **Scientia Plena**, v. 11, n. 8, 2015. DOI: <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2015.081327>.
- KIRINUS, E. d. P.; OLEINIK, P. H.; MARQUES, W. C. Hydrodynamic and Morphodynamic Influences from Ocean Current Energy Conversion Sites in the South–Southeastern Brazilian Inner Shelf. **Processes**, MDPI, v. 10, n. 2, p. 340, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10020340>.
- KOFOED, J. P. The wave energy sector. **Handbook of ocean wave energy**, Springer International Publishing, p. 17–42, 2017.
- KOMEN, G. J.; CAVALERI, L.; DONELAN, M.; HASSELMANN, K.; HASSELMANN, S.; JANSSEN, P. A. E. M. **Dynamics and Modelling of Ocean Waves**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1994. DOI: doi:10.1017/CB09780511628955.
- LALBEHARRY, R. Evaluation of the CMC regional wave forecasting system against buoy data. **Atmosphere-Ocean**, Taylor & Francis, v. 40, n. 1, p. 1–20, 2002. DOI: 10.3137/ao.400101.
- LAVIDAS, G.; DE LEO, F.; BESIO, G. Blue Growth Development in the Mediterranean Sea: Quantifying the Benefits of an Integrated Wave Energy Converter at Genoa Harbour. **Energies**, v. 13, n. 16, 2020. ISSN 1996-1073. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13164201>.
- LAZARD. **Lazard’s Levelized Cost of Energy Analysis – Version 15.0**. [s.l.], 2021.
- LEE, J.-Y.; MAROTZKE, J.; BALA, G.; CAO, L.; CORTI, S.; DUNNE, J. P.; ENGELBRECHT, F.; FISCHER, E.; FYFE, J. C.; JONES, C.; MAYCOCK, A.; MUTEMI, J.; NDIAYE, O.; PANICKAL, S.; ZHOU, T. Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M. I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J. B. R.; MAYCOCK, T. K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇİ, O.; YU, R.; ZHOU, B. (Ed.). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom e New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021. P. 553–672. DOI: 10.1017/9781009157896.006.
- LEGATES, D. R.; MCCABE JR, G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water resources research**, Wiley Online Library, v. 35, n. 1, p. 233–241, 1999.

LENNARD, D. E. Ocean Thermal Energy. In: CLEVELAND, C. J. (Ed.). **Encyclopedia of Energy**. New York: Elsevier, 2004. P. 511–520. ISBN 978-0-12-176480-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00343-0>.

LISBOA, R. C.; TEIXEIRA, P. R.; FORTES, C. J. Numerical evaluation of wave energy potential in the south of Brazil. **Energy**, Elsevier, v. 121, p. 176–184, 2017. DOI: 10.1016/j.energy.2017.01.001.

AL-MAAMARY, H. M. S.; KAZEM, H. A.; CHAICHAN, M. T. Renewable Energy and GCC States Energy Challenges in the 21st Century: A Review. **International Journal of Computation and Applied Sciences (IJOCAAS)**, v. 2, n. 1, p. 11–18, 2017. DOI: 10.24842/1611/0018.

MAGAGNA, D.; MARGHETINI, L.; ALESSI, A.; BANNON, E.; BOELMAN, E.; BOULD, D.; COY, V.; DE MARCHI, E.; FRIGAARD, P.; GUEDES SOARES, C.; GOLIGHTLY, C.; HALS TODALSHAUG, J.; HEWARD, M.; HOFMANN, M.; HOLMES, B.; JOHNSTONE, C.; KAMIZURU, Y.; LEWIS, T.; MACADRE, L.; MAISONDIEU, C.; MARTINI, M.; MORO, A.; NIELSEN, K.; REIS, V.; ROBERTSON, S.; SCHILD, P.; SOEDE, M.; TAYLOR, N.; VIOLA, I.; WALLET, N.; WADBLEED, X.; YEATS, B. **Workshop on identification of future emerging technologies in the ocean energy sector**. Luxembourg, 2018. JRC112635. DOI: 10.2760/23207.

MARINESPACE LTD. **Decommissioning of the SeaGen tidal turbine in Strangford Lough, Northern Ireland: Environmental Statement**. [S.l.], 2016. P. 92.

MARQUES, W. C.; FERNANDES, E. H. L.; ROCHA, L. A. O.; MALCHEREK, A. Energy converting structures in the Southern Brazilian Shelf: Energy Conversion and its influence on the hydrodynamic and morphodynamic processes. **Earth Sciences and Geotechnical Engineering**, 2011.

MARTINEZ, A.; IGLESIAS, G. Wave exploitability index and wave resource classification. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 134, p. 110393, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110393>.

MASUDA, T. **Wave-activated power generator**. [S.l.]: Google Patents, ago. 1989. US Patent 4,858,434.

MEDEIROS, J. P. C. d. **Precificação da energia eólica offshore no Brasil**. 2014. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

MELNYK, A.; COX, H.; GHORBANI, A.; HOPPE, T. Value dynamics in energy democracy: An exploration of community energy initiatives. **Energy Research and Social Science**, Elsevier Ltd, v. 102, ago. 2023. ISSN 22146296. DOI: 10.1016/j.erss.2023.103163.

MELO, E.; HAMMES, G. R.; FRANCO, D.; ROMEU, A. R. Aferição do desempenho do modelo WW3 em Santa Catarina. Rio Grande, RS, Brasil, nov. 2008. Realizado de 5 a 7 de novembro de 2008.

MOHAMMED, N. Q.; AHMED, M. S.; MOHAMMED, M. A.; HAMMOOD, O. A.; ALSHARA, H. A. N.; KAMIL, A. A. Comparative Analysis between Solar and Wind Turbine Energy Sources in IoT Based on Economical and Efficiency Considerations. In: 2019 22nd International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS). [S.l.: s.n.], 2019. P. 448–452. DOI: 10.1109/CSCS.2019.00082.

MOORTHY, K.; PATWA, N.; GUPTA, Y. *et al.* Breaking barriers in deployment of renewable energy. **Heliyon**, Elsevier, v. 5, n. 1, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01166>.

MØRK, G.; BARSTOW, S.; KABUTH, A.; PONTES, M. T. Assessing the Global Wave Energy Potential. In: PROCEEDINGS of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE). Shanghai, China: ASME, jun. 2010. v. 3, p. 447–454. DOI: 10.1115/OMAE2010-20473.

MORTIMER, A.; AHMED, I.; JOHNSON, T.; TANG, L.; ALSTON, M. **Localizing Sustainable Development Goal 13 on Climate Action to Build Local Resilience to Floods in the Hunter Valley: A Literature Review**. v. 15. [S.l.]: Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), mar. 2023. DOI: 10.3390/su15065565.

MUSTAPA, M.; YAAKOB, O.; AHMED, Y. M.; RHEEM, C.-K.; KOH, K.; ADNAN, F. A. Wave energy device and breakwater integration: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 77, p. 43–58, 2017. ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.110>.

NEARY, V. S.; LAWSON, M.; PREVISIC, M.; COPPING, A.; HALLETT, K. C.; LABONTE, A.; RIEKS, J.; MURRAY, D. Methodology for design and economic analysis of marine energy conversion (MEC) technologies. **Sandia Report**, 2014.

NEGRI, M.; MALAVASI, S. Wave Energy Harnessing in Shallow Water through Oscillating Bodies. **Energies**, v. 11, n. 10, 2018. ISSN 1996-1073. DOI: 10.3390/en11102730.

NGAN, M. S.; TAN, C. W. Assessment of economic viability for PV/wind/diesel hybrid energy system in southern Peninsular Malaysia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 634–647, 2012. ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.028>.

NOMAN, S. M.; HASAN, M. M.; HAQUE, O.; BAKI-UL-ISLAM; SALEHIN, I.; MOON, N. N. Tidal Power Plant Exploration: Low Head Water Turbine in Barrage System. In: 2022 13th International Conference on Computing Communication and

Networking Technologies (ICCCNT). [S.l.: s.n.], 2022. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICCCNT54827.2022.9984245.

NREL. **Expert Elicitation for Wave Energy LCOE Futures**. [S.l.: s.n.], 2022.

OCEAN, E. Ocean energy and the environment: Research and strategic actions. **Report by ETIP Ocean (The European Technology and Innovation Platform for Ocean Energy)**. European Commission, Brussels Belgium, 2020.

OES. **A report prepared on behalf of the IEA Technology Collaboration Programme for Ocean Energy Systems (OES) An analysis of the development pathway and Levelised Cost Of Energy trajectories of wave, tidal and OTEC technologies**. [S.l.: s.n.], 2015.

OLABI, A. G.; ABDELKAREEM, M. A. Renewable energy and climate change. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier Ltd, v. 158, abr. 2022. ISSN 18790690. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112111.

OLEINIK, P. H.; KIRINUS, E. d. P.; FRAGASSA, C.; MARQUES, W. C.; COSTI, J. Energetic Potential Assessment of Wind-Driven Waves on the South-Southeastern Brazilian Shelf. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 7, n. 2, 2019. ISSN 2077-1312. DOI: 10.3390/jmse7020025.

OLIVEIRA, B. A. de. **Variabilidade do clima de ondas de Santa Catarina-Brasil utilizando o modelo Wavewatch III**. 2017. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

ONU. **Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development**. [S.l.]: United Nations, 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Acesso em: 20 mar. 2025.

ORNES, S. Turning water into watts. **Physics World**, IOP Publishing, v. 33, n. 3, p. 31, 2020. Disponível em: <https://physicsworld.com/a/turning-water-into-watts/>. Acesso em: 20 mar. 2025.

ORSZAGHOVA, J.; DRAPER, S.; WOLGAMOT, H. Extreme response of a submerged point-absorber wave energy converter. In: PROCEEDINGS of the 20th Australasian Fluid Mechanics Conference. [S.l.: s.n.], 2016.

PENALBA, M.; RINGWOOD, J. V. A Review of Wave-to-Wire Models for Wave Energy Converters. **Energies**, v. 9, n. 7, 2016. ISSN 1996-1073. DOI: 10.3390/en9070506.

PIANCA, C. Wave climate along the Brazilian coast. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 58, mar. 2010.

PONTES, M. T. Assessing the European Wave Energy Resource. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v. 120, n. 4, p. 226–231, nov. 1998. ISSN 0892-7219. DOI: 10.1115/1.2829544.

PONTES, M. T.; BARSTOW, S.; BERTOTTI, L.; CAVALERI, L.; OLIVEIRA-PIRES, H. Use of Numerical Wind-Wave Models for Assessment of the Offshore Wave Energy Resource. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v. 119, n. 3, p. 184–190, ago. 1997. ISSN 0892-7219. DOI: 10.1115/1.2829066.

PYROMALLIS, C. Optimising PTO Parameters for Arrays of Wave Energy Converters. Unpublished manuscript. [S.l.], 2016.

QUINN, J. Computational Modeling. In: [s.l.]: Sage Publications, out. 2020. DOI: 10.4135/9781526421036945708.

RAFIEE, A.; FIÉVEZ, J. Numerical prediction of extreme loads on the CETO wave energy converter. In: PROCEEDINGS of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC). Nantes, France: [s.n.], set. 2015.

RAFIEE, A.; WOLGAMOT, H.; DRAPER, S. Identifying the design wave group for the extreme response of a point absorber wave energy converter. In: PROCEEDINGS of the Asian Wave and Tidal Energy Conference (AWTEC). [S.l.: s.n.], ago. 2016.

RAJAGOPALAN, K.; NIHOUS, G. C. Estimates of global Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) resources using an ocean general circulation model. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 50, p. 532–540, 2013. DOI: 10.1016/j.renene.2012.07.014.

RAMOS, V.; GIANNINI, G.; CALHEIROS-CABRAL, T.; ROSA-SANTOS, P.; TAVEIRA-PINTO, F. An integrated approach to assessing the wave potential for the energy supply of ports: a case study. **Journal of Marine Science and Engineering**, MDPI, v. 10, n. 12, p. 1989, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10121989>.

REGUERO, B.; LOSADA, I.; MÉNDEZ, F. A global wave power resource and its seasonal, interannual and long-term variability. **Applied Energy**, Elsevier, v. 148, p. 366–380, 2015. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.03.114.

RINGWOOD, J. V.; ZHAN, S.; FAEDO, N. Empowering wave energy with control technology: Possibilities and pitfalls. **Annual Reviews in Control**, Elsevier, v. 55, p. 18–44, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2023.04.004>.

RINGWOOD¹, J. V. On the importance of high-fidelity numerical modelling of ocean wave energy converters under controlled conditions. **Floating Offshore Energy Devices: GREENER**, Materials Research Forum LLC, v. 20, p. 31, 2022. DOI: 10.21741/9781644901731-5.

RITCHIE, H.; ROSADO, P.; ROSER, M. Energy Production and Consumption. **Our World in Data**, 2020. <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>.

ROGERS, W. E.; WANG, D. W. Directional validation of wave predictions. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 24, n. 3, p. 504–520, 2007.

SAID, H. A.; RINGWOOD, J. V. Grid integration aspects of wave energy—Overview and perspectives. **IET renewable power generation**, Wiley Online Library, v. 15, n. 14, p. 3045–3064, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2023.04.004>.

SANDIA. **SANDIA REPORT Methodology for Design and Economic Analysis of Marine Energy Conversion (MEC) Technologies**. [S.l.: s.n.], 2014.

SCHOBERT, H. H. **Energy and Society: An Introduction, Second Edition**. 2nd. [S.l.]: CRC Press, 2014. P. 658. DOI: 10.1201/b16677.

SCHUBERT, B. W.; ROBERTSON, W. S.; CAZZOLATO, B. S.; GHAYESH, M. H. Linear and nonlinear hydrodynamic models for dynamics of a submerged point absorber wave energy converter. **Ocean Engineering**, v. 197, p. 106828, 2020. ISSN 0029-8018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106828>.

SHADMAN, M.; SILVA, C.; FALLER, D.; WU, Z.; FREITAS ASSAD, L. P. de; LANDAU, L.; LEVI, C.; ESTEFEN, S. F. Ocean renewable energy potential, technology, and deployments: A case study of Brazil. **Energies**, MDPI, v. 12, n. 19, p. 3658, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12193658>.

SHANMUGAM, G. **Shanmugam, G. 2021. Mass transport, gravity flows, and bottom currents: Downslope and alongslope processes and deposits**. [S.l.]: Elsevier, jan. 2021. P. 608. ISBN 9780128225769.

SHETTY, C.; PRIYAM, A. A review on tidal energy technologies. **Materials Today: Proceedings**, v. 56, p. 2774–2779, 2022. 3rd International Conference on Contemporary Advances in Mechanical Engineering. ISSN 2214-7853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.020>.

SI OCEAN. **Ocean Energy: Cost of Energy and Cost Reduction Opportunities**. [S.l.], 2013.

SILVA, L. S. P. **Design of an optimized fully submerged point absorber in Santa Catarina, Brazil**. 2017. Final year project – Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, Brazil.

STECH, J. L.; LORENZZETTI, J. A. The response of the South Brazil Bight to the passage of wintertime cold fronts. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 97, n. C6, p. 9507–9520, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1029/92JC00486>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/92JC00486>.

STEWART, R. H. Introduction to physical oceanography. Robert H. Stewart, 2008.

STOMMEL, H. A survey of ocean current theory. **Deep Sea Research (1953)**, v. 4, p. 149–184, 1957. ISSN 0146-6313. DOI: [https://doi.org/10.1016/0146-6313\(56\)90048-X](https://doi.org/10.1016/0146-6313(56)90048-X).

TABAK, J. **Solar and Geothermal Energy**. [S.l.]: Facts On File, 2009. (Compact research: Energy and the environment). ISBN 9780816070862.

TÊTU, A. Power Take-Off Systems for WECs. In: **Handbook of Ocean Wave Energy**. Edição: Arthur Pecher e Jens Peter Kofoed. Cham: Springer International Publishing, 2017. P. 203–220. ISBN 978-3-319-39889-1. DOI: 10.1007/978-3-319-39889-1_8.

THAPA, P.; MAINALI, B.; DHAKAL, S. Focus on Climate Action: What Level of Synergy and Trade-Off Is There between SDG 13; Climate Action and Other SDGs in Nepal? **Energies**, MDPI, v. 16, 1 jan. 2023. ISSN 19961073. DOI: 10.3390/en16010566.

THENNAKON, T.; HEWAGE, H.; SANDUNIKA, D.; PANAGODA, L.; SENARATHNA, W.; SULAKSHA, L.; WEERARATHNA, D.; JAYATHMA, W.; GAMAGE, D.; PERERA, M. Harnessing the Power of Ocean Energy A Comprehensive Review of Power Generation Technologies and Future Perspectives. **Journal of Research Technology Engineering**, MRP, v. 4, n. 3, p. 73–102, jul. 2023.

THORPE, T. W. **A Brief Review of Wave Energy**. [S.l.: s.n.], 1999.

<http://large.stanford.edu/courses/2011/ph240/yan1/docs/thorpe.pdf>. Acesso em: 25 set. 2023.

TURKENBURG, W. C.; BEURSKENS, J.; FAAIJ, A.; FRAENKEL, P.; FRIDLEIFSSON, I.; LYSEN, E.; MILLS, D.; MOREIRA, J. R.; NILSSON, L. J.; SCHAAP, A.; OUTROS. Renewable Energy Technologies. In: **World energy assessment: energy and the challenge of sustainability**. Edição: José Goldemberg. Nova York: United Nations Development Programme, 2000. P. 219–272. Acesso em: 19 set. 2025. ISBN 92-1-126126-0.

UNITED NATIONS ECONOMIC AND SOCIAL COMMISSION FOR WESTERN ASIA (ESCWA). **Tracking SDG 7: Energy Progress Report Arab Region**. Geneva, Switzerland, 2019. Disponível em:

https://www.unescwa.org/sites/default/files/pubs/pdf/energy-progress-report-arab-region-english_1.pdf. Acesso em: 19 set. 2024.

VANZWIETEN, J. H.; RAUCHENSTEIN, L. T.; LEE, L. An assessment of Florida's ocean thermal energy conversion (OTEC) resource. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 683–691, 2017. ISSN 1364-0321. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.043>.

VENUGOPAL, V.; TAY, Z. Y.; NEMALIDINNE, T. R. Numerical Modelling Techniques for Wave Energy Converters in Arrays. In: **Ocean Wave Energy Systems: Hydrodynamics, Power Takeoff and Control Systems**. Edição: Abdus Samad, S.A Sannasiraj, V. Sundar e Paresh Halder. Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 281–322. ISBN 978-3-030-78716-5. DOI: 10.1007/978-3-030-78716-5_9.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 3. ed. Amsterdam: Academic Press, 2011. v. 100. (International Geophysics Series). eBook ISBN: 9780123850232. ISBN 9780123850225.

WU, Z.; LEVI, C.; ESTEFEN, S. F. Wave energy harvesting using nonlinear stiffness system. **Applied Ocean Research**, v. 74, p. 102–116, 2018. ISSN 0141-1187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.02.009>.

XIROS, N. I.; DHANAK, M. R. Ocean Wave Energy Conversion Concepts. In: **Springer Handbook of Ocean Engineering**. Edição: Manhar R. Dhanak e Nikolaos I. Xiros. Cham: Springer International Publishing, 2016. P. 1117–1146. ISBN 978-3-319-16649-0. DOI: 10.1007/978-3-319-16649-0_45.

YANG, X.; PANG, J.; TENG, F.; GONG, R.; SPRINGER, C. The environmental co-benefit and economic impact of China's low-carbon pathways: Evidence from linking bottom-up and top-down models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 136, n. 100, none, None 2021. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110438.

YANG, X.; HAAS, K. A.; FRITZ, H. M. Evaluating the potential for energy extraction from turbines in the gulf stream system. **Renewable Energy**, v. 72, p. 12–21, 2014. ISSN 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.06.039>.

ZABIHIAN, F.; FUNG, A. S. Review of marine renewable energies: Case study of Iran. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 5, p. 2461–2474, jun. 2011. DOI: None.

ZHANG, Y.; ZHANG, D.; JIANG, H. A Review of Offshore Wind and Wave Installations in Some Areas with an Eye towards Generating Economic Benefits and Offering Commercial Inspiration. **Sustainability**, v. 15, n. 10, 2023. ISSN 2071-1050. DOI: 10.3390/su15108429.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CONSUMO E NÚMERO DE CONSUMIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA

Abaixo se encontram tabelas extraídas de material referencial, com importantes dados para os cálculos do trabalho.

TABELA 16 – CONSUMO E NÚMERO DE CONSUMIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA
SEGUNDO CLASSES EM PONTAL DO PARANÁ - 2022.

Classes	Consumo (Mwh)	Nº de Consumidores
Residencial	47.064,143	31.149
Industrial	1.934,129	309
Comercial, Serviços e Outras Atividades	15.916,977	1.575
Rural	40,712	16
Poder Público	1.850,503	105
Iluminação Pública	7.762,362	11
Serviço Público	4.104,358	42
Consumo Próprio	12,046	2
TOTAL	78.685,230	33.209

FONTE: Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social, 2024

TABELA 17 – CONSUMO E NÚMERO DE CONSUMIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA
SEGUNDO CLASSES EM MATINHOS - 2022.

Classes	Consumo (Mwh)	Nº de Consumidores
Residencial	61.563,890	38.236
Industrial	1.696,500	327
Comercial, Serviços e Outras Atividades	26.388,880	2.707
Rural	68,020	19
Poder Público	2.426,820	168
Iluminação Pública	10.883,430	3
Serviço Público	3.620,110	56
Consumo Próprio	3,760	2
TOTAL	106.651,400	41.518

FONTE: Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social, 2024