



VARIABILIDADE INTER- E INTRA-ANUAL DA ENERGIA DAS ONDAS DA COSTA PORTUGUESA E BRASILEIRA: UMA PERSPETIVA DE IMPLEMENTAÇÃO DO CONVERTOR NEARSHORE REEFS

AMANDA NUGENTT DOS SANTOS

julho de 2023

**VARIABILIDADE INTER- E INTRA-ANUAL DA ENERGIA DAS
ONDAS DA COSTA PORTUGUESA E BRASILEIRA: UMA
PERSPETIVA DE IMPLEMENTAÇÃO DO CONVERTOR
*NEARSHORE REEFS***

Amanda Nugentt dos Santos

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

VARIABILIDADE INTER- E INTRA-ANUAL DA ENERGIA DAS ONDAS DA COSTA PORTUGUESA E BRASILEIRA: UMA PERSPETIVA DE IMPLEMENTAÇÃO DO CONVERSOR *NEARSHORE REEFS*

Amanda Nugentt dos Santos

1220507

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Tiago André Abreu e coorientação do Doutor Mauro César Rabuski Garcia.

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e pelas oportunidades que tive, aos meus familiares e aos amigos que estiveram ao meu lado durante esse período, externo meus mais sinceros agradecimentos.

Em especial, agradeço às pessoas e instituições que colaboraram com esta dissertação:

- À minha instituição de origem, o Instituto Federal Sul-rio-grandense, pela oportunidade de participar do Intercâmbio de Dupla Titulação IFSUL-IPP/ISEP. Agradeço à toda a comunidade do IFSul e, em especial, ao Professor Doutor Pedro Carlos Hernandez Júnior, ao Professor Doutor Luís Ricardo Pedra Pierobon e ao Diretor de Assuntos Internacionais César Augusto Azevedo Nogueira;
- Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto pela acolhida. Agradeço, em especial, a todos os integrantes do Departamento de Engenharia Mecânica/Mestrado em Engenharia Mecânica pelos ensinamentos e pelas oportunidades de desenvolvimento;
- Ao meu orientador, Professor Doutor Tiago André Abreu, por sua disponibilidade, serenidade, apoio inestimável e por todos os ensinamentos compartilhados ao longo deste trabalho. Seu auxílio e suas contribuições foram fundamentais para o desenvolvimento deste estudo;
- Ao meu coorientador, Professor Doutor Mauro César Rabuski Garcia que, apesar da distância, fez-se presente, compartilhando sugestões valiosas para o desenvolvimento deste estudo;
- À Administração dos Portos de Sines e do Algarve pelos dados de boia. Agradeço, em especial, ao Professor Doutor José Paulo Lopes de Almeida pela articulação para a cedência desses dados e, bem como, pela sua disponibilidade e contribuições quanto à aplicação do conceito do dispositivo REEFS no âmbito deste trabalho;
- Ao Professor Doutor Rui Filipe Neves de Araújo Rego, pela contribuição quanto ao contato com uma empresa detentora de uma tecnologia de dispositivos conversores de energia das ondas. Além disso, agradeço pelos ensinamentos sobre a linguagem de programação Python, utilizada no âmbito da análise de dados desta dissertação;
- Ao Professor Doutor Luiz Alberto Oliveira Rocha por, no ano de 2019, ter abordado em sua palestra no Seminário de Inovação e Tecnologia do IFSul (INOVTEC) o aproveitamento da energia das ondas, tendo sido o meu primeiro contato com o tema;
- Ao Professor Doutor Yuri Theodoro Barbosa de Lima por, após a palestra do Professor Doutor Luiz Rocha, ter compartilhado títulos de livros e estudos que, hoje, serviram como base para o desenvolvimento desta dissertação;
- Agradeço pela oportunidade de desenvolver esta dissertação, que contribui para o projeto financiado pelo PRR – Plano de Recuperação e Resiliência e pelos fundos *NextGenerationEU* da Universidade de Aveiro, no âmbito da Agenda para a Inovação Empresarial “NEXUS: Pacto de Inovação – Transição Verde e Digital para Transportes, Logística e Mobilidade” (Projeto nº 53 com a candidatura C645112083-00000059).

Agradeço aos meus amigos pelo carinho, disponibilidade, amizade sincera, pelas conversas e por toda a ajuda que me deram para que eu enfrentasse as dificuldades que surgiram pelo caminho.

Por fim, agradeço à minha amada família. Aos meus avós, Arminda (*in memoriam*), José (*in memoriam*), Ery (*in memoriam*) e Celi, aos meus tios, tias, primas e às minhas cunhadas, Monalisa e Caroline, pelo apoio, carinho, amor e compreensão. No entanto, gostaria de externar meus mais sinceros agradecimentos e gratidão:

- Ao meu pai, Armando (*in memoriam*), por ter me inspirado e me apoiado durante toda a vida. Sua partida foi tão rápida e eu não pude me despedir, mas tenho certeza que, de onde estiver, você me ajudou a chegar até aqui. Te amo e te dedico este trabalho;
- À minha mãe, Elisabeth, por toda dedicação, amor e cuidado. Agradeço por, apesar da distância, estar sempre presente, torcendo por mim em todas as situações. Te amo e te dedico este trabalho;
- Ao Felipe, meu grande amor e companheiro, por estar ao meu lado independente das circunstâncias. Agradeço pela paciência, suporte e incentivo. Te amo "*more than words*" e te dedico este trabalho;
- Aos meus irmãos, Anderson e Manuela, por todas as histórias que contruímos juntos, por terem sido responsáveis por grande parte das minhas risadas e por todo o amor de sempre. Meu amor por vocês é incondicional;
- Aos meus sogros, Dionice e Eloj, por toda a ajuda que deram para que eu chegasse até aqui e por serem meus "pais do coração";
- Aos meus sobrinhos e afilhados, Lavínia, Aurora, Erick e Noah, pela alegria que me proporcionam e por terem me tornado "titia" e "dinda". Amo vocês!

RESUMO

O aproveitamento da energia das ondas se destaca como uma fonte renovável promissora devido à alta densidade de potencial energético associado e à capacidade de produção contínua ao longo do ano. No entanto, as tecnologias de aproveitamento ainda precisam ser desenvolvidas para que o recurso seja amplamente explorado. Este trabalho pretende analisar a viabilidade de implementação de um sistema de conversão de energia de ondas do mar em energia elétrica na região do Porto de Sines (Sines, Portugal) e em uma região do Brasil, considerando o potencial energético associado às ondas de ambas as localidades e os aspetos técnicos associados ao equipamento em estudo. Nesse contexto, este trabalho pretende analisar a viabilidade de implementação de um sistema de conversão de energia de ondas do mar em energia elétrica na região do Porto de Sines (Sines, Portugal) e em uma região do Brasil. Primeiramente, realiza-se a validação dos dados do modelo de reanálise ERA5 através de dados de boias de diferentes localidades. Os resultados obtidos através da comparação entre as duas fontes de dados revelam uma boa concordância, embora seja observado que o modelo tende a superestimar o potencial energético das ondas. Ainda, a partir desses resultados, define-se a região de Tramandaí (Rio Grande do Sul, Brasil) como objeto do segundo estudo de caso. O trabalho é conduzido de modo a estimar a variabilidade inter- e intra-anual do potencial energético das ondas de ambas as regiões em estudo, abrangendo um período de 81 anos (de 1940 a 2020). Para a região do Porto de Sines, estima-se uma potência média associada ao recurso das ondas de 20.42 kW/m, com uma estimativa da capacidade de produção anual de energia de 75.30 MWh/m, considerando a implementação do dispositivo REEFS. Com essa energia acumulada, estima-se uma receita anual de €11 295/m. Para a região de Tramandaí, obtém-se uma potência média de 12.59 kW/m e uma estimativa da capacidade de produção anual de energia de 61.47 MWh/m. Nesse caso, a receita anual estimada é de €9 220.50/m. Os resultados desta dissertação destacam a viabilidade técnica e económica referente à implementação do dispositivo REEFS nas regiões estudadas, contribuindo para o mapeamento do recurso e para o aprimoramento da especialidade.

PALAVRAS-CHAVE

Energia das ondas; Conversor de energia de ondas; REEFS; Dados de boia; ERA5.

ABSTRACT

The utilization of wave energy holds great promise as a renewable source, characterized by its high potential energy density and the capacity for year-round continuous production. However, further development of exploitation technologies is necessary to unlock the full potential of this resource. This study aims to assess the feasibility of implementing a wave energy conversion system in both the region of the Port of Sines (Sines, Portugal) and a region in Brazil. It examines the wave energy potential and technical considerations associated with the equipment under investigation. Firstly, the ERA5 reanalysis model data is validated using buoy data from various locations. The comparison between these two data sources demonstrates a satisfactory agreement, although the model tends to overestimate the wave energy potential. Based on these findings, the Tramandaí region (Rio Grande do Sul, Brazil) is selected as the subject of the second case study. The research evaluates the inter- and intra-annual variability of wave energy potential in both regions over an 80-year period (1940 to 2020). For the Port of Sines, the average power associated with the wave resource is estimated at 20.42 kW/m, with an annual energy production capacity estimate of 75.30 MWh/m when considering the implementation of the REEFS device. Achieving this cumulative value, an annual revenue of €11 295/m is estimated. For the Tramandaí region, an average power of 12.59 kW/m and an annual energy production capacity estimate of 61.47 MWh/m are obtained. In this case, the estimated annual revenue is €9 220.50/m. This study underscores the technical and economic viability of implementing the REEFS device in the studied regions, contributing to resource mapping and advancements in the field.

KEYWORDS

Wave energy; Wave Energy Converter; REEFS; Buoy data; ERA5 data.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XV
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XVII
1. INTRODUÇÃO	21
1.1. Enquadramento da dissertação	21
1.2. Objetivos	23
1.2.1. Objetivo geral.....	23
1.2.2. Objetivos específicos	23
1.3. Justificativa.....	23
1.4. Estrutura da dissertação	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1. Ondas do mar: formação, características e classificações.....	25
2.2. Conversores de energia das ondas: tecnologias e classificações	28
3. MÉTODOS E APLICAÇÃO	31
3.1. Dados de boias	31
3.2. Dados de reanálise	32
3.2.1. Validação do modelo	33
3.2.2. Estudos de caso.....	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1. Boias <i>versus</i> ERA5.....	39
4.1.1. Porto de Sines (Sines, Portugal).....	39
4.1.2. Florianópolis, Santa Catarina (Brasil).....	43
4.1.3. Pontal do Paraná, PR.....	48
4.1.4. Praia do Cassino, RS	53
4.1.5. Praia do Forte, BA	59
4.1.6. Rio de Janeiro, RJ	63
4.1.7. Tramandaí, RS	68
4.2. Caracterização da energia das ondas do Porto de Sines (Sines, Portugal).....	74
4.2.1. Variabilidade anual	74
4.2.2. Variabilidade mensal	75
4.2.3. Perspetivas para a instalação do WEC REEFS	77
4.3. Caracterização da energia das ondas de Tramandaí (Rio Grande do Sul, Brasil)	79
4.3.1. Variabilidade anual	79
4.3.2. Variabilidade mensal	80
4.3.3. Perspetivas para a instalação do WEC REEFS	81
5. CONCLUSÃO.....	85

5.1. Conclusões finais	85
5.2. Limitações e trabalhos futuros.....	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Terminologias associadas a uma onda (adaptado de: Boyle, 2012).....	25
Figura 2 – Dispositivos de energias de onda a) <i>Attenuator</i> ; b) <i>Point Absorber</i> ; c) <i>Oscillating Wave Surge Converter</i> ; d) <i>Oscillating Water Column</i> ; e) <i>Overtopping/Terminator Device</i> ; f) <i>Submerged Pressure Differential</i> ; g) <i>Bulge Wave</i> ; h) <i>Rotating Mass</i> (Aqua-RET, 2008, 2012).	28
Figura 3 – a) O protótipo do WEC REEFS; b) Demonstração do princípio de funcionamento do sistema; c) Representação gráfica do dispositivo; d) Representação gráfica do princípio de funcionamento (UC Business, 2023).....	30
Figura 4 – Pontos de estudo: Boias <i>versus</i> ERA5, correspondendo: a) Porto de Sines; b) Florianópolis; c) Pontal do Paraná; d) Praia do Cassino; e) Praia do Forte; f) Rio de Janeiro; e g) Tramandaí (ilustrações realizadas através da ferramenta Google Earth (https://www.google.com/intl/pt-PT/earth/)).	34
Figura 5 – Fluxograma geral da etapa de Métodos e Aplicação (ilustração realizada através da ferramenta <i>on-line</i> LucidChart (https://www.lucidchart.com/)).	38
Figura 6 – Gráficos de densidade comparando os dados da boia e do ERA5 (Porto de Sines) para a) <i>Hs</i> ; b) <i>Tm</i> ; e c) θm	39
Figura 7 – Comparação mensal entre os dados médios da boia e do ERA5 (Porto de Sines) para a) <i>Hs</i> ; b) <i>Tm</i> ; e c) θm	40
Figura 8 – Variação mensal dos dados médios da boia (Porto de Sines) para a) <i>Hs</i> ; b) <i>Tm</i> ; e c) θm . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).	41
Figura 9 – Variação mensal dos dados médios do ERA5 (Porto de Sines) para a) <i>Hs</i> ; b) <i>Tm</i> ; e c) θm . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).	42
Figura 10 – Mapa de calor exibindo a percentagem de contribuição de diferentes estados marítimos para a energia das ondas do Porto de Sines, considerando os dados de a) Boia; e b) ERA5.	43
Figura 11 – Gráficos de densidade comparando os dados da boia e do ERA5 (Florianópolis) para a) <i>Hs</i> ; b) <i>Tp</i> ; c) θm ; e d) <i>P</i>	44
Figura 12 – Comparação mensal entre os dados médios da boia e do ERA5 (Florianópolis) para a) <i>Hs</i> ; b) <i>Tp</i> ; c) θm ; e d) <i>P</i>	45
Figura 13 – Variação mensal dos dados médios da boia (Florianópolis) para a) <i>Hs</i> ; b) <i>Tp</i> ; c) θm ; e d) <i>P</i> . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).	47
Figura 14 – Variação mensal dos dados médios do ERA5 (Florianópolis) para a) <i>Hs</i> ; b) <i>Tp</i> ; c) θm ; e d) <i>P</i> . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).	47
Figura 15 – Mapa de calor exibindo a percentagem de contribuição de diferentes estados marítimos para a energia das ondas de Florianópolis, considerando os dados de a) Boia; e b) ERA5.	48
Figura 16 – Gráficos de densidade comparando os dados da boia e do ERA5 (Pontal do Paraná) para a) <i>Hs</i> ; b) <i>Tp</i> ; c) θm ; e d) <i>P</i>	49
Figura 17 – Comparação mensal entre os dados médios da boia e do ERA5 (Pontal do Paraná) para a) <i>Hs</i> ; b) <i>Tp</i> ; c) θm ; e d) <i>P</i>	50

Figura 18 – Variação mensal dos dados médios da boia (Pontal do Paraná) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).	52
Figura 19 – Variação mensal dos dados médios do ERA5 (Pontal do Paraná) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).	52
Figura 20 – Mapa de calor exibindo a percentagem de contribuição de diferentes estados marítimos para a energia das ondas de Pontal do Paraná, considerando os dados de a) Boia; e b) ERA5. 53	
Figura 21 – Gráficos de densidade comparando os dados da boia e do ERA5 (Praia do Cassino) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P	54
Figura 22 – Comparação mensal entre os dados médios da boia e do ERA5 (Praia do Cassino) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P	55
Figura 23 – Variação mensal dos dados médios da boia (Praia do Cassino) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).	57
Figura 24 – Variação mensal dos dados médios do ERA5 (Praia do Cassino) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).	57
Figura 25 – Mapa de calor exibindo a percentagem de contribuição de diferentes estados marítimos para a energia das ondas da Praia do Cassino, considerando os dados de a) Boia; e b) ERA5. ...	58
Figura 26 – Comparação mensal entre os dados médios da boia e do ERA5 (Praia do Forte) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P	59
Figura 27 – Comparação mensal entre os dados médios da boia e do ERA5 (Praia do Forte, BA) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P	60
Figura 28 – Variação mensal dos dados médios da boia (Praia do Forte) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).	62
Figura 29 – Variação mensal dos dados médios do ERA5 (Praia do Forte) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).	62
Figura 30 – Mapa de calor exibindo a percentagem de contribuição de diferentes estados marítimos para a energia das ondas da Praia do Forte, considerando os dados de a) Boia; e b) ERA5.	63
Figura 31 – Comparação mensal entre os dados médios da boia e do ERA5 (Rio de Janeiro) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P	64
Figura 32 – Comparação mensal entre os dados médios da boia e do ERA5 (Rio de Janeiro, RJ) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P	65
Figura 33 – Variação mensal dos dados médios da boia (Rio de Janeiro) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).	67
Figura 34 – Variação mensal dos dados médios do ERA5 (Rio de Janeiro) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).	67
Figura 35 – Mapa de calor exibindo a percentagem de contribuição de diferentes estados marítimos para a energia das ondas do Rio de Janeiro, considerando os dados de a) Boia; e b) ERA5.	68

Figura 36 – Comparação mensal entre os dados médios da boia e do ERA5 (Tramandaí) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P	69
Figura 37 – Comparação mensal entre os dados médios da boia e do ERA5 (Tramandaí, RS) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P	70
Figura 38 – Variação mensal dos dados médios da boia (Tramandaí) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).	72
Figura 39 – Variação mensal dos dados médios do ERA5 (Tramandaí) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).	72
Figura 40 – Mapa de calor exibindo a percentagem de contribuição de diferentes estados marítimos para a energia das ondas de Tramandaí, considerando os dados de a) Boia; e b) ERA5.	73
Figura 41 – Variação dos parâmetros H_s e T_p na região do Porto de Sines ao longo de 81 anos (de 1940 até 2020).	74
Figura 42 – Variação de P na região do Porto de Sines ao longo de 81 anos (de 1940 até 2020)... ..	74
Figura 43 – Valores mensais médios de a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P na região do Porto de Sines, considerando dados de 81 anos (de 1940 até 2020).	75
Figura 44 – Variação mensal dos dados médios de a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P na região do Porto de Sines, considerando dados de 81 anos (de 1940 até 2020). As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).	76
Figura 45 – Mapa de calor exibindo a percentagem de contribuição de diferentes estados de mar para a energia das ondas da região do Porto de Sines, considerando dados de 81 anos (de 1940 até 2020). Os dados sob a forma com contorno tracejado correspondem aos dados utilizados na etapa de estimativa do potencial energético do dispositivo.....	77
Figura 46 – Comparação entre o potencial de energia das ondas na região do Porto de Sines e o aproveitamento energético do dispositivo REEFS.....	78
Figura 47 – Aproveitamento energético do dispositivo REEFS ao longo dos meses na região do Porto de Sines.	78
Figura 48 – Variação dos parâmetros H_s e T_p na região de Tramandaí ao longo de 81 anos (de 1940 até 2020).	79
Figura 49 – Variação de P na região de Tramandaí ao longo de 81 anos (de 1940 até 2020).	79
Figura 50 – Valores mensais médios de a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P na região de Tramandaí, considerando dados de 81 anos (de 1940 até 2020).	80
Figura 51 – Variação mensal dos dados médios de a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P na região de Tramandaí, considerando dados de 81 anos (de 1940 até 2020). As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).	81
Figura 52 – Mapa de calor exibindo a percentagem de contribuição de diferentes estados de mar para a energia das ondas da região de Tramandaí, considerando dados de 81 anos (de 1940 até 2020). Os dados sob a forma com contorno tracejado correspondem aos dados utilizados na etapa de estimativa do potencial energético do dispositivo.....	82
Figura 53 – Comparação entre o potencial de energia das ondas na região de Tramandaí e o aproveitamento energético do dispositivo REEFS.....	82

Figura 54 – Aproveitamento energético do dispositivo REEFS ao longo dos meses na região de Tramandaí.....	83
---	----

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Dados das boias de referência (Etapa de validação de dados)	32
Tabela 2 – Coordenadas geográficas dos pontos do ERA5.	34
Tabela 3 – Coordenadas geográficas e profundidades dos pontos ERA5 em estudo	36

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

APS	Administração dos Portos de Sines e Algarve, S.A.
C3S	<i>Copernicus Climate Change Service</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono
DJF	Dezembro, Janeiro e Fevereiro
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ERA-Interim	<i>Third Generation Reanalysis</i>
ERA5	<i>Fifth Generation ECMWF Reanalysis for the Global Climate and Weather</i>
FCTUC	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
GEE	Gases de Efeito Estufa
IAV	<i>Inter-Annual Variability</i>
JJA	Junho, Julho e Agosto
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i>
MAV	<i>Mean Annual Variability</i>
NEXUS	Pacto de Inovação – Transição Verde e Digital para Transportes, Logística e Mobilidade
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OWC	<i>Oscillating Wave Converter</i>
OWSC	<i>Oscillating Wave Surge Converter</i>
PNEC	Plano Nacional de Energia e Clima
PRR	Plano de Recuperação e Resiliência
Rede Ondas	Rede Brasileira de Monitoramento de Ondas
REEFS	<i>Renewable Electric Energy From Sea</i>
RNC	Roteiro para a Neutralidade Carbónica
S	Sul
SI	Sistema Internacional de Unidades
UTC	Tempo Universal Coordenado
W	Oeste
WEC	<i>Wave Energy Converter</i>

Lista de Símbolos

g	Aceleração da gravidade	kg/m^2
H	Altura de onda	m
H_s	Altura significativa de onda	m
a	Amplitude de onda	m
ψ	<i>Bias</i>	
R^2	Coefficiente de determinação	

λ	Comprimento de onda	m
E	Densidade de energia	$Joules/m^2$
σ	Desvio padrão	
DP	Desvio padrão (nas representações gráficas)	
θ_m	Direção média de onda	$^\circ$
α	Espectro de onda	
E_{mensal}	Estimativa da produção mensal de energia	MWh/m
f	Frequência de onda	Hz
f_p	Frequência de pico	Hz
C_w	Largura de captura de frente de onda	m
ρ	Massa volúmica da água do mar	kg/m^3
M	Média (nas representações gráficas)	
$ \psi $	Módulo de <i>bias</i>	
n	Número de pares de dados na análise	
T_e	Período de energia da onda	s
T	Período de onda	s
T_p	Período de pico	s
T_m	Período médio de onda	s
P	Potência de onda	W/m
P_{REEFS}	Potência média absorvida pelo REEFS	kW/m
d	Profundidade	m
$RMSE$	Raiz Dos Erros Quadráticos Médios	
η	Rendimento	$\%$
c	Velocidade de propagação da onda	m/s

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento da dissertação

A busca por fontes de energia tem sido uma constante ao longo da história da humanidade. Atualmente, diante do aumento das necessidades energéticas, a busca por fontes renováveis de energia ganha ainda mais relevância. Torna-se crucial, portanto, o desenvolvimento de novas tecnologias para garantir uma matriz energética sustentável e com baixos níveis de emissões de gases de efeito estufa (GEE), como previsto no Acordo de Paris (United Nations, 2015).

Nesse contexto, Portugal apresentou a proposta de reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO₂) durante o período de 2021-2030 através do Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC) 2030 (Governo da República Portuguesa, 2019), além de estabelecer orientações através do Roteiro para a Neutralidade Carbónica (RNC) 2050 para reduzir entre 85% e 90% das emissões de GEE até 2050 (República Portuguesa - Ambiente e Transição Energética et al., 2019; Graça Gomes et al., 2020). Nesse cenário, os estudos sobre novas fontes de energia para compor a matriz energética portuguesa podem contribuir para o desenvolvimento de soluções alinhadas com essas metas.

No Brasil, país que já possui uma matriz energética com significativa participação de fontes renováveis, especialmente de fonte hídrica (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2022), os estudos sobre novas fontes de energia, como o aproveitamento da energia proveniente dos oceanos, podem contribuir para a ampliação da utilização dos recursos renováveis disponíveis na região e para a diversificação da matriz energética brasileira.

Uma matriz energética mista, baseada em diferentes recursos disponíveis, como solar, eólico, hídrico e de biomassa, promove a segurança energética, a equidade energética e a sustentabilidade ambiental (World Energy Council, 2022). Além disso, uma matriz energética diversificada e que aproveita grande parte dos recursos renováveis disponíveis no próprio país promove a redução da dependência energética. Portugal é um exemplo disso: o país, ao longo dos anos, reduziu sua dependência energética ao passo que aumentou o aproveitamento de fontes renováveis (Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN), 2022).

Tratando-se da energia contida nos oceanos, essa pode ter diferentes origens, sendo as mais relevantes a energia das marés, que é o resultado da influência gravitacional do Sol e da Lua; a energia das correntes marítimas, resultante dos gradientes de temperatura, salinidade e das marés; a energia térmica dos oceanos, consequência da radiação incidente; e a energia das ondas, gerada através das perturbações causadas pelo escoamento de ar sobre o mar (Cruz e Sarmiento, 2004).

Em relação ao aproveitamento da energia das ondas, considera-se essa uma tecnologia emergente e que se encontra em pleno desenvolvimento. Isso deve-se ao facto de a densidade de potência associada ao recurso exceder consideravelmente a densidade de potência associada a outras fontes renováveis de energia (Mahdy et al., 2023a). Além disso, o aproveitamento do recurso não gera resíduos, não emite CO₂, não promove poluição sonora e tem a capacidade de produzir energia de forma contínua ao longo de todo o ano (Samad et al., 2022).

No entanto, os elevados custos associados à implementação de conversores de energias de ondas (WEC – *Wave Energy Converter*) e a baixa maturidade das tecnologias são fatores que dificultam a exploração deste recurso (Shen et al., 2020). Para avaliar esse tópico, pode-se considerar o Custo

Nivelado de Energia, ou simplesmente LCOE (*Levelized Cost of Energy*), uma métrica amplamente utilizada para comparar o custo médio de diferentes tecnologias para geração de eletricidade, que considera os custos de investimento, operação, manutenção e outros custos relacionados à produção de energia (Tran e Smith, 2018). Analisando os níveis de LCOE calculados para diferentes tipos de energias renováveis, observa-se que os valores relacionados à energia das ondas e à energia das marés são os mais altos. Por outro lado, tecnologias mais maduras, *e.g.*, solar e eólica, apresentam níveis de LCOE mais baixos (Shen et al., 2020). Portanto, o desenvolvimento de novas tecnologias de WEC e os estudos para reduzir os custos associados à implementação são de extrema importância.

Relativamente às tecnologias de conversão, os dispositivos conversores podem ser classificados de acordo com seu princípio de funcionamento e, ainda, de acordo com o local de instalação quanto à sua proximidade à costa (*onshore*, *nearshore* e *offshore*). Quanto aos desafios associados à implementação dos WEC, os principais são relacionados à exposição a forças extremas, corrosão, fadiga e dificuldades de acesso para manutenção, coleta de dados e transmissão de energia para a costa (Waters e Edita Västra Aros, 2008). No que respeita a esses últimos aspetos, esses desafios são maiores tratando-se de dispositivos ao largo (*offshore*), tornando vantajosa a implementação de dispositivos perto da costa (*nearshore*) e na linha costeira (*onshore*).

Nesse cenário, uma equipa do Laboratório de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC) desenvolveu um equipamento *nearshore*, denominado *Renewable Electric Energy From Sea* (REEFS) e que, atualmente, se encontra protegido por patente internacional (n.º EP3078844) (UC Business, 2023).

Em relação à caracterização do recurso das ondas para avaliação da aplicabilidade destes conversores, é necessário obter dados abrangentes dos principais parâmetros de agitação marítima da região de interesse. Esses dados podem ser obtidos por medições *in situ* (através de boias). No entanto, o período de coleta dessas boias é muitas vezes limitado.

Para realizar uma análise mais abrangente, é necessário contar com conjuntos de dados que englobem períodos mais extensos do que aqueles obtidos através das boias. Diante dessa necessidade, uma estratégia é recorrer aos modelos de reanálise, *e.g.*, ERA5 (modelo de reanálise de quinta geração do ECMWF). Em particular o ERA5 é um modelo que disponibiliza conjuntos de dados de diversas variáveis climáticas com uma cobertura temporal de 1940 até ao presente (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels>).

Considerando esse panorama, nesta dissertação será desenvolvido um estudo de caso para a região do Porto de Sines (Sines, Portugal), onde se prevê implementar o WEC REEFS. Procurar-se-á realizar uma estimativa do aproveitamento energético obtido nessa região de estudo. Além disso, selecionar-se-á um outro estudo de caso no Brasil, com o objetivo de também avaliar o potencial de se implementar este conversor de ondas nessa região. Para ambos os casos de estudo, avaliam-se as variabilidades do potencial energético ao longo de oito décadas (de 1940 a 2020).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Este trabalho pretende analisar a viabilidade de implementação de um sistema de conversão de energia de ondas do mar em energia elétrica na região do Porto de Sines (Sines, Portugal) e em uma região do Brasil, considerando o potencial energético associado às ondas de ambas as localidades e os aspetos técnicos associados ao equipamento em estudo.

1.2.2. Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, definiu-se um conjunto de objetivos específicos a realizar. Em particular, pretende-se:

- Validar os dados do modelo de reanálise ERA5 através de dados de boias;
- Estimar a variabilidade inter- e intra-anual do potencial energético das ondas de ambas as regiões;
- Avaliar tendências dos parâmetros de agitação marítima que influenciam mudanças no potencial energético das duas localidades.

1.3. Justificativa

Frente à crescente demanda de utilização de energia elétrica, os estudos relativos à geração de energia através de fontes renováveis têm grande relevância no âmbito da sustentabilidade e da economia. No âmbito da energia contida nos oceanos, os estudos sobre o aproveitamento da energia das ondas trazem ao foco uma fonte de energia com uma alta densidade de potência (Mahdy et al., 2023a).

Em relação à instalação dos dispositivos conversores de energia das ondas em energia elétrica, estudos que analisem a variabilidade do potencial energético e o comportamento dos parâmetros de agitação marítima em diferentes períodos são relevantes e podem auxiliar na perspetiva de implementação de um sistema em uma região específica.

Nesse contexto, o modelo de reanálise ERA5 possibilita a análise de dados de ondas estimados de 1940 até ao presente. Para validar o modelo para uma determinada região em estudo, a utilização de dados *in situ*, obtidos através de medições por boias, é uma estratégia que permite correlacionar os dados medidos com os estimados. Esses dados, uma vez validados, possibilitam a extrapolação para períodos que não existam medições por boias.

Considerando essa extrapolação, é possível estudar as variações associadas ao recurso das ondas em escala inter-anual (entre anos) e em escala intra-anual (dentro de um mesmo ano), bem como avaliar o potencial energético de diferentes regiões, visualizando as influências e as variações ao longo dos anos.

1.4. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos principais. O primeiro capítulo é a Introdução, onde são apresentados o contexto e os objetivos do trabalho. Nesse capítulo encontra-se, ainda, a justificativa para a realização do estudo e esse subcapítulo que descreve a estrutura do documento.

O segundo capítulo é a Revisão Bibliográfica, que abrange os fundamentos teóricos relacionados ao tema desta dissertação. Nesse capítulo também são apresentados aspectos sobre as ondas do mar, incluindo sua formação, características e classificações. Além disso, são apresentadas as tecnologias e classificações dos conversores de energia das ondas.

O terceiro capítulo é dedicado aos Métodos e Aplicação. Nesse capítulo são detalhados os dados utilizados no estudo, incluindo os dados de boias e os dados de reanálise obtidos a partir do modelo ERA5. Nesse capítulo também são descritos os passos adotados para a etapa de validação do modelo ERA5 e são apresentados os estudos de caso realizados no âmbito desta dissertação.

O quarto capítulo é o de Resultados e Discussão, onde são apresentados os principais resultados obtidos neste estudo. Inicialmente, são apresentados os resultados obtidos através das comparações entre os dados das boias e os dados do ERA5. Em seguida, são apresentados os resultados dos estudos de caso, onde são discutidas as suas respectivas variabilidades inter- e intra- anuais e realiza-se a perspectiva para implementação do WEC REEFS em ambas as localidades.

O quinto e último capítulo é a Conclusão, onde são apresentadas as conclusões gerais do estudo. Nesse capítulo, são resumidos os principais achados e discutidas as implicações dos resultados. Além disso, são apresentadas recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Ondas do mar: formação, características e classificações

Uma onda pode ser definida como uma perturbação em um meio sem que haja transporte físico do mesmo. No oceano, as ondas são geradas pela transferência de energia através da água e são causadas, principalmente, pelos ventos que atuam sobre a superfície do mar. Essas ondas são chamadas de vagas (ou *wind sea*). Há, ainda, as ondas conhecidas como *swell* (ou ondulações). Essas ondas são resultado do vento ocorrido em um local e tempo diferentes, ou seja, não estão mais sobre a influência dos ventos que a causaram. Sendo assim, aquando da sua propagação, elas apresentam um comportamento mais regular e tendem a se agrupar em campos de ondas, apresentando alturas, comprimentos e períodos semelhantes (Wright et al., 1999; Boyle, 2012).

O campo de ondas de superfície consiste na combinação de ondas com diferentes características e é conhecido como espectro de ondas bidimensional. Esse espectro pode ser decomposto, então, em ondas *wind sea* e em *swell*. As ondas causadas pelos ventos são resultado do fenômeno conhecido como “*fetch*”, que se refere à distância pela qual o vento sopra sobre uma área de água, formando as chamadas ondas de superfície. As ondas de superfície ocorrem na interface atmosfera-oceano devido ao atrito gerado entre o escoamento de ar e a superfície do mar (Wright et al., 1999, 1999; Boyle, 2012).

Nesse sentido, embora nem todos os comportamentos associados aos oceanos e às ondas sejam completamente compreendidos, é possível assumir algumas características básicas das ondas com base em um modelo idealizado (Wright et al., 1999) (Figura 1).

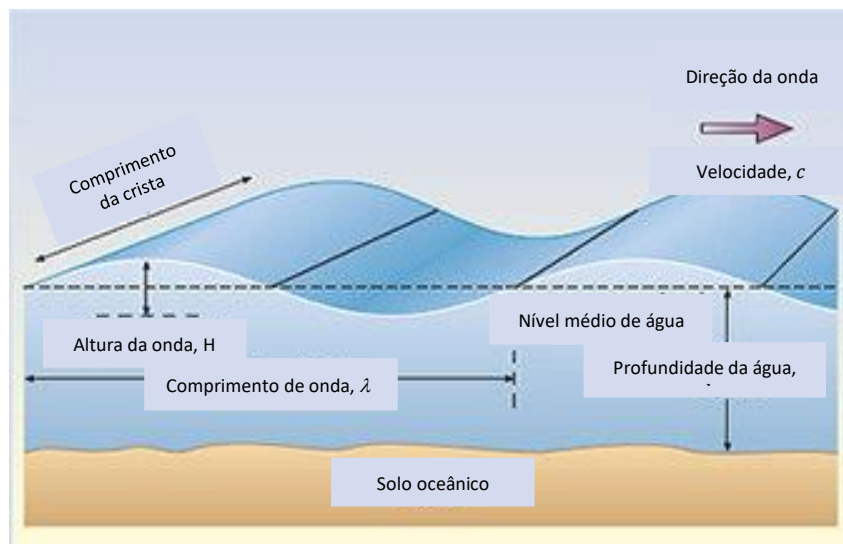


Figura 1 – Terminologias associadas a uma onda (adaptado de Boyle, 2012).

Quanto às variáveis que caracterizam uma onda, destacam-se:

- A altura de onda, H [m], que é a diferença entre uma crista e uma cava de onda;

- A amplitude de onda, a [m], que é a metade da altura da onda ($a = H/2$);
- O comprimento de onda, λ [m], que é a distância entre duas cristas (ou cavas) sucessivas;
- A inclinação de onda, definida como H/λ ;
- O período de onda, T [s], que é o intervalo de tempo entre duas cristas (ou duas cavas) consecutivas que passam por um ponto fixo;
- A frequência de onda, f [Hz], que representa o número de cristas (ou cavas) que passam por um ponto fixo em um segundo ($f = 1/T$);
- A velocidade de propagação da onda, c [m/s] ($v = \lambda/T$).

Pode-se observar que uma onda, ao se propagar com uma velocidade específica, c , e passar por um ponto fixo, percorrerá uma distância igual ao seu comprimento, λ , em um intervalo de tempo igual ao seu período, T .

Ainda, as ondas podem ser classificadas em diferentes tipos de oscilação superficial com base em sua energia, comprimento e período. As ondas capilares são aquelas de menor escala, seguidas pelas ondas capilares-de-vento. Em escalas muito maiores encontram-se, *e.g.*, as ondas de maré ou os “*storm surges*”, que são grandes fluxos de água gerados por fortes ventos durante furacões e avançam em direção à costa (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2023).

Além da classificação de acordo com a oscilação superficial, as ondas podem ser classificadas considerando a localização de origem e propagação. As ondas de águas profundas ocorrem em regiões cuja profundidade, d , é aproximadamente $d = \lambda/2$, seguidas das ondas de profundidade intermediária, que ocorrem em regiões cuja profundidade varia entre $d = \lambda/2$ e $d = \lambda/4$. Ao se aproximar da costa, ocorrem as ondas de águas rasas (ou pouco profundas), quando a profundidade, d , é menor do que $\lambda/4$.

A densidade de energia, E , associada à uma onda pode ser calculada utilizando a Equação (1)

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2, \quad (1)$$

em que E é a energia da onda [Joules/m²], ρ é a massa volúmica da água do mar, considerada $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$, e g é a aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$).

A potência da onda, P , pode ser calculada utilizando a Equação (2),

$$P = \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T, \quad (2)$$

em que P é a potência da onda [W/m] que corresponde ao fluxo de energia, ou seja, à razão de transferência de energia por unidade de comprimento da crista da onda.

No entanto, devido à complexidade do comportamento marítimo, resultante da superposição de componentes e da associação de ondas, uma maneira de representar os estados de mar é através

de parâmetros integrados (Young, 1999). Um dos principais parâmetros utilizados é a altura significativa da onda, H_s [m], que é definida como o terço superior das alturas das ondas registadas em um período de análise e que pode ser calculada utilizando a Equação (5),

$$H_s = \sqrt[4]{\iint E(f, \theta) df d\theta}, \quad (3)$$

em que $E(f, \theta)$ é o espectro bidimensional, que considera *wind sea* e *swell*, f é a frequência, e θ a direção.

Outro parâmetro é o período de pico, T_p [s], que é definido como o período das ondas que possuem mais energia e que pode ser calculado utilizando a Equação (4),

$$T_p = \frac{1}{f_p}, \quad (4)$$

em que f_p é a frequência de pico [Hz].

A direção média de onda, θ_m [°], é um outro parâmetro que define a direção dominante da origem das ondas.

Para realizar uma estimativa do potencial energético em águas profundas, pode-se calcular a potência de uma onda, P , utilizando a Equação (5),

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \approx 0.491 H_s^2 T_e, \quad (5)$$

em que o parâmetro T_e representa o período de energia da onda [s]. No entanto, esse parâmetro é raramente indicado com precisão e suas incertezas podem ser consideradas com base na forma do espectro de onda, α , de modelos espectrais paramétricos (*e.g.* espectro Pierson-Moskowitz e JONSWAP) (Ahn, 2021; Ribeiro et al., 2020).

Considerando o espectro Pierson-Moskowitz, o parâmetro α pode variar de 0.86 a 1. O aumento em direção à unidade está associado com a diminuição da largura espectral (Ahn e Neary, 2020; Cornett, 2008; Pastor e Liu, 2016). Adotando-se um valor conservador de α igual a 0.86 para efeitos do cálculo de energia, o parâmetro T_e pode ser calculado utilizando a Equação (6) (Sierra et al., 2013),

$$T_e = \alpha T_p = 0.86 T_p, \quad (6)$$

em que T_e é o período de energia da onda [s], α é o espectro de onda, e T_p é o período de pico da onda [s]. Esta relação foi considerada neste trabalho, por uma questão de simplificação.

2.2. Conversores de energia das ondas: tecnologias e classificações

Os WEC são equipamentos que têm como objetivo captar e transformar a energia contida nas ondas do mar em energia elétrica. Existem diversos tipos de equipamentos que possuem diferentes tecnologias e diferentes princípios de funcionamento. De um modo geral, podem ser classificados em oito categorias principais (Figura 2).

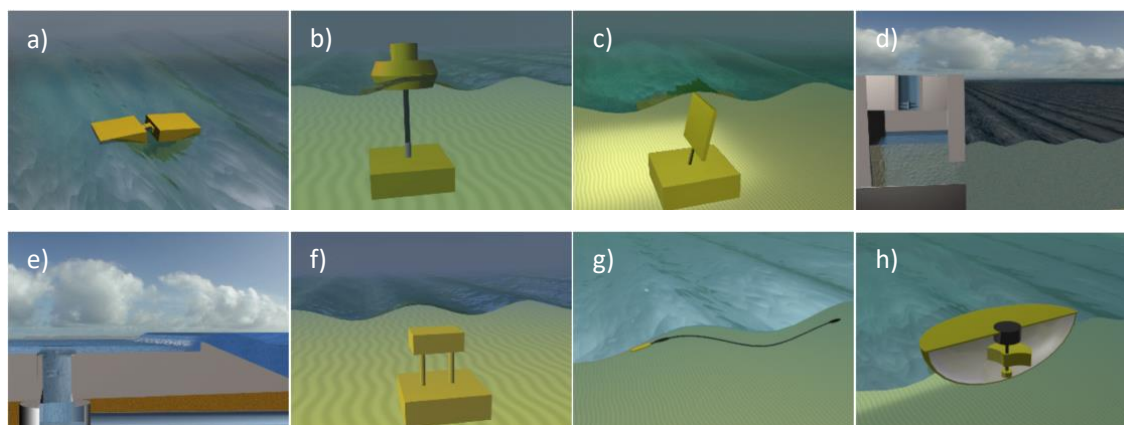


Figura 2 – Dispositivos conversores de energia das ondas: a) *Attenuator*; b) *Point Absorber*; c) *Oscillating Wave Surge Converter*; d) *Oscillating Water Column*; e) *Overtopping/Terminator Device*; f) *Submerged Pressure Differential*; g) *Bulge Wave*; h) *Rotating Mass* (Aqua-RET Project, 2012).

Em conformidade com a Figura 2, estes dispositivos podem ser definidos como:

- a) Conversor Articulado Alongado (*Attenuator*) - é um dispositivo flutuante que capta a energia do movimento das ondas através de dois braços articulados que o compõem. Ele é posicionado paralelamente à direção da onda e oscila à medida que as ondas o atravessam (Figura 2a).
- b) Conversor Linear de Absorção Pontual (*Point Absorber*) - é um dispositivo flutuante que absorve a energia das ondas em todas as direções. Ele se move sobre a superfície da água, aproveitando o movimento das ondas para gerar eletricidade (Figura 2b).
- c) Conversor Articulado de Translação (*Oscillating Wave Surge Converter – OWSC*) - atua submerso e tem um comportamento semelhante ao de um pêndulo. Seus movimentos são impulsionados pelas oscilações das ondas, que contribuem para a geração de eletricidade (Figura 2c).
- d) Conversor do tipo Coluna de Água Oscilante (*Oscillating Wave Converter – OWC*) - é uma estrutura parcialmente submersa e oca que possui uma coluna de ar no topo da coluna de água. Conforme as ondas movimentam a água, a coluna sobe e desce, comprimindo e descomprimindo a coluna de ar. Esse movimento do ar é utilizado para gerar eletricidade

- por meio de uma turbina que, geralmente, tem a capacidade de rodar independentemente da direção do fluxo de ar (Figura 2d).
- e) Conversor por Galgamento (*Overtopping/Terminator Device*) - captura a água das ondas, à medida que elas ocorrem, para um reservatório. Quando a água é devolvida ao mar, ela passa por uma turbina que converte o fluxo em eletricidade (Figura 2e).
 - f) Dispositivo Submerso de Diferença de Pressão (*Submerged Pressure Differential*) - se movimenta de acordo com a variação de pressão causada pelo movimento das ondas. Essas variações são aproveitadas para gerar energia (Figura 2f).
 - g) Dispositivo Anaconda (*Bulge Wave*) - é um equipamento flutuante, ancorado no fundo do mar, que consiste em um tubo de borracha preenchido com água, com uma extremidade aberta posicionada em direção às ondas. À medida que as ondas atingem o dispositivo, a água entra no tubo e cria uma protuberância, a qual se move ao longo do equipamento devido à variação de pressão. Essa protuberância em movimento gera um fluxo de água, que passa por uma turbina localizada na outra extremidade do dispositivo, gerando eletricidade (Figura 2g).
 - h) Dispositivo de Massa Rotativa (*Rotating Mass*) - utiliza a oscilação do equipamento juntamente às ondas para captar energia. O dispositivo é composto por uma forma de rotação (*e.g.*, um peso excêntrico ou um giroscópio), capaz de girar em torno de um eixo central, que é conectada a um gerador de eletricidade (Figura 2h).

Os WEC podem, também, ser classificados de acordo com a sua área de instalação. Os dispositivos *onshore* são aqueles instalados na linha costeira, seguidos dos dispositivos *nearshore*, que são instalados em regiões cuja profundidade está entre 10 e 25 m. Os dispositivos *offshore* são instalados ao largo, ou seja, em regiões cuja profundidade é maior do que 40 m (López et al., 2013).

Os dispositivos *offshore* são os que possuem o maior grau de aproveitamento do recurso. Os equipamentos *nearshore* e *onshore*, por sua vez, possuem um aproveitamento reduzido. Isso ocorre devido a redução da densidade de energia associada às ondas em regiões costeiras, resultado da interação com o fundo do mar que resulta numa dissipação de energia à medida que as profundidades diminuem (Cruz e Sarmiento, 2004).

No entanto, a implementação de dispositivos *nearshore* e *onshore* oferecem vantagens significativas. Uma dessas vantagens está relacionada às condições marítimas, que são menos adversas em regiões mais próximas à costa, em comparação a regiões de águas mais profundas. Além disso, a instalação e a manutenção de equipamentos instalados próximos à costa são menos desafiadoras. Estes são de fácil instalação e manutenção (não exigem ancoragens de águas profundas nem grande preocupação com o transporte da energia até à costa), possibilitando a redução dos custos associados ao sistema de transmissão de energia elétrica (Mahdy et al., 2023b).

No campo dos equipamentos *nearshore* encontra-se o WEC REEFS (Figura 3), o qual foi considerado neste trabalho. Esse é um dispositivo modular que procura utilizar tecnologias existentes, tais como as turbinas de ultrabaixa queda aplicadas nos aproveitamentos mini-hídricos, para aproveitar a energia das ondas. Como resultado de oito anos de investigação, o conceito encontra-se provado. No entanto, antevêm-se otimizações, testes em escalas maiores e implementação de um projeto piloto no mar para que seja atingida a fase de comercialização da tecnologia (UC MAR, 2022).

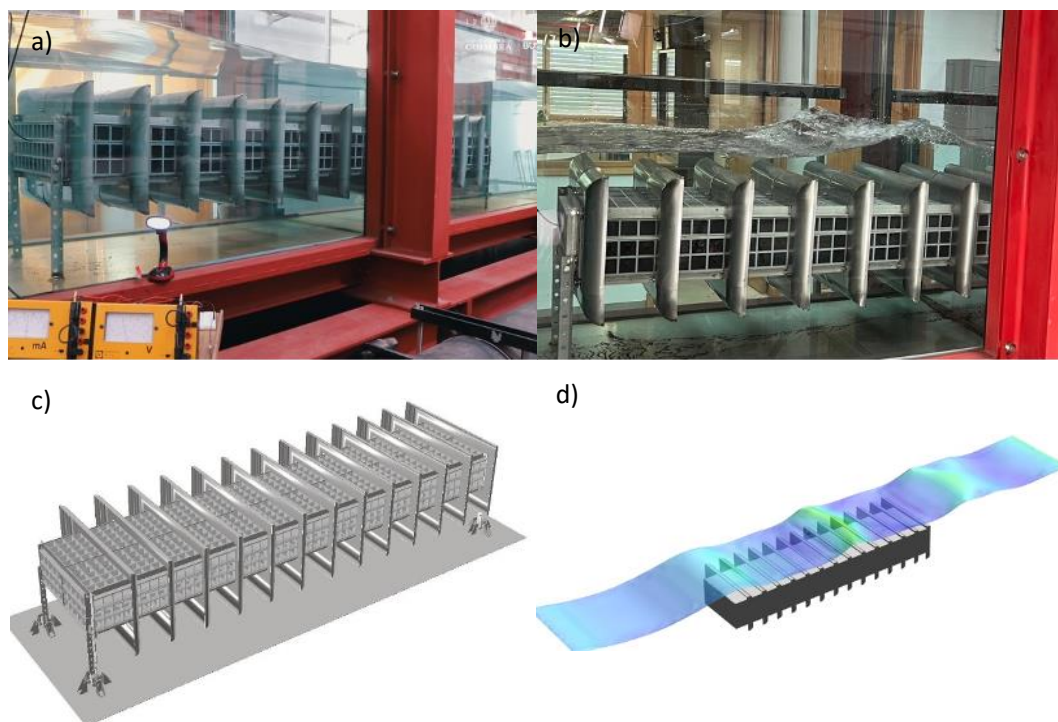


Figura 3 – a) O protótipo do WEC REEFS; b) Demonstração do princípio de funcionamento do sistema; c) Representação gráfica do dispositivo; d) Representação gráfica do princípio de funcionamento (UC Business, 2023).

O princípio de funcionamento do dispositivo baseia-se na transformação do movimento alternado das ondas do mar em um fluxo de água contínuo no interior do conversor. Esse fluxo criado entre a crista e a cava das ondas aciona a turbina que o compõe. É, pois, possível migrar a tecnologia utilizada nas mini-hídricas para o mar e aplicá-la precisamente para aproveitar os (pequenos) desníveis criados pelas ondas. Além do aproveitamento da energia contida nas ondas do mar, a implementação do REEFS pode contribuir para mitigar a erosão costeira, uma vez que sua operação é submersa, podendo funcionar como um recife artificial. Dessa maneira, o dispositivo pode induzir a rebentação precoce das ondas, retirando alguma parte da energia associada antes que atinjam a linha costeira. Outra vantagem do seu funcionamento submerso é que não promove impacto paisagístico. O WEC é instalado sobre pilares, igualmente permitindo que processos marinhos ocorram livremente (UC Business, 2023).

3. MÉTODOS E APLICAÇÃO

3.1. Dados de boias

A boia fundeada no Porto de Sines, localizado em Sines (Portugal), foi uma das fontes de dados mais importantes utilizadas neste estudo. Isso porque há interesse em instalar um modelo reduzido do WEC REEFS nessa região no âmbito do projeto NEXUS (*Digital Green Logistics*), financiado pelo Plano de Recuperação e Resiliência português (PRR), 2022-2025 (<https://nexuslab.pt>). Este projeto pretende promover um Pacto de Inovação e Transição Digital e Ecológica em torno das redes logísticas e de transportes, focado em inovar, desenvolver, demonstrar e iniciar a valorização e exploração de produtos e serviços inovadores, com forte potencial de exportação, e que abordem os principais desafios e lacunas identificados para a logística em Portugal. Trata-se de um consórcio liderado pela APS – Administração dos Portos de Sines e Algarve, S.A.

No âmbito do projeto NEXUS, os dados da boia do Porto de Sines foram disponibilizados em formato .CSV, reportando aos anos 2017 a 2022. Esses dados foram visualizados e manipulados por meio do *software Excel e Python*. A boia é capaz de medir diferentes parâmetros ambientais e de agitação marítima, sendo utilizados neste estudo os parâmetros H_s , T_m (período médio) e θ_m . Nesse caso, especificamente, considerou-se o parâmetro T_m (ao invés de T_p), por ser uma característica da boia coletar os valores de período médio das ondas.

Houve também o interesse em realizar a caracterização de uma região da costa brasileira, a fim de avaliar a viabilidade de implementação do WEC REEFS também nesse país. Com o objetivo de obter dados para realizar essa caracterização, buscou-se por bancos de dados de acesso gratuito que disponibilizassem informações de agitação marítima no Brasil. Nesse âmbito, encontrou-se o projeto Rede Ondas (Rede de Monitoramento de Ondas Águas Rasas) (Rede de Monitoramento de Ondas em Águas Rasas (Rede Ondas), 2021). Esse projeto, atualmente, encontra-se desativado, no entanto, os dados de medições de boias fundeadas em diferentes regiões da costa brasileira estão disponíveis *on-line*, gratuitamente (<https://redeondas.furg.br/pt/>).

Os ficheiros disponibilizados pela Rede Ondas foram descarregados em formato .XLSX e, posteriormente, foram visualizados utilizando o *software Excel e Python*. Os ficheiros contêm dados dos principais parâmetros de agitação marítima (H_s , T_p e θ_m).

Após a avaliação dos dados disponíveis na Rede Ondas, foram selecionadas as boias que seriam estudadas nesta dissertação (Tabela 1). Das dez boias disponíveis, foram excluídas quatro boias devido à falta considerável de dados. Por fim, as seis boias brasileiras selecionadas foram as de Florianópolis (Santa Catarina), Pontal do Paraná (Paraná), Praia do Cassino (Rio Grande do Sul), Praia do Forte (Bahia), Rio de Janeiro (Rio de Janeiro) e Tramandaí (Rio Grande do Sul).

A Tabela 1 apresenta informações relevantes sobre cada uma das boias utilizadas nesta dissertação (*e.g.* coordenadas geográficas, profundidade de fundeio, intervalo entre aquisições de dados, período de análise considerado e o tipo de boia).

Tabela 1 – Dados das boias de referência (Etapa de validação de dados).

Referência	Latitude/ Longitude	Profundidade (m)	Resolução temporal	Período (mês/ano)	Tipo de boia
Porto de Sines	37.93°N/ 08.93°W	97	1 hora	01/17–10/22	
Florianópolis	27.64°S/ 48.20°W	-	1 hora	03/02–04/03; 06/03–09/03; 05/04–07/04; 10/04–05/05.	-
Pontal do Paraná	25.67°S/ 48.33°W	16	1 hora	12/13–07/15	Boia meteo- ocenográfica WatchKeeper™
Praia do Cassino	32.34°S/ 51.90°W	7	1 hora	05/05–08/05; 01/16–10/16.	Ondógrafo direcional “waverider”
Praia do Forte	12.61°S/ 37.98°W	32	2014: 4 horas. 2015–2019: 3 horas.	11/14–02/19	Equipamento ADCP
Rio de Janeiro	22.97°S/ 43.13°W	20	1 hora	08/15–06/16	-
Tramandaí	30.02°S/ 50.13°W	11	1962–1963: 12 horas. 2006–2007; 2013–2016: 1 hora.	11/62–06/63; 08/63–09/63; 11/06–09/07; 12/13; 01/14– 03/14; 06/14– 12/14; 01/15– 05/15; 01/16– 07/16.	Equipamento AWAC

Através da Tabela 1 pode-se observar que, em alguns casos, o período de dados das boias é inferior a um ano (*e.g.*, Rio de Janeiro), sendo a boia de Tramandaí que, não obstante haver períodos significativos em que não se obtêm medições, apresenta a maior extensão temporal de dados (entre 1962 e 2016).

3.2. Dados de reanálise

Para realizar a análise intra- e interanual proposta nesta dissertação, é necessário utilizar dados de períodos mais extensos do que aqueles obtidos através das boias. Ainda, além do período de coleta limitado dos dados *in situ*, é usual a presença de lacunas de dados de boias. Algumas destas falhas são causadas por necessidade de manutenções na estação de coleta de dados, por avarias ou por exposição a condições climáticas extremas (Mendes e Oliveira, 2021).

Diante dessa necessidade, uma boa estratégia é recorrer a modelos de reanálise, que oferecem conjuntos de dados abrangentes, com extensa cobertura temporal. Dentre os modelos de reanálise que possuem dados de ondas, existem, *e.g.*, a) o modelo WaveWatch-III (desenvolvido pela NOAA, <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>), que disponibiliza dados de 1949 até ao presente, com uma resolução espacial de 1.25° de longitude e 1° de latitude e uma resolução

temporal de três horas; e b) o modelo de reanálise ERA5 (desenvolvido pelo C3S, (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels>), que disponibiliza dados de 1940 até o presente, com uma resolução atmosférica de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, uma resolução para dados de ondas de $0,50^\circ \times 0,50^\circ$ e resolução temporal horária (Hersbach et al., 2018).

No contexto deste estudo, optou pela utilização do modelo de reanálise ERA5, devido a boa resolução espacial e temporal do modelo. Além disso, a possibilidade de obtenção de dados de 1940 até o presente (uma década a mais, comparando o ERA5 ao WaveWatch-III), permite uma visualização abrangente do recurso e de como os parâmetros de agitação vêm se comportando ao longo de oito décadas. Adicionalmente, Silva et al., 2022 observaram uma correlação muito boa entre os dados da boia de Leixões situada no Norte de Portugal e os dados de reanálise do ERA5 para esse local, evidenciando a sua aplicabilidade para o projeto de energia de ondas HiWave-5.

O ERA5 é um modelo de reanálise de quinta geração desenvolvido pelo *Copernicus Climate Change Service* (C3S) no *European Centre For Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). O modelo combina dados observacionais (satélite e *in situ*) a técnicas de previsão, permitindo estimar as condições de diversas variáveis climáticas mundiais associadas à atmosfera, à superfície terrestre e aos oceanos. Considerando os dados de onda, o modelo de quinta geração, que substitui o ERA-Interim, apresenta um melhor ajuste para dados de altura de onda (Hersbach et al., 2020).

Os dados de reanálise que foram utilizados nesta dissertação foram descarregados em formato .NetCDF, sendo depois convertidos para o formato .csv através do *software Panoply*.

3.2.1. Validação do modelo

A validação do desempenho do modelo de reanálise é uma etapa importante para garantir a confiabilidade dos dados utilizados. Nesta dissertação, a validação foi realizada comparando os dados do modelo com os dados de boia obtidos através das medições *in situ*.

Os dados do ERA5 que foram utilizados nessa etapa de validação foram alinhados às características das boias (coordenadas geográficas, parâmetros de agitação marítima, resolução temporal e período de análise) (Tabela 1). Assim, para a região do Porto de Sines, foram descarregados dados horários de H_s (*significant height of combined wind waves and swell*), T_m (*mean wave period*) e θ_m (*mean wave direction*). Para as regiões do Brasil, obtiveram-se dados horários de H_s (*significant height of combined wind waves and swell*), T_p (*peak wave period*) e θ_m (*mean wave direction*).

Nessa etapa, as coordenadas geográficas utilizadas como *input* para o ERA5 foram determinadas como sendo as dos pontos mais próximos às boias e ajustadas para corresponder à resolução espacial do modelo ($0,50^\circ \times 0,50^\circ$), conforme apresentado na Tabela 2. Essas coordenadas do ERA5, bem como as coordenadas das boias, correspondem às localizações assinaladas na Figura 4.

Tabela 2 – Coordenadas geográficas dos pontos do ERA5.

Referência	Latitude/Longitude
Porto de Sines	38.00°N/-09.00°W
Florianópolis	-27.50°S/-48.00°W
Pontal do Paraná	-25.50°S/-48.00°W
Praia do Cassino	-32.50°S/-52.00°W
Praia do Forte	-13.00°S/-38.00°W
Rio de Janeiro	-23.00°S/-43.00°W
Tramandaí	-30.00°S/-49.50°W

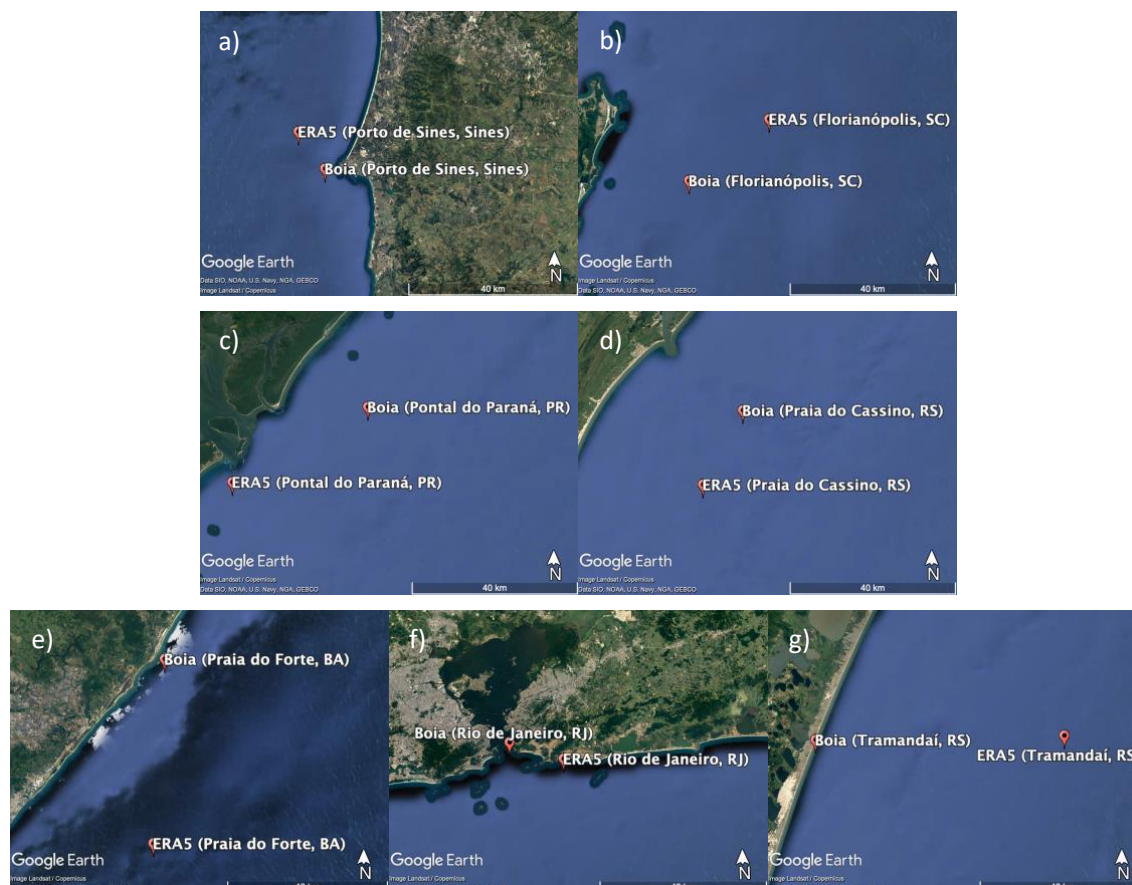


Figura 4 – Pontos de estudo: Boias *versus* ERA5, correspondendo: a) Porto de Sines; b) Florianópolis; c) Pontal do Paraná; d) Praia do Cassino; e) Praia do Forte; f) Rio de Janeiro; e g) Tramandaí (ilustrações realizadas através da ferramenta Google Earth (<https://www.google.com/intl/pt-PT/earth/>)).

Ressalta-se que o sistema de coordenadas geográficas adotado pelo ERA5 segue as convenções do SI, onde as latitudes ao sul do Equador e as longitudes a oeste do Meridiano de Greenwich são expressas como valores negativos.

Procedeu-se à validação dos dados do ERA5 utilizando os dados das boias como referência. Essa validação foi realizada empregando diferentes métricas de avaliação, incluindo:

- o coeficiente de determinação, R^2 , que tem como objetivo avaliar a qualidade do ajuste de um modelo de regressão, representando a percentagem da variação nos dados que é explicada pelo modelo, e que pode ser calculado utilizando a Equação (7);

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) - (x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \right)^2, \quad (7)$$

onde x e y representam os valores reais (medições por boias) e os valores modelados (modelo de reanálise ERA5) dos parâmetros estudados, respetivamente, a barra superior denota média, e n representa o número de pares de dados.

- a raiz dos erros quadráticos médios, $RMSE$, que tem como objetivo medir a raiz quadrada dos erros quadráticos entre os valores previstos e os valores reais, permitindo avaliar a magnitude média dos erros que o modelo faz, que pode ser calculada utilizando a Equação (8);

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}. \quad (8)$$

- as percentagens dos desvios sistemáticos entre os valores previstos e os valores reais, através do *bias*, ψ , que tem como objetivo medir a tendência global do modelo de subestimar ou superestimar os valores reais, utilizando a Equação (9),

$$\psi = 100 \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{y_i} - 1 \right)}{n}. \quad (9)$$

- o módulo do *bias*, $|\psi|$, que representa uma medida do desvio médio absoluto entre os valores previstos e os valores reais, sem considerar a direção do desvio (sub- ou superestimar) utilizando a Equação (10),

$$|\psi| = 100 \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i}{y_i} - 1 \right|}{n}. \quad (10)$$

Adicionalmente, foi ainda calculado o desvio padrão, σ , que indica o grau de dispersão de um conjunto de dados, associado aos valores médios dos dados das boias e dos dados do ERA5, respetivamente, utilizando as Equações (11)–(12),

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad (11)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{n}}. \quad (12)$$

3.2.2. Estudos de caso

Após a validação do modelo de reanálise, foram conduzidos dois estudos de caso: um direcionado à região do Porto de Sines (Sines, Portugal) e um direcionado à região de Tramandaí (Rio Grande do Sul, Brasil). Ambos os estudos foram conduzidos utilizando dados de H_s (*significant height of combined wind waves and swell*), T_p (*peak wave period*) e θ_m (*mean wave direction*), considerando um período de 81 anos (entre 1940 e 2020), que foram obtidos através do ERA5.

As coordenadas geográficas e as profundidades associadas aos pontos ERA5 respetivos listam-se na Tabela 3. Essas coordenadas geográficas foram utilizadas como *input* para obtenção dos dados do ERA5. Contudo, atendendo à grande quantidade de dados a analisar, estes foram descarregados com uma resolução temporal de três em três horas ao longo das oito décadas (00 UTC, 03 UTC, 06 UTC, etc., onde UTC representa o Tempo Universal Coordenado), resultando num total de 233 760 registos tri-horários para cada um dos parâmetros analisados. As profundidades assinaladas na Tabela 3 são aproximações obtidas a partir de isobatimétricas costeiras disponibilizadas pelo Instituto Hidrográfico de Portugal (<https://geomar.hidrografico.pt/>) e pela Infraestrutura de Dados Espaciais Marinhos da Diretoria de Hidrografia e Navegação (<https://idem.dhn.mar.mil.br>).

Tabela 3 – Coordenadas geográficas e profundidades dos pontos ERA5 em estudo

Referência	Latitude/Longitude	Profundidade (m)
Porto de Sines	38.00°N/-09.00°W	200
Tramandaí	-30.00°S/-49.50°W	70

Como mencionado anteriormente, a região do Porto de Sines contempla um dos estudos de caso pois há o interesse em implementar o equipamento REEFS no âmbito do projeto NEXUS. A região de Tramandaí foi selecionada para contemplar o outro estudo de caso, pois a) a boia utilizada como referência é fundeada em uma região próxima à costa, sendo um bom parâmetro considerando que o WEC REEFS é um dispositivo *nearshore*; b) apresenta a maior extensão temporal de dados de boia (11/62–06/63; 08/63–09/63; 11/06–09/07; 12/13; 01/14–03/14; 06/14–12/14; 01/15–05/15; 01/16–07/16), que permitiu efetuar eficazmente comparações entre medições *in situ* em número suficiente com os dados de reanálise em diferentes décadas; e c) os resultados obtidos através da comparação entre a boia e o ERA5 apresentam-se em séries contínuas, *i.e.*, sem a presença de patamares.

Utilizando os dados de reanálise, realizou-se:

- a) a estimativa do potencial energético das ondas em cada localidade (através da Equação (5));
- b) a análise da variabilidade anual de cada região;
- c) a análise da variabilidade mensal de cada região;

d) uma perspetiva comercial quanto à implementação do WEC REEFS em cada uma das regiões.

Para realizar a perspetiva de implementação do WEC REEFS em cada uma das regiões, foram considerados os seguintes limites de funcionamento do equipamento ($1.50 m \leq H_s \leq 5.00 m$ e $6.00 s \leq T_p \leq 12.00 s$), adotando-se um rendimento, η , de 50%. Esse valor de rendimento é um valor arbitrado próximo ao que se encontra na literatura para outros conversores (e.g., Silva et al. (2022); Aderinto e Li (2019)), pois não se dispunha de dados concretos para o REEFS. Portanto, a estimativa da potência absorvida pelo REEFS (P_{REEFS}) foi calculada utilizando a Equação (13), a qual foi aplicada sem atender ao rumo da agitação marítima e assumindo que as características da agitação marítima no local de instalação do dispositivo seriam análogas às da boia ondógrafo,

$$P_{REEFS} = 0.491H_s^2T_e\eta, \quad (13)$$

em que P_{REEFS} é a potência média absorvida pelo REEFS [kW/m] e o rendimento η considerado foi igual a 0.50.

Do ponto de vista comercial, considerando todos os dias e horas dos dados em análise (selecionado de acordo com os limites de funcionamento considerados nesta dissertação), foi realizada uma estimativa da produção mensal de energia (E_{mensal}), utilizando a Equação (14),

$$E_{mensal} = P_{REEFS}(24 \text{ horas})(\text{número de dias do mês}) \times \frac{1 \text{ MW}}{1000 \text{ kW}}. \quad (14)$$

Além disso, considerando uma tarifa de venda de energia de €150/MWh, utilizando a Equação (15), foi realizada uma estimativa do valor da receita anual possível de ser obtida com a implementação do WEC REEFS,

$$Receita \text{ anual} = 150 \sum_{jan}^{dez} E_{mensal}, \quad (15)$$

em que E_{mensal} é medida em [MWh/m] e a *Receita anual* em [Euro/m].

A variabilidade inter-anual de cada região, que é o desvio padrão das médias anuais normalizadas pela média geral (Stopa et al., 2013), foi calculada utilizando a Equação (16),

$$IAV = \frac{\sigma_{\bar{x}_j}}{\bar{X}}, \quad (16)$$

e a variabilidade intra-anual, que é a média do desvio padrão anual normalizado pela média anual e fornece uma medida da variabilidade dentro de cada ano (Stopa et al., 2013), foi calculada utilizando a Equação (17).

$$MAV = \left(\frac{\overline{\sigma_j}}{\overline{X_j}} \right), \quad (17)$$

A Figura 5 apresenta um fluxograma geral mostrando a metodologia adotada, em que os parâmetros das ondas são coligidos a partir de dados medidos de boias e de estimativas da reanálise ERA5. Essa informação é utilizada para estimar a potência das ondas e a respectiva receita anual possível de ser obtida com a implementação do WEC REEFS.

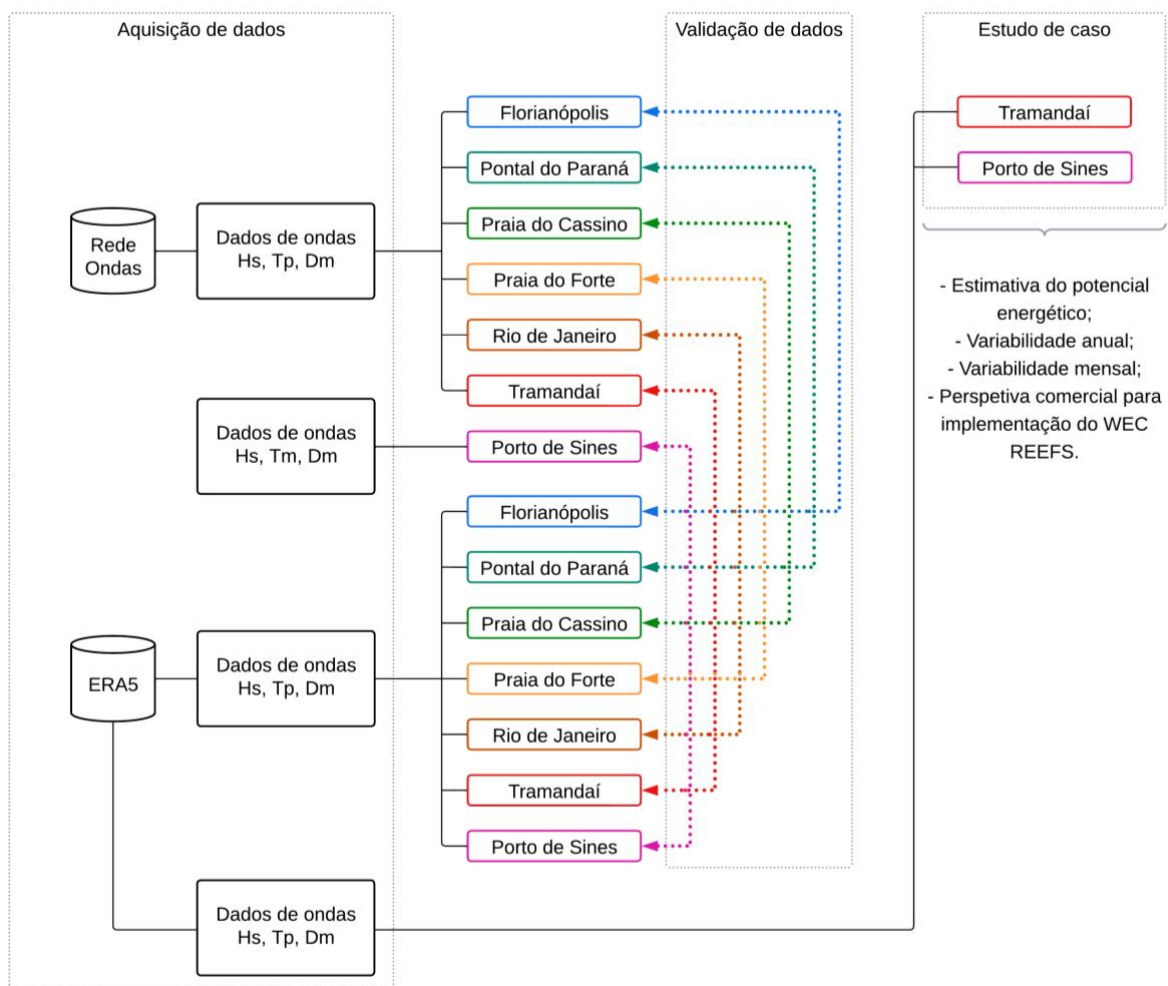


Figura 5 – Fluxograma geral da etapa de Métodos e Aplicação, em que Hs representa a altura significativa de onda; Tp representa o período de pico de onda; Tm representa o período médio de onda; e Dm representa a direção média de onda (ilustração realizada através da ferramenta *on-line* LucidChart (<https://www.lucidchart.com/>)).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Boias versus ERA5

4.1.1. Porto de Sines (Sines, Portugal)

A validação dos dados do modelo de reanálise ERA5 para o Porto de Sines foi conduzida considerando o período de coleta de dados da respectiva boia (01/2017–10/2022). Foram utilizados 42 921 pares de dados na análise ($n = 42\,921$).

A Figura 6 apresenta a comparação entre os valores de H_s , T_m e θ_m dos dados da boia e dos dados do ERA5. A gradação das cores dos gráficos de dispersão e a respectiva barra de cores, que varia de azul a vermelho, respetivamente, reflete uma menor ou maior densidade de pontos nessa posição. Esses resultados estão diretamente relacionados com a frequência de ocorrência de determinados intervalos de valores que reportam a diferentes estados de mar.

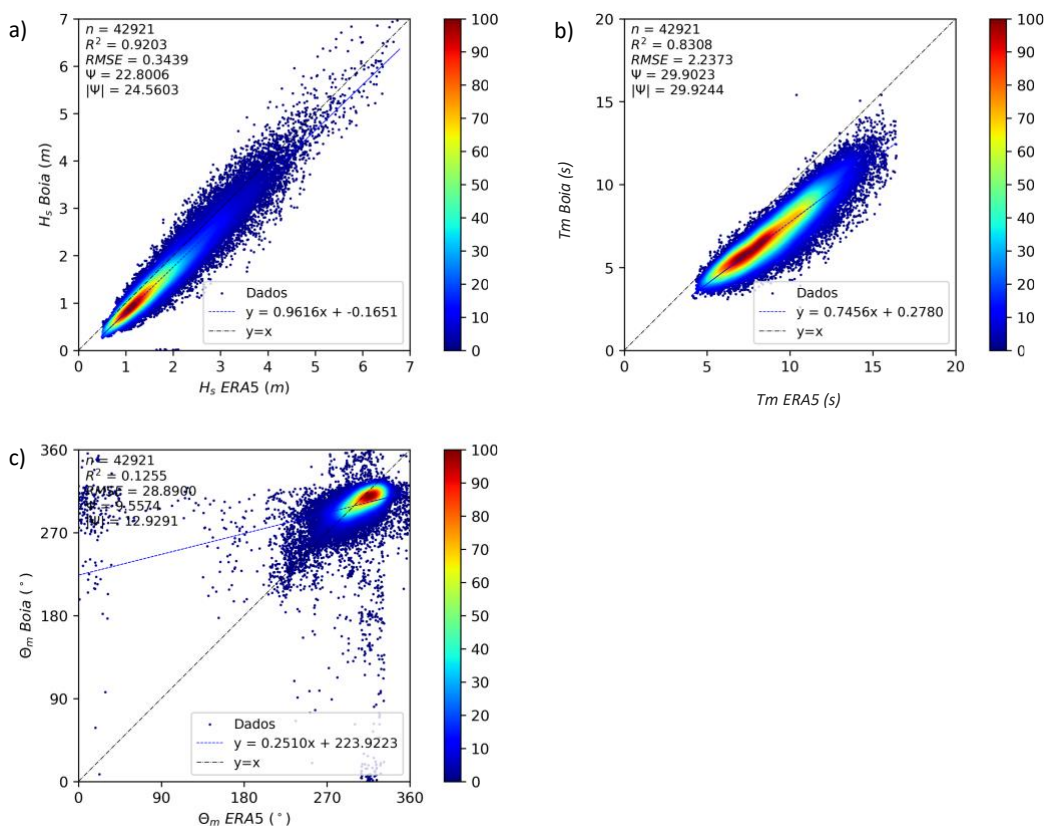


Figura 6 – Gráficos de densidade comparando os dados da boia e do ERA5 (Porto de Sines) para a) H_s ; b) T_m ; e c) θ_m .

Através da comparação entre os dados de H_s (Figura 6a), observa-se um alto coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0.92$), indicando uma forte correlação entre os dados medidos e estimados. O baixo valor de $RMSE$ ($RMSE \approx 0.34\text{ m}$) confirma o ajuste das estimativas. No entanto, o valor

de *bias* ($\psi \approx 22.80\%$, $|\psi| \approx 24.56\%$) reflete que o ERA5 apresenta uma tendência de superestimação em relação aos valores reais.

Para T_m (Figura 6b), percebe-se que há uma forte correlação entre os dados, resultando em um alto coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0.83$). Contudo, o valor de *RMSE* evidencia um desfasamento persistente entre os valores ($RMSE \approx 2.24$ s) e o valor de *bias* ($\psi \approx 29.90\%$, $|\psi| \approx 29.92\%$) permite confirmar que o ERA5 tende a superestimar os valores reais do período médio da boia.

No caso de θ_m (Figura 6c), percebe-se uma grande dispersão de pontos, o que leva a uma redução considerável do coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0.12$). No entanto, os baixos valores de *RMSE* ($RMSE \approx 28.89^\circ$) e *bias* ($\psi \approx 9.56\%$, $|\psi| \approx 12.93\%$) permitem identificar que há uma concordância entre os dados. Nesse caso, novamente, o ERA5 tende a superestimar ligeiramente os valores reais.

Para explorar a variabilidade sazonal dos parâmetros H_s , T_m e θ_m , foi realizada uma comparação mensal utilizando os valores médios da boia e do ERA5 (Figura 7).

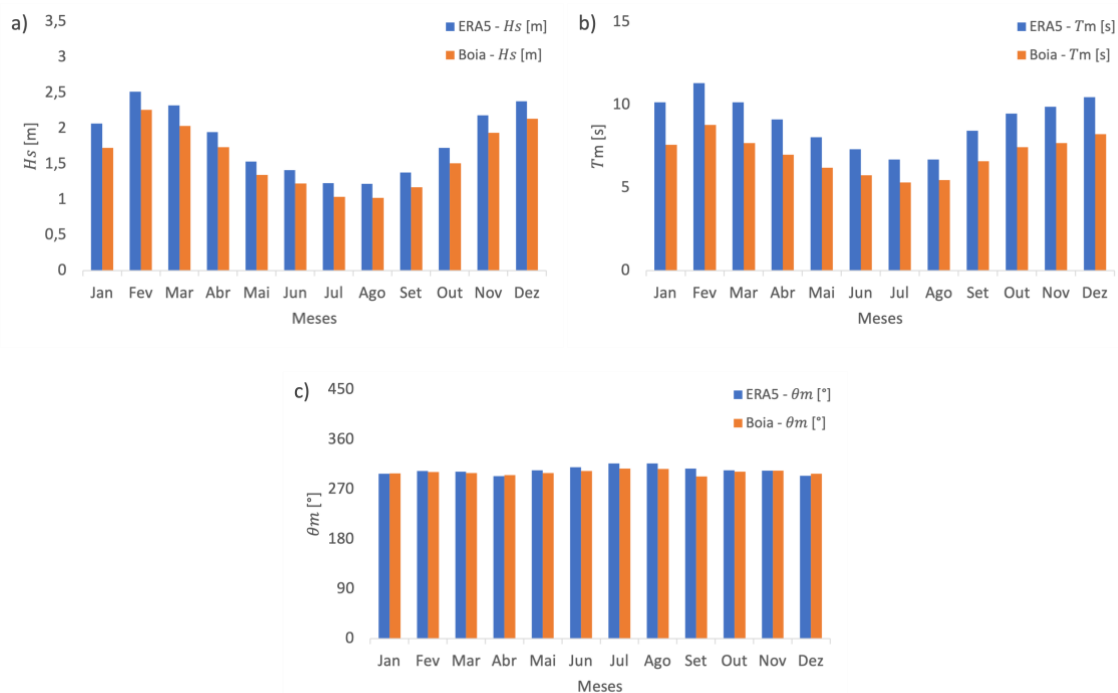


Figura 7 – Comparação mensal entre os dados médios da boia e do ERA5 (Porto de Sines) para a) H_s ; b) T_m ; e c) θ_m .

A comparação mensal entre os dados médios do ERA5 e da boia para o parâmetro H_s (Figura 7a) mostra que em todos os meses os valores médios do ERA5 são maiores do que os valores médios da boia, corroborando a análise anterior. Considerando os dados do ERA5, o menor e o maior valor médio de H_s são, respetivamente, 1.22 m (no mês de agosto) e 2.52 m (no mês de fevereiro). Os dados de boia, no entanto, apresentam um menor e um maior valor médio de H_s de 1.02 m (no mês de agosto) e 2.26 m (no mês de fevereiro), respetivamente. O facto dos valores H_s serem maiores para o ERA5 em relação aos dados medidos da boia não é de todo surpreendente porque

o ponto ERA5 encontra-se muito mais distanciado da costa. Desta forma, não houve tanta dissipação de energia das ondas, esperando-se de antemão esta diferença nos resultados.

Para T_m (Figura 7b), novamente, percebe-se que o ERA5 apresenta valores médios maiores do que os valores médios a boia, não se encontrando uma explicação que justifique esta diferença. Os dados do ERA5 apresentam um menor e um maior valor médio de T_m de 6.68 s (no mês de agosto) e 11.28 s (no mês de fevereiro), respetivamente. Os dados da boia apresentam um menor e um maior valor médio de T_m de 5.31 s (no mês de julho) e 8.77 s (no mês de fevereiro), respetivamente.

Para o parâmetro θ_m (Figura 7c), percebe-se que os valores médios da boia e os valores médios do ERA5 são muito próximos. Nesse caso, os dados do ERA5 apresentam um valor médio mínimo e máximo de θ_m de 293.59° (no mês de abril) e 316.63° (no mês de julho), respetivamente. A boia, por sua vez, apresenta um valor médio mínimo e máximo de θ_m de 292.67° (no mês de setembro) e 306.98° (no mês de julho), respetivamente. Denota-se, portanto, que a direção de propagação das ondas permanece quase constante ao longo de todo o ano (amplitude com diferenças abaixo de cerca de 15°) e com valores medidos e estimados muito comparáveis.

Foram avaliados, também, os valores médios dos dados da boia de H_s , T_m e θ_m e seus respetivos desvios padrão (calculados através das Equações (11)–(12)). A Figura 8 apresenta a variação mensal dos parâmetros e seus desvios padrão. A Figura 9 apresenta as informações correspondentes aos dados do ERA5.

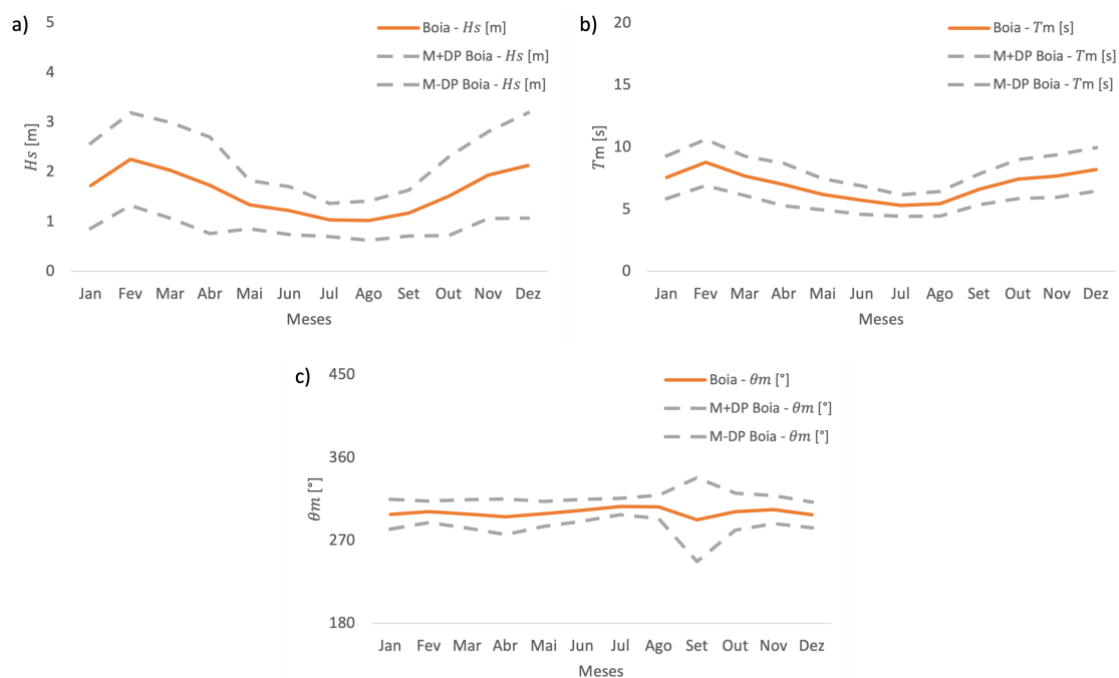


Figura 8 – Variação mensal dos dados médios da boia (Porto de Sines) para a) H_s ; b) T_m ; e c) θ_m . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).

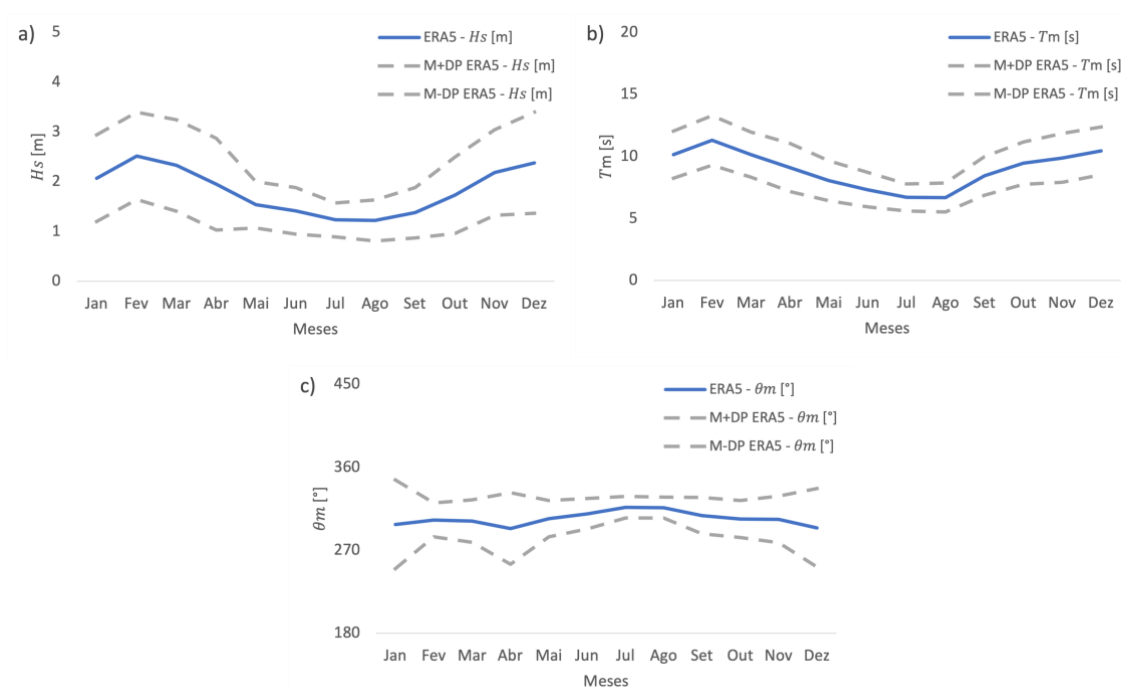


Figura 9 – Variação mensal dos dados médios do ERA5 (Porto de Sines) para a) H_s ; b) T_m ; e c) θ_m . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).

As Figura 8 e Figura 9 permitem identificar que, durante o período de análise, os valores médios de H_s e T_m apresentam um comportamento sazonal, com uma ocorrência dos seus maiores valores médios nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março, seguida dos menores valores médios entre os meses de maio e setembro. Este padrão é muito similar entre os valores medidos da boia e os estimados pelo ERA5.

A Figura 10 apresenta os mapas de calor que estão diretamente associados ao gráfico de densidade apresentado na Figura 6a–b. A gradação das cores dos mapas de calor, que varia de verde a vermelho, reflete uma menor ou maior percentagem de ocorrência de diferentes estados de mar.

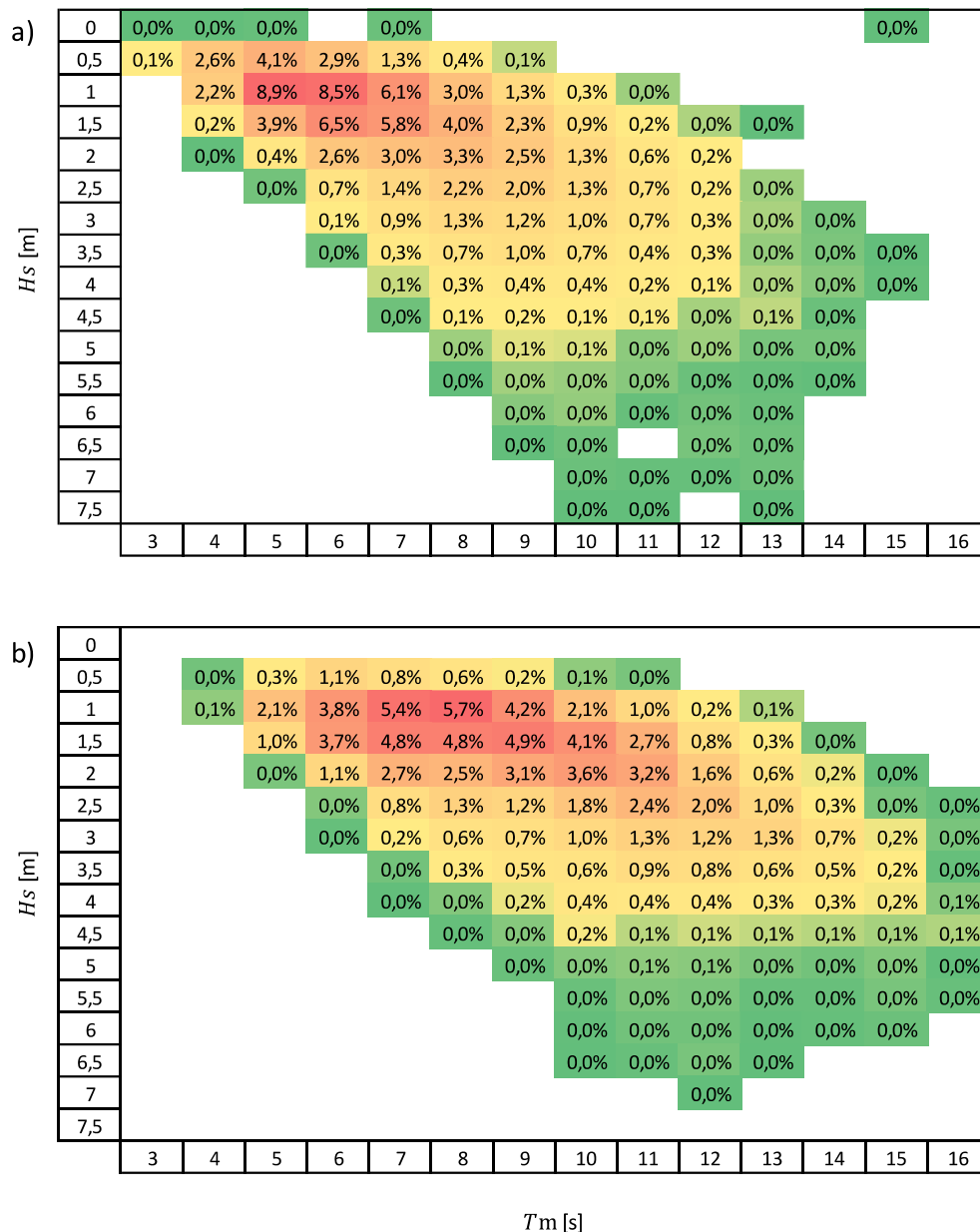


Figura 10 – Mapa de calor exibindo a percentagem de contribuição de diferentes estados marítimos para a energia das ondas do Porto de Sines, considerando os dados de a) Boia; e b) ERA5.

A partir do mapa de calor pode-se perceber a influência que os diferentes estados de mar exercem sobre a energia anual total da região, considerando os dados da boia (Figura 15a) e do ERA5 (Figura 15b). Observa-se que há uma concordância entre os dados, sendo as percentagens mais representativas correspondentes a T_m entre 5 e 9 s e H_s entre 0.5 e 2 m.

4.1.2. Florianópolis, Santa Catarina (Brasil)

A validação dos dados do modelo de reanálise ERA5 para a localidade de Florianópolis foi conduzida considerando o período de coleta de dados da respectiva boia (03/2002–04/2003; 06/2003–09/2003; 05/2004–07/2004; 10/2004–05/2005). Foram utilizados 12 871 pares de dados na análise.

A Figura 11 apresenta a comparação entre os valores de H_s , T_p , θ_m e P (calculada através da Equação (5)) dos dados da boia e dos dados do ERA5.

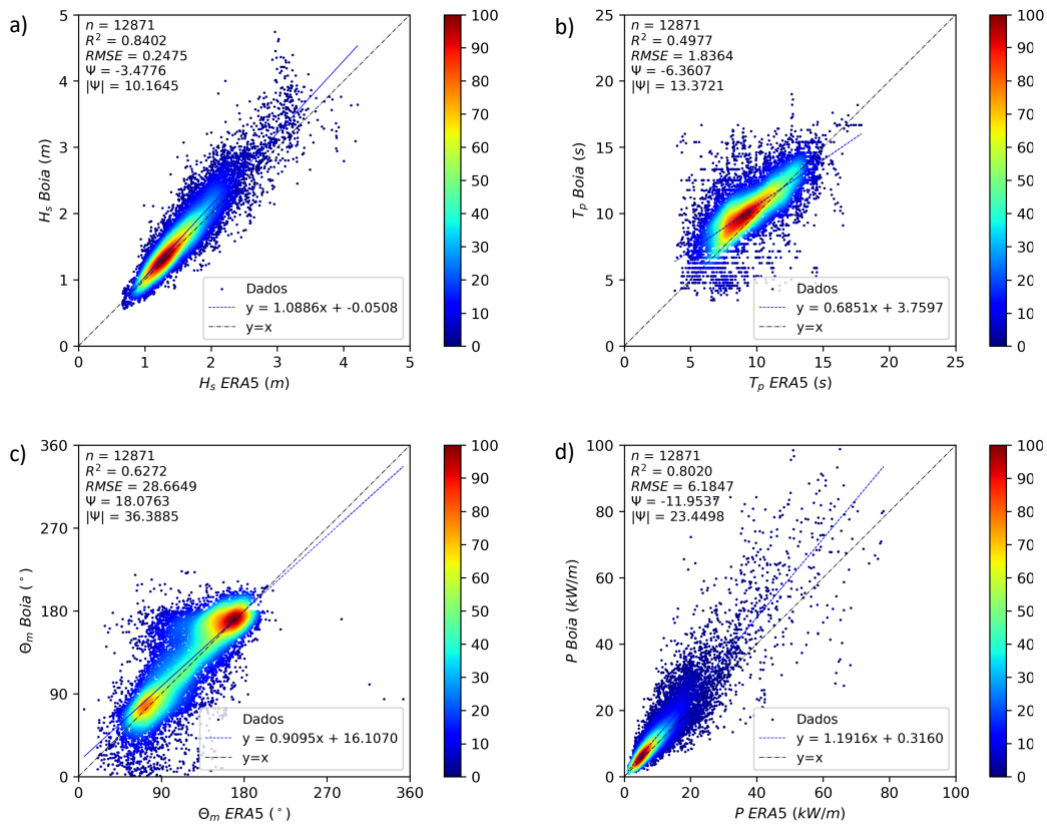


Figura 11 – Gráficos de densidade comparando os dados da boia e do ERA5 (Florianópolis) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P .

Através da comparação entre os dados de H_s (Figura 11a), observa-se um alto coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0.84$), indicando uma forte correlação entre os dados. Os baixos valores de $RMSE$ ($RMSE \approx 0.25$ m) e $bias$ ($\psi \approx -3.48\%$, $|\psi| \approx 10.16\%$) confirmam o bom ajuste das estimativas. No entanto, observa-se que o ERA5 apresenta uma tendência ligeira de subestimação em relação aos valores reais.

Para T_p (Figura 11b), percebe-se que há uma dispersão considerável dos pontos, resultando em um coeficiente de determinação reduzido ($R^2 \approx 0.50$). No entanto, os valores de $RMSE$ ($RMSE \approx 1.84$ s) e $bias$ ($\psi \approx -6.36\%$, $|\psi| \approx 13.37\%$) ainda indicam um ajuste adequado entre os dados. Novamente, nota-se que o ERA5 tende a subestimar os valores reais.

No caso de θ_m (Figura 11c), é interessante identificar a presença clara de duas direções dominantes em ambos os dados medidos e estimados. A dispersão de pontos leva a uma redução do coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0.63$). No entanto, os baixos valores de $RMSE$ ($RMSE \approx 28.66^\circ$) e $bias$ ($\psi \approx 18.08\%$, $|\psi| \approx 36.39\%$) confirmam a concordância entre os dados. Nesse caso, o ERA5 tende a superestimar os valores reais.

Ao analisar os dados de P (Figura 11d), observa-se um alto coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0.80$) e baixos valores de $RMSE$ ($RMSE \approx 6.18 \text{ kW/m}$) e $bias$ ($\psi \approx -11.95\%$, $|\psi| \approx 23.45\%$). Esses resultados estão diretamente relacionados à forte correlação observada em H_s , uma vez que o parâmetro P depende, principalmente, de H_s . No entanto, assim como em H_s e T_p , o ERA5 apresenta uma tendência de subestimação em relação aos valores reais.

A comparação mensal entre os dados de H_s , T_p , θ_m e P , utilizando os valores médios da boia e do ERA5, é apresentada na Figura 12.

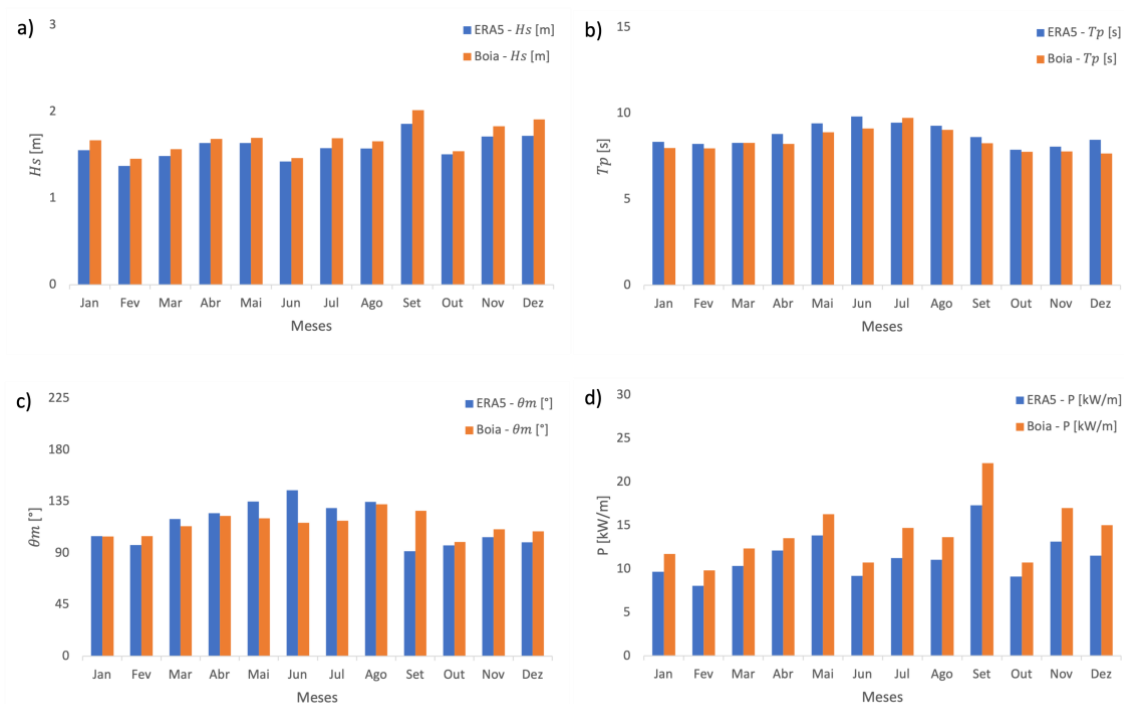


Figura 12 – Comparação mensal entre os dados médios da boia e do ERA5 (Florianópolis) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P .

A comparação mensal entre os dados médios do ERA5 e da boia para o parâmetro H_s (Figura 12a) mostra que em todos os meses os valores médios da boia são maiores do que os valores médios do ERA5. Considerando os dados do ERA5, o menor e o maior valor médio de H_s são 1.37 m (no mês de fevereiro) e 1.86 m (no mês de setembro), respectivamente. Os dados de boia, no entanto, apresentam um menor e um maior valor médio de H_s de 1.45 m (no mês de fevereiro) e 2.01 m (no mês de setembro), respectivamente.

Para T_p (Figura 12b), em comparação com a boia, percebe-se que o ERA5 tende a apresentar maiores valores médios. Há uma exceção, no entanto, para o mês de março, em que ambos apresentam valores médios muito próximos, e para o mês de julho, em que os valores médios da boia são superiores aos valores médios do ERA5. Os dados do ERA5 apresentam um menor e um maior valor médio de T_p de 8.34 s (no mês de fevereiro) e 10.78 s (no mês de maio), respectivamente. Os dados da boia apresentam um menor e um maior valor médio de T_p de 8.78 s (no mês de dezembro) e 11.68 s (no mês de maio), respectivamente.

Para o parâmetro θ_m (Figura 12c), percebe-se que nos meses de fevereiro, setembro, outubro, novembro e dezembro os valores médios da boia são superiores aos valores médios do ERA5. No entanto, nos meses de março, abril, maio, junho, julho e agosto os dados médios do ERA5 são maiores do que valores médios da boia. Ainda, no mês de janeiro, percebe-se que os valores médios de ambos são muito próximos. Nesse caso, os dados do ERA5 apresentam um valor médio mínimo e máximo de θ_m de 94.18° (no mês de outubro) e 138.62° (no mês de abril), respectivamente. A boia, por sua vez, apresenta um valor médio mínimo e máximo de θ_m de 102.23° (no mês de outubro) e 144.05° (no mês de abril), respectivamente.

Conforme observado na Figura 10c, é possível notar que a maioria dos dados de θ_m se concentra em torno de 180° . No entanto, os valores médios mensais são mais baixos, o que é resultado da presença de duas direções dominantes identificadas no gráfico de dispersão. Essas duas direções predominantes contribuem para a diminuição dos valores médios mensais.

A Figura 12d apresenta os valores médios de P , considerando os dados do ERA5 e da boia. Em todos os meses os dados médios da boia são superiores aos dados médios do ERA5, como resultado direto das observações efetuadas para H_s . Nesse caso, os valores médios mínimo e máximo de P considerando os dados do ERA5 são 8.07 kW/m (no mês de fevereiro) e 17.32 kW/m (no mês de setembro), respectivamente. Considerando os dados da boia, os valores médios mínimo e máximo de P ocorrem para os mesmos meses, sendo de 9.83 kW/m (no mês de fevereiro) e 22.15 kW/m (no mês de setembro), respectivamente.

O mês de setembro assume os maiores valores médios de P . Ou seja, nesse caso, é o mês com o maior potencial energético, considerando tanto os dados da boia quanto os dados do ERA5. Por outro lado, o mês de fevereiro assume os menores valores médios de P . Na sequência de setembro, considerando os dados da boia, os meses com o maior potencial energético são novembro, maio, dezembro, julho, agosto, abril, março, janeiro, junho, outubro e fevereiro. Considerando os dados do ERA5, na sequência de setembro, estão os meses de maio, novembro, abril, dezembro, julho, agosto, março, janeiro, junho, outubro e fevereiro.

A Figura 13 apresenta a variação mensal média de H_s , T_p , θ_m e P e seus desvios padrão considerando os dados da boia. A Figura 14 apresenta as informações correspondentes aos dados do ERA5.

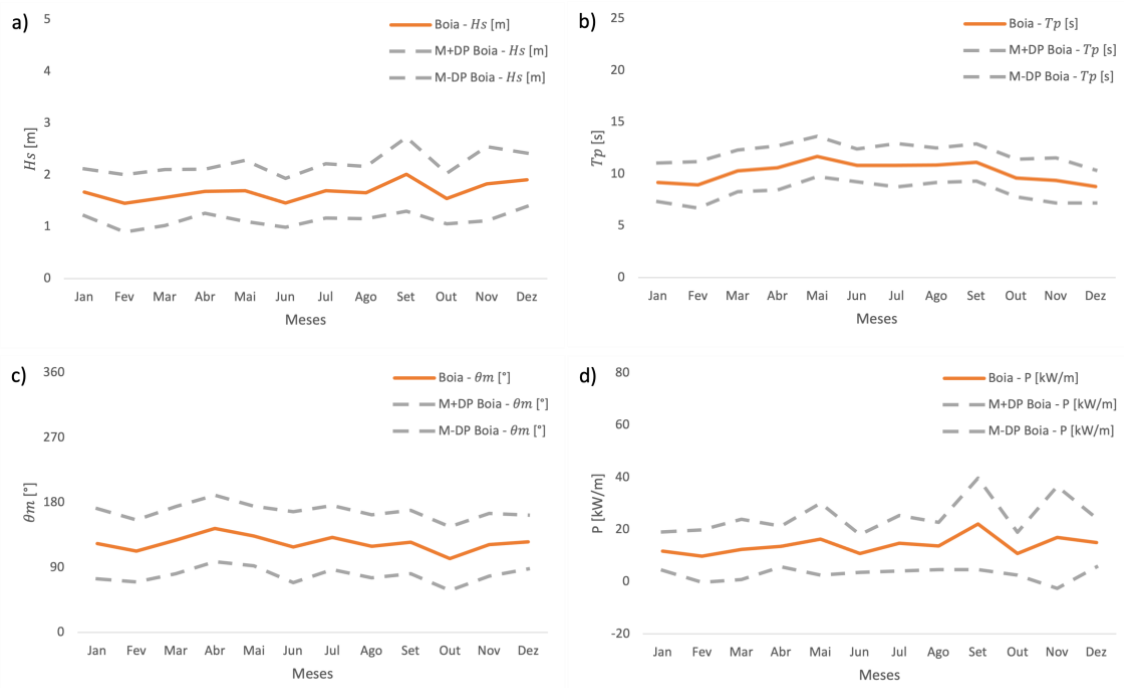


Figura 13 – Variação mensal dos dados médios da boia (Florianópolis) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).

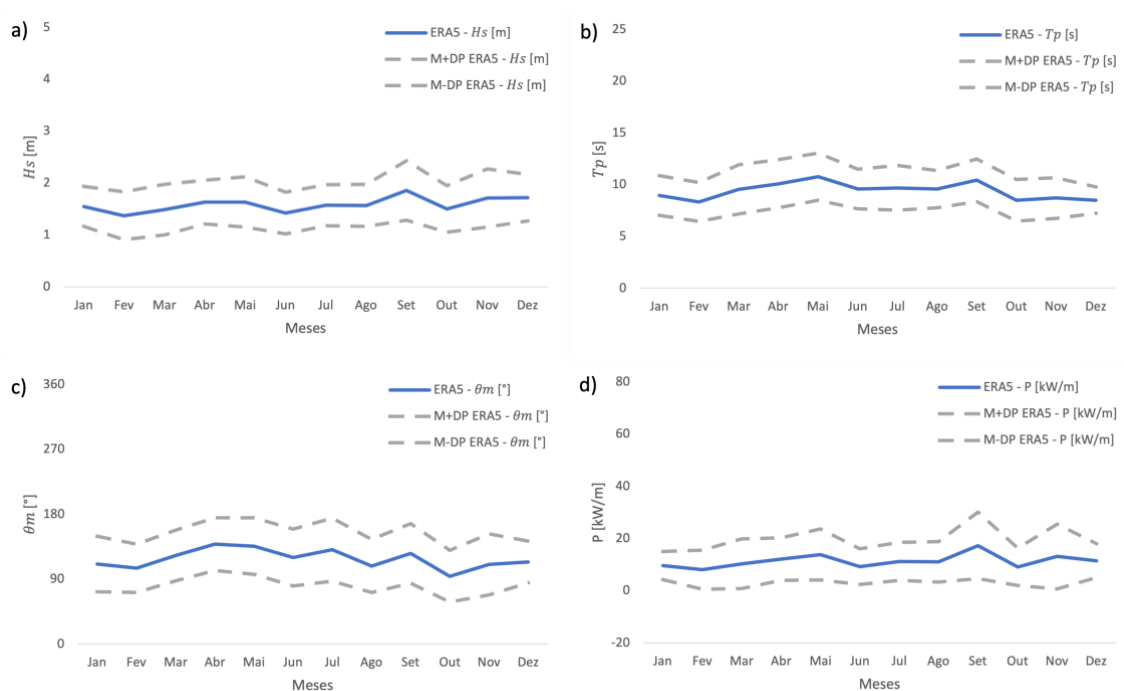


Figura 14 – Variação mensal dos dados médios do ERA5 (Florianópolis) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).

As Figura 13 e Figura 14 permitem identificar que, durante o período de análise, os valores médios dos parâmetros de agitação, bem como do potencial energético, permaneceram consideravelmente constantes, ou seja, não apresentaram grandes variações sazonais. Os resultados entre dados medidos e estimados são muito similares ao longo do ano.

Avaliando o desvio padrão associado ao parâmetro P , considerando os dados da boia (Figura 13d), percebe-se que junho apresenta o menor valor de desvio padrão ($\sigma \approx 7.24 \text{ kW/m}$) e que novembro apresenta o maior valor de desvio padrão ($\sigma \approx 19.51 \text{ kW/m}$). Considerando os dados do ERA5 para o parâmetro P (Figura 14d), o menor valor de desvio padrão está associado ao mês de janeiro ($\sigma \approx 5.38 \text{ kW/m}$) e o maior valor de desvio padrão está associado ao mês de setembro ($\sigma \approx 12.76 \text{ kW/m}$).

A Figura 15, por sua vez, apresenta os mapas de calor que estão diretamente associados ao gráfico de densidade apresentado na Figura 11a–b.

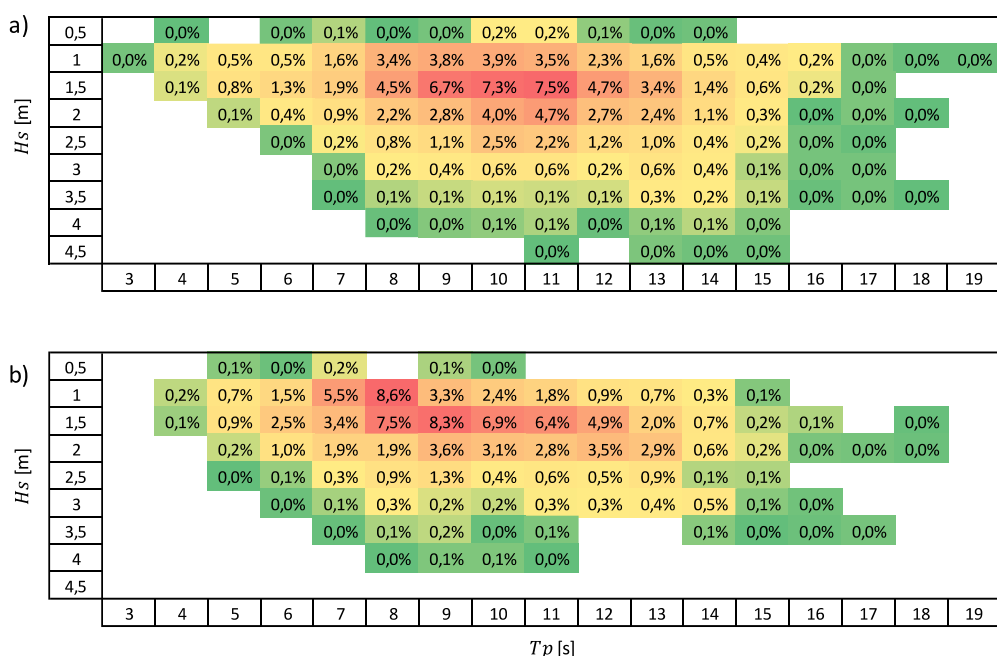


Figura 15 – Mapa de calor exibindo a percentagem de contribuição de diferentes estados marítimos para a energia das ondas de Florianópolis, considerando os dados de a) Boia; e b) ERA5.

A partir do mapa de calor, considerando os dados da boia (Figura 15a) e do ERA5 (Figura 15b), observa-se uma concordância entre os dados, sendo as percentagens mais representativas correspondentes a T_p entre 8 e 12 s e H_s entre 1 e 2 m.

4.1.3. Pontal do Paraná, PR

A validação dos dados do modelo de reanálise ERA5 para a localidade de Pontal do Paraná foi conduzida considerando o período de coleta de dados da respectiva boia (12/2013–07/2015). Foram utilizados 13 842 pares de dados na análise.

A Figura 16 apresenta a comparação entre os valores de H_s , T_p , θ_m e P dos dados da boia e dos dados do ERA5.

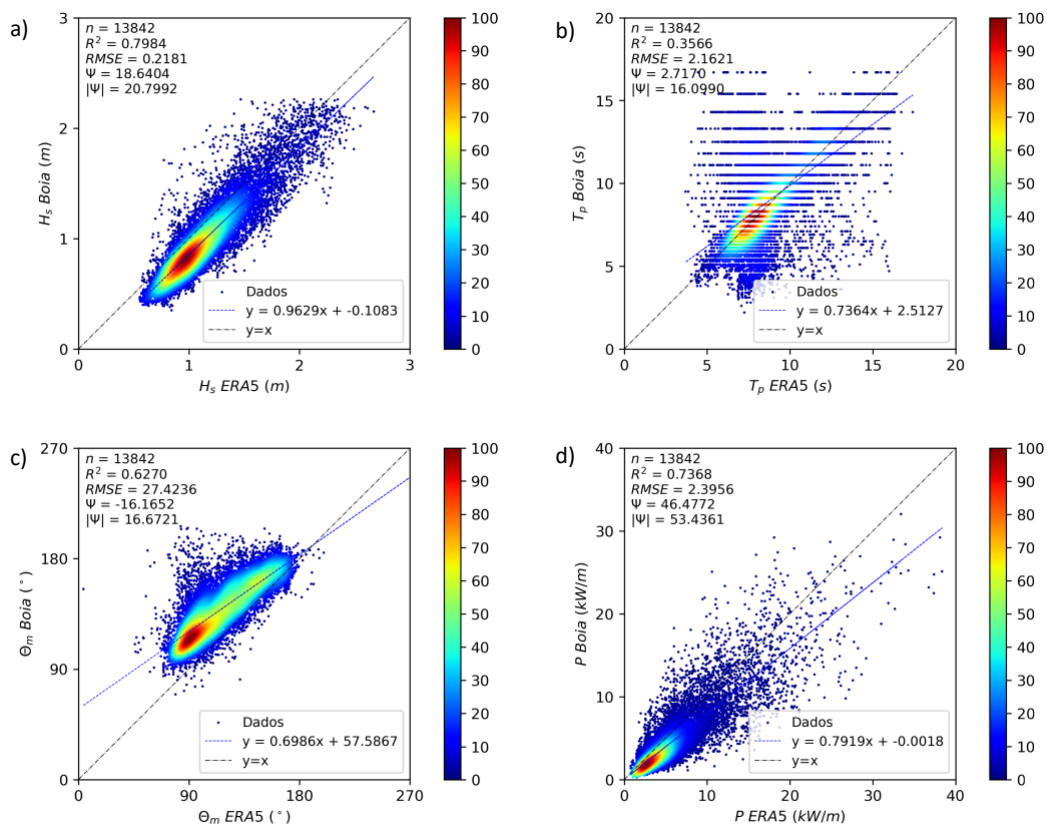


Figura 16 – Gráficos de densidade comparando os dados da boia e do ERA5 (Pontal do Paraná) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P .

Através da comparação entre os dados de H_s (Figura 16a), observa-se um alto coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0.80$), indicando uma forte correlação entre os dados. O valor de $RMSE$ ($RMSE \approx 0.22 \text{ m}$) é baixo, no entanto, o valor de $bias$ ($\psi \approx 18.64\%$, $|\psi| \approx 20.80\%$) é relativamente alto. Portanto, percebe-se que o ERA5 apresenta uma tendência de superestimação em relação aos valores reais.

Para T_p (Figura 16b), percebe-se que há uma considerável dispersão dos pontos e que existem lacunas entre os intervalos de medição, resultando em um baixo coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0.36$). No entanto, os baixos valores de $RMSE$ ($RMSE \approx 2.16 \text{ s}$) e $bias$ ($\psi \approx 2.72\%$, $|\psi| \approx 16.01\%$) indicam que há um ajuste entre os dados. No entanto, novamente, observa-se que o ERA5 tende a superestimar os valores reais. Nota-se, igualmente, que os dados da boia aparecem descritos por patamares, i.e., a leitura dos dados aparenta dar valores discretos e não contínuos como os resultados do ERA5. Esta limitação da medição dos dados de boia é um dos fatores que poderá contribuir para o baixo coeficiente de determinação R^2 . Realmente, a maior densidade de pontos parece encontrar-se na reta a 45° que representa um ajuste perfeito entre valores medidos e estimados.

No caso de θ_m (Figura 16c), identifica-se uma dispersão considerável entre os dados, o que leva a uma redução do coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0.63$). No entanto, os baixos valores de $RMSE$ ($RMSE \approx 27.42^\circ$) e $bias$ ($\psi \approx -16.16\%$, $|\psi| \approx 16.67\%$) confirmam que há uma concordância entre os dados. Nesse caso, o ERA5 tende a subestimar os valores reais.

Ao analisar os dados de P (Figura 16d), observa-se um coeficiente de determinação relativamente alto ($R^2 \approx 0.74$), um valor de $RMSE$ baixo ($RMSE \approx 2.39 \text{ kW/m}$) e, no entanto, o valor de $bias$ assume valores altos ($\psi \approx 46.48\%$, $|\psi| \approx 50.44\%$). Portanto, assim como em H_s e T_p , o ERA5 apresenta uma tendência de superestimação em relação aos valores reais.

A comparação mensal entre os dados de H_s , T_p , θ_m e P , utilizando os valores médios da boia e do ERA5, é apresentada na Figura 17.

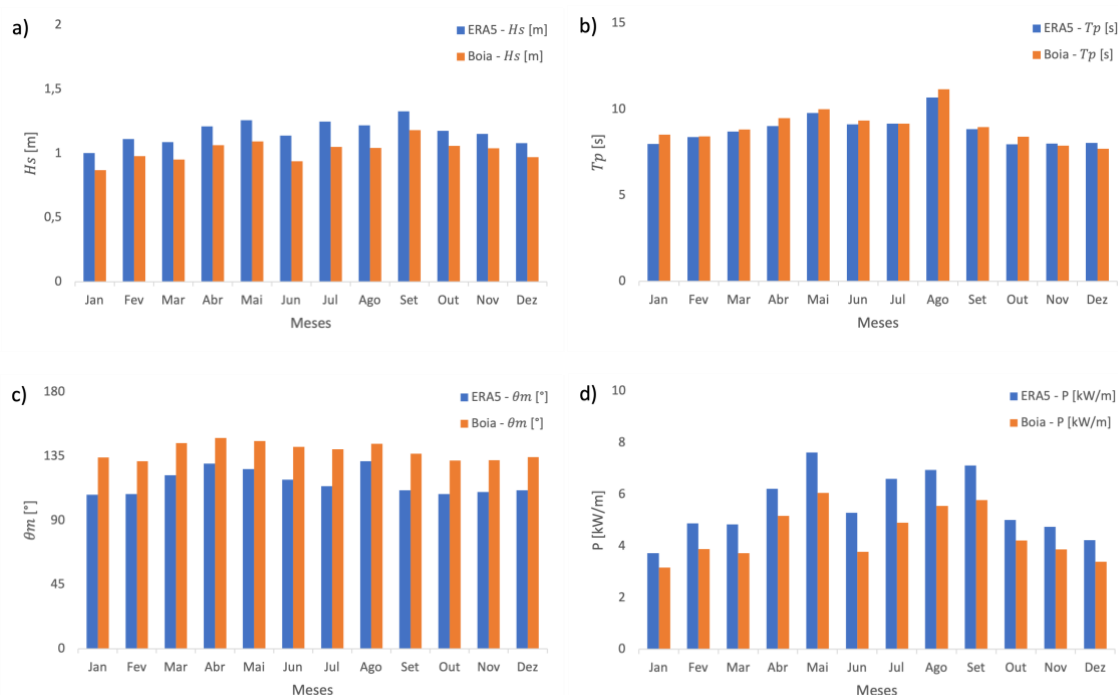


Figura 17 – Comparação mensal entre os dados médios da boia e do ERA5 (Pontal do Paraná) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P .

A comparação mensal entre os dados médios do ERA5 e da boia para o parâmetro H_s (Figura 17a) mostra que, em todos os meses, os valores médios do ERA5 são maiores do que os valores médios da boia. Considerando os dados do ERA5, o menor e o maior valor médio de H_s são 1.00 m (no mês de janeiro) e 1.33 m (no mês de setembro), respectivamente. Os dados de boia, no entanto, apresentam um menor e um maior valor médio de H_s de 0.87 m (no mês de janeiro) e 1.18 m (no mês de setembro), respectivamente.

Para T_p (Figura 17b), em comparação com o ERA5, percebe-se que a boia tende a apresentar maiores valores médios, sendo as diferenças muito pequenas. Há uma exceção, no entanto, no mês de julho, em que ambos apresentam valores médios muito próximos, e nos meses de novembro e dezembro, em que os valores médios do ERA5 são ligeiramente superiores aos valores médios da

boia. Os dados do ERA5 apresentam um menor e um maior valor médio de T_p de 7.95 s (no mês de outubro) e 10.67 s (no mês de agosto), respetivamente. Os dados da boia apresentam um menor e um maior valor médio de T_p de 7.70 s (no mês de dezembro) e 11.16 s (no mês de agosto), respetivamente. De uma forma geral, não obstante o baixo coeficiente de determinação R^2 observado, como seria de esperar, os valores de T_p são praticamente idênticos entre os valores medidos e estimados.

Para o parâmetro θ_m (Figura 17c), percebe-se que em todos os meses os valores médios da boia são superiores aos valores médios do ERA5 de um valor de diferenças sensivelmente constante e próximo de 20° . Como o ponto ERA5 é muito próximo da costa, a diferença constante de resultados poderá estar a refletir alguma rotação das ondas como, por exemplo, fenómenos de refração das ondas. Os dados do ERA5 apresentam um valor médio mínimo e máximo de θ_m de 108.10° (no mês de janeiro) e 131.56° (no mês de agosto), respetivamente. A boia, por sua vez, apresenta um valor médio mínimo e máximo de θ_m de 131.58° (no mês de fevereiro) e 147.80° (no mês de abril), respetivamente.

A Figura 17d apresenta os valores médios de P , considerando os dados do ERA5 e da boia. Percebe-se que em todos os meses os dados médios do ERA5 são superiores aos dados médios da boia, como consequência dos maiores valores de H_s . Nesse caso, os valores médios mínimo e máximo de P considerando os dados do ERA5 são 3.72 kW/m (no mês de janeiro) e 7.62 kW/m (no mês de maio), respetivamente. Considerando os dados da boia, os valores médios mínimo e máximo de P são 3.16 kW/m (no mês de janeiro) e 6.06 kW/m (no mês de maio), respetivamente.

O mês de maio assume os maiores valores médios de P . Ou seja, nesse caso, é o mês com o maior potencial energético, considerando tanto os dados da boia quanto os dados do ERA5. Por outro lado, o mês de janeiro assume os menores valores médios de P . Na sequência de maio, considerando os dados da boia, os meses com o maior potencial energético são setembro, agosto, abril, julho, outubro, fevereiro, novembro, junho, março, dezembro e janeiro. Considerando os dados do ERA5, na sequência de maio, estão os meses de setembro, agosto, julho, abril, junho, outubro, fevereiro, março, novembro, dezembro e janeiro.

A Figura 18 apresenta a variação mensal média de H_s , T_p , θ_m e P e seus desvios padrão considerando os dados da boia. A Figura 19 apresenta as informações correspondentes aos dados do ERA5.

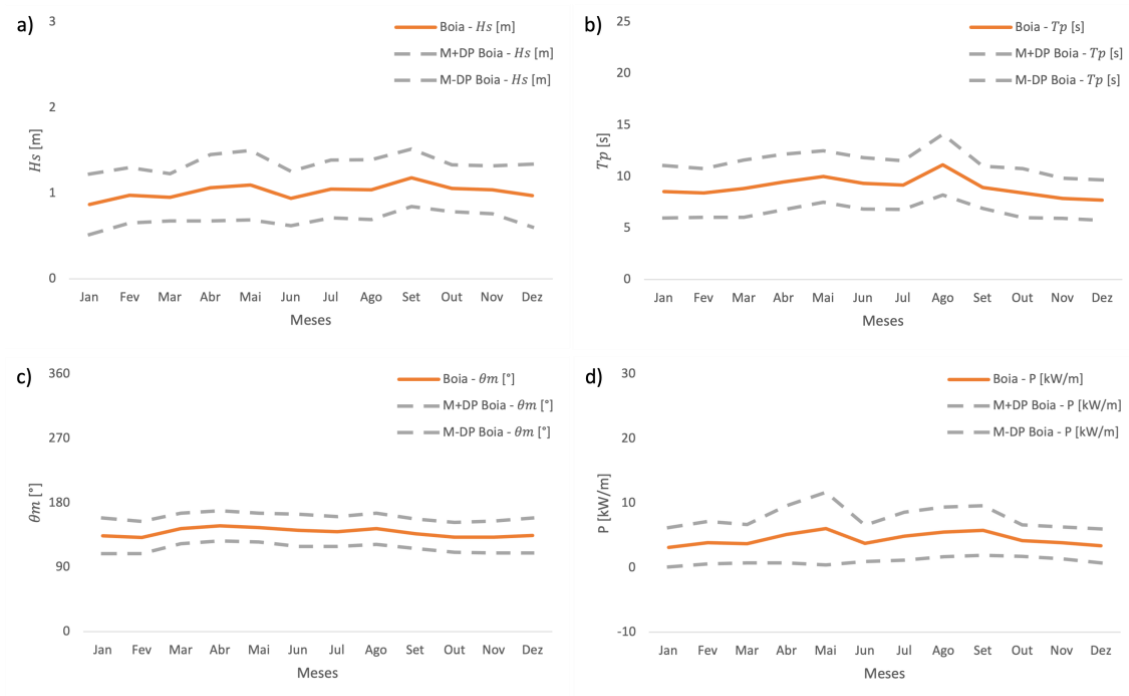


Figura 18 – Variação mensal dos dados médios da boia (Pontal do Paraná) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).

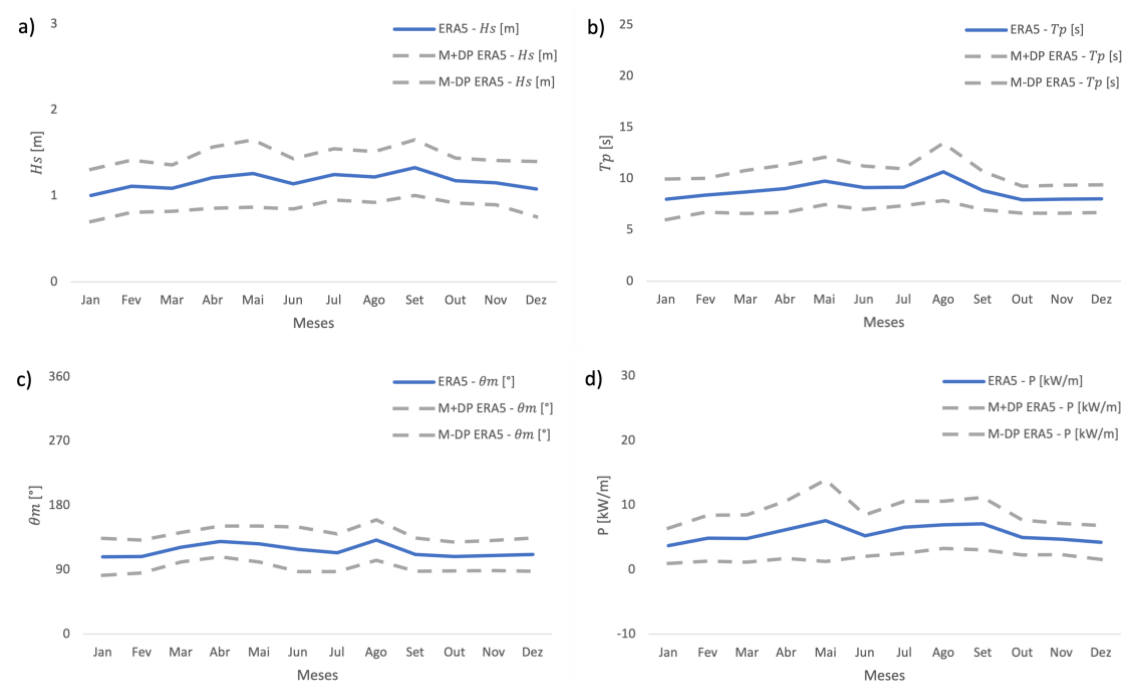


Figura 19 – Variação mensal dos dados médios do ERA5 (Pontal do Paraná) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).

As Figura 18 e Figura 19 permitem identificar que, durante o período de análise, os valores médios dos parâmetros de agitação, bem como do potencial energético, permaneceram consideravelmente constantes, ou seja, não apresentaram grandes variações sazonais. No entanto, percebe-se um ligeiro aumento entre os meses de abril e outubro. O andamento entre os dados medidos e estimados é sensivelmente igual ao longo do ano, mostrando picos em P em maio e setembro.

Avaliando o desvio padrão associado ao parâmetro P , considerando os dados da boia (Figura 18d), percebe-se que outubro apresenta o menor valor de desvio padrão ($\sigma \approx 2.45 \text{ kW/m}$) e que maio apresenta o maior valor de desvio padrão ($\sigma \approx 5.61 \text{ kW/m}$). Considerando os dados do ERA5 para o parâmetro P (Figura 19d), o menor valor de desvio padrão está associado ao mês de novembro ($\sigma \approx 2.42 \text{ kW/m}$) e o maior valor de desvio padrão está associado ao mês de maio ($\sigma \approx 6.31 \text{ kW/m}$).

A Figura 21, por sua vez, apresenta os mapas de calor que estão diretamente associados aos gráficos de densidade apresentados na Figura 16a–b.

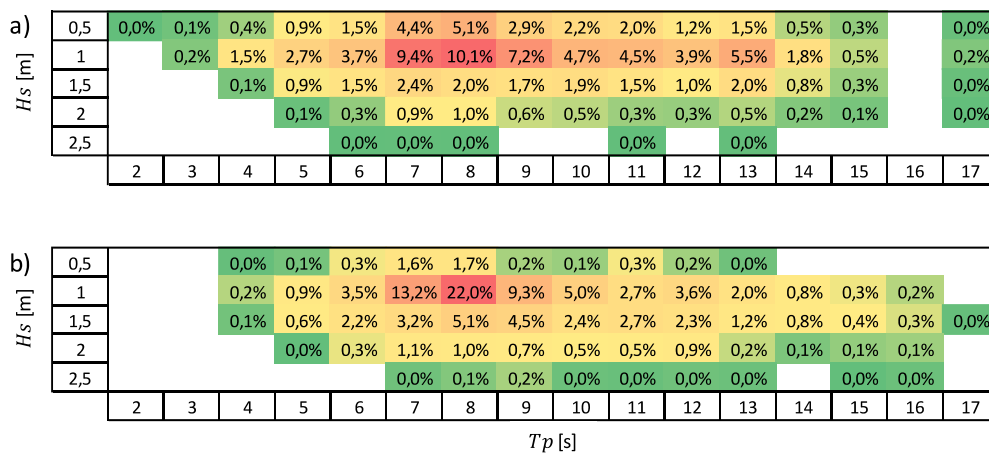


Figura 20 – Mapa de calor exibindo a percentagem de contribuição de diferentes estados marítimos para a energia das ondas de Pontal do Paraná, considerando os dados de a) Boia; e b) ERA5.

A partir do mapa de calor, considerando os dados da boia (Figura 20a) e do ERA5 (Figura 20b), observa-se que há uma concordância entre os dados, sendo as percentagens mais representativas correspondentes a T_p entre 7 e 10 s e H_s entre 0.5 e 1.5 m.

4.1.4. Praia do Cassino, RS

A validação dos dados do modelo de reanálise ERA5 para a localidade da Praia do Cassino foi conduzida considerando o período de coleta de dados da respectiva boia (05/2005–08/2005; 01/2016–10/2016). Foram utilizados 5 587 pares de dados na análise.

A Figura 21 apresenta a comparação entre os valores de H_s , T_p , θ_m e P dos dados da boia e dos dados do ERA5. Esses resultados estão diretamente relacionados aos mapas de calor apresentados na Figura 25.

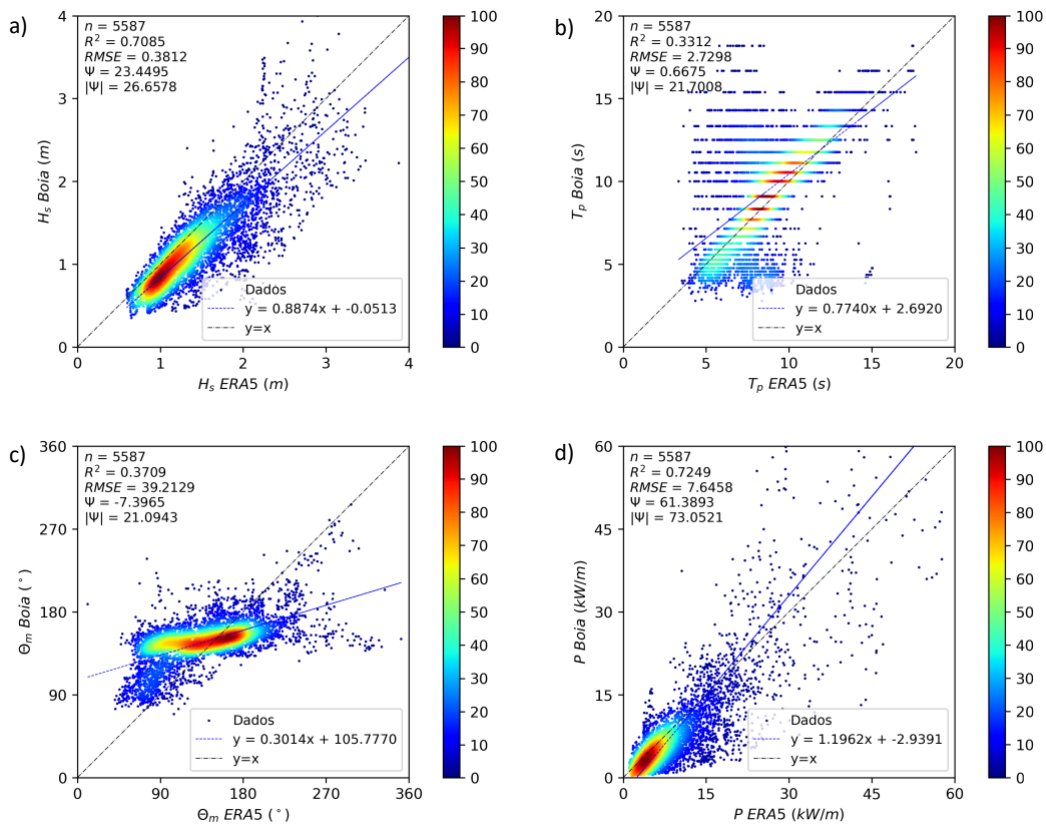


Figura 21 – Gráficos de densidade comparando os dados da boia e do ERA5 (Praia do Cassino) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P .

Através da comparação entre os dados de H_s (Figura 21a), observa-se coeficiente de determinação inferior aos anteriores, mas considerando-se relativamente alto ($R^2 \approx 0.71$), indicando ainda uma boa correlação entre os dados. O valor de $RMSE$ ($RMSE \approx 0.38 m$) é baixo, mas o valor de $bias$ ($\psi \approx 23.45\%$, $|\psi| \approx 26.66\%$) é relativamente alto. Percebe-se que o ERA5 apresenta uma tendência de superestimação em relação aos valores reais.

Para T_p (Figura 21b), percebe-se que há uma grande dispersão dos pontos e, novamente, que existem lacunas entre os intervalos de medição, resultando em um baixo coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0.33$). No entanto, os baixos valores de $RMSE$ ($RMSE \approx 2.73 s$) e $bias$ ($\psi \approx 0.67\%$, $|\psi| \approx 21.70\%$) indicam que há um ajuste razoável entre os dados. No entanto, novamente, observa-se que o ERA5 tende a superestimar os valores reais. Como apontado para a boia do Pontal do Paraná, os dados da boia aparecem descritos por patamares, i.e., a leitura dos dados não permite obter valores contínuos como os dos resultados do ERA5.

No caso de θ_m (Figura 21c), identifica-se uma dispersão considerável entre os dados, o que leva a uma redução do coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0.37$) e uma tendência da curva de ajuste claramente rodada em relação ao que seria de esperar. No entanto, os baixos valores de $RMSE$ ($RMSE \approx 39.21^\circ$) e $bias$ ($\psi \approx -7.40\%$, $|\psi| \approx 21.09\%$) confirmam que há uma concordância entre os dados. Isso deve-se ao facto da maioria dos valores de θ_m se concentrar numa direção

preferencial que se situa ligeiramente abaixo de 180° . Neste caso, o ERA5 tende a subestimar os valores reais.

Ao analisar os dados de P (Figura 21d), observa-se um coeficiente de determinação relativamente alto ($R^2 \approx 0.72$), um valor de $RMSE$ baixo ($RMSE \approx 7.64 \text{ kW/m}$). No entanto, o valor de $bias$ assume valores altos ($\psi \approx 61.39\%$, $|\psi| \approx 73.05\%$). Portanto, assim como em H_s e T_p , o ERA5 apresenta uma tendência de superestimação em relação aos valores reais.

A comparação mensal entre os dados de H_s , T_p , θ_m e P , utilizando os valores médios da boia e do ERA5, é apresentada na Figura 22. De assinalar a falta de medições para os meses de março, novembro e dezembro que não permite estabelecer uma análise anual completa.

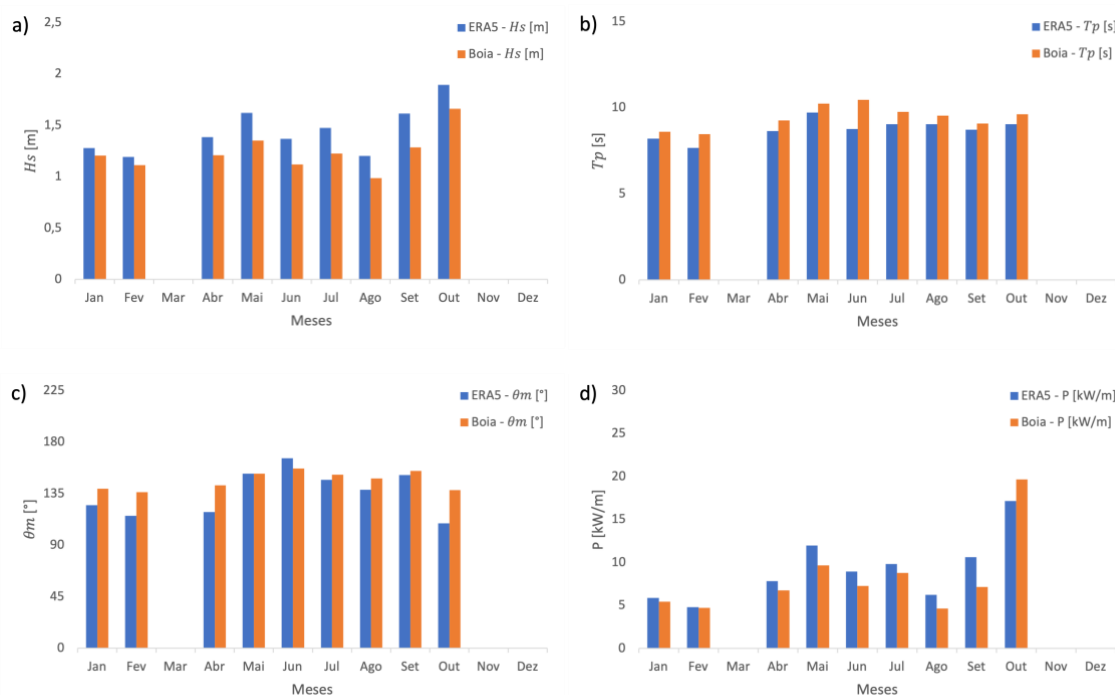


Figura 22 – Comparação mensal entre os dados médios da boia e do ERA5 (Praia do Cassino) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P .

A comparação mensal entre os dados médios do ERA5 e da boia para o parâmetro H_s (Figura 22a) mostra que, em todos os meses, os valores médios do ERA5 são maiores do que os valores médios da boia. Considerando os dados do ERA5, o menor e o maior valor médio de H_s são 1.19 m (no mês de fevereiro) e 1.89 m (no mês de outubro), respetivamente. Os dados de boia, no entanto, apresentam um menor e um maior valor médio de H_s de 0.98 m (no mês de agosto) e 1.66 m (no mês de outubro), respetivamente.

Para T_p (Figura 22b), em comparação com o ERA5, percebe-se que em todos os meses a boia apresenta maiores valores médios. Os dados do ERA5 apresentam um menor e um maior valor médio de T_p de 7.67 s (no mês de fevereiro) e 9.73 s (no mês de maio), respetivamente. Os dados da boia apresentam um menor e um maior valor médio de T_p de 8.47 s (no mês de fevereiro) e 10.45 s (no mês de junho), respetivamente.

Para o parâmetro θ_m (Figura 22c), percebe-se que a boia tende a apresentar maiores valores médios. Há uma exceção, no entanto, no mês de maio, em que ambos apresentam valores médios muito próximos, e no mês de junho, em que os valores médios do ERA5 são superiores aos valores médios da boia. Nesse caso, os dados do ERA5 apresentam um valor médio mínimo e máximo de θ_m de 109.09° (no mês de outubro) e 165.86° (no mês de junho), respectivamente. A boia, por sua vez, apresenta um valor médio mínimo e máximo de θ_m de 136.29° (no mês de fevereiro) e 156.77° (no mês de junho), respectivamente.

A Figura 22d apresenta os valores médios de P , considerando os dados do ERA5 e da boia. Percebe-se que em todos os meses os dados médios da boia são superiores aos dados médios do ERA5, excetuando-se apenas o mês de outubro. Nesse caso, os valores médios mínimo e máximo de P considerando os dados do ERA5 são 4.79 kW/m (no mês de fevereiro) e 17.16 kW/m (no mês de outubro), respectivamente. Considerando os dados da boia, os valores médios mínimo e máximo de P são 4.63 kW/m (no mês de agosto) e 19.67 kW/m (no mês de outubro), respectivamente.

Embora seja observado nas Figura 22a–b que, ao longo de todos os meses, os valores médios do ERA5 são consistentemente maiores do que os valores médios da boia (para H_s e T_p), é importante notar que no mês de outubro ocorre uma inversão dessa tendência. Nesse período, os valores médios de P , baseados nos dados da boia, são maiores em relação aos valores médios do ERA5. Essa disparidade é causada por situações específicas em que os parâmetros H_s e T_p medidos pela boia apresentam valores superiores aos dados do ERA5. Esses dois fatores combinados resultam na diferença observada no mês de outubro.

Portanto, percebe-se que o mês de outubro assume os maiores valores médios de P . Ou seja, nesse caso, é o mês com o maior potencial energético, considerando tanto os dados da boia quanto os dados do ERA5. Por outro lado, considerando os dados do ERA5, o mês de fevereiro é o mês com o menor potencial energético, e considerando os dados da boia, o mês de agosto assume os menores valores médios de P . Na sequência de outubro, considerando os dados da boia, os meses com o maior potencial energético são maio, julho, junho, setembro, abril, janeiro, fevereiro e agosto. Considerando os dados do ERA5, na sequência de outubro, estão os meses de maio, setembro, julho, junho, abril, agosto, janeiro e fevereiro.

Foram avaliados, também, os valores médios de H_s , T_p , θ_m e P e seus respectivos desvios padrão. A Figura 23 apresenta a variação mensal dos parâmetros e seus desvios padrão considerando os dados da boia. A Figura 24 apresenta as informações correspondentes aos dados do ERA5.

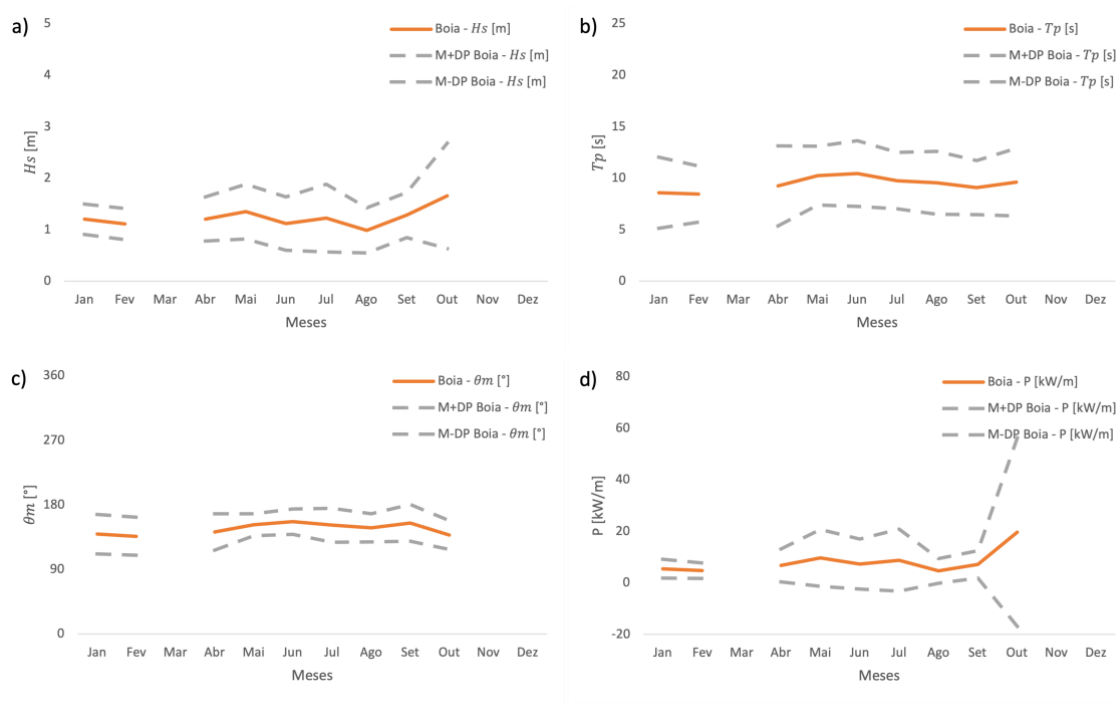


Figura 23 – Variação mensal dos dados médios da boia (Praia do Cassino) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).

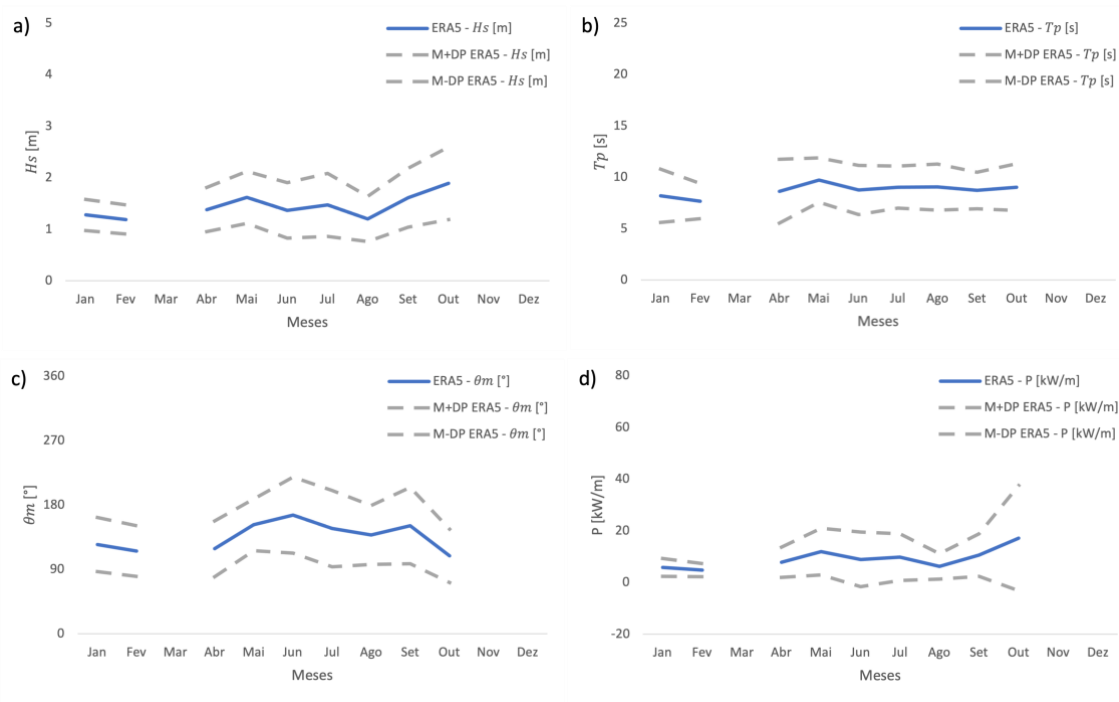


Figura 24 – Variação mensal dos dados médios do ERA5 (Praia do Cassino) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).

As Figura 23 e Figura 24 permitem identificar que, durante o período de análise, o parâmetro H_s apresenta um comportamento de aumento dos seus valores médios a partir do mês de agosto, impactando diretamente nos valores médios de P . No entanto, pela falta de dados para os meses de março, novembro e dezembro, não é possível avaliar com clareza o comportamento da agitação marítima ao longo do ano.

Avaliando o desvio padrão associado ao parâmetro P , considerando os dados da boia (Figura 23d), percebe-se que fevereiro apresenta o menor valor de desvio padrão ($\sigma \approx 2.98 \text{ kW/m}$) e que outubro apresenta o maior valor de desvio padrão ($\sigma \approx 36.55 \text{ kW/m}$). Considerando os dados do ERA5 para o parâmetro P (Figura 24d), o menor valor de desvio padrão está associado ao mês de fevereiro ($\sigma \approx 2.54 \text{ kW/m}$) e o maior valor de desvio padrão está associado ao mês de outubro ($\sigma \approx 20.32 \text{ kW/m}$).

A Figura 25, por sua vez, apresenta os mapas de calor que estão diretamente associados aos gráficos de densidade apresentados na Figura 21a–b.

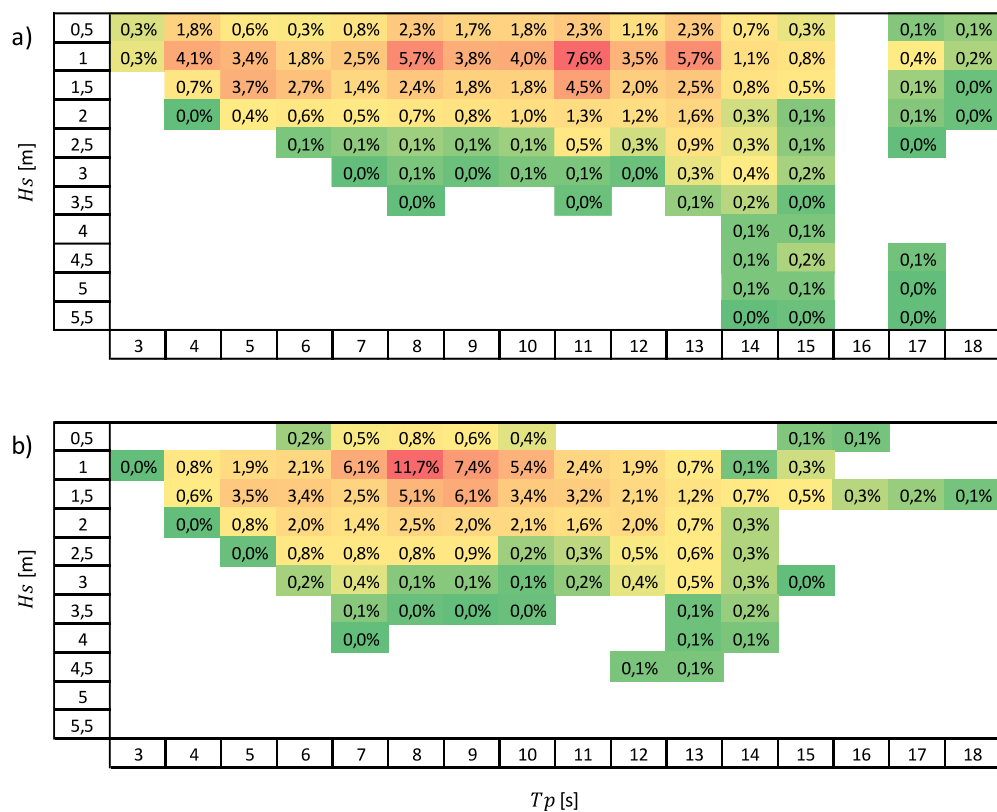


Figura 25 – Mapa de calor exibindo a percentagem de contribuição de diferentes estados marítimos para a energia das ondas da Praia do Cassino, considerando os dados de a) Boia; e b) ERA5.

A partir do mapa de calor, considerando os dados da boia (Figura 25a) e do ERA5 (Figura 25b), observa-se que há uma concordância entre os dados, sendo as percentagens mais representativas correspondentes a T_p entre 7 e 12 s e H_s entre de 1 e 1.5 m.

4.1.5. Praia do Forte, BA

A validação dos dados do modelo de reanálise ERA5 para a localidade da Praia do Forte foi conduzida considerando o período de coleta de dados da respectiva boia (11/2014–02/2019). Foram utilizados 8 480 pares de dados na análise.

A Figura 26 apresenta a comparação entre os valores de H_s , T_p , θ_m e P dos dados da boia e dos dados do ERA5. Esses resultados estão diretamente relacionados aos mapas de calor apresentados na Figura 30.

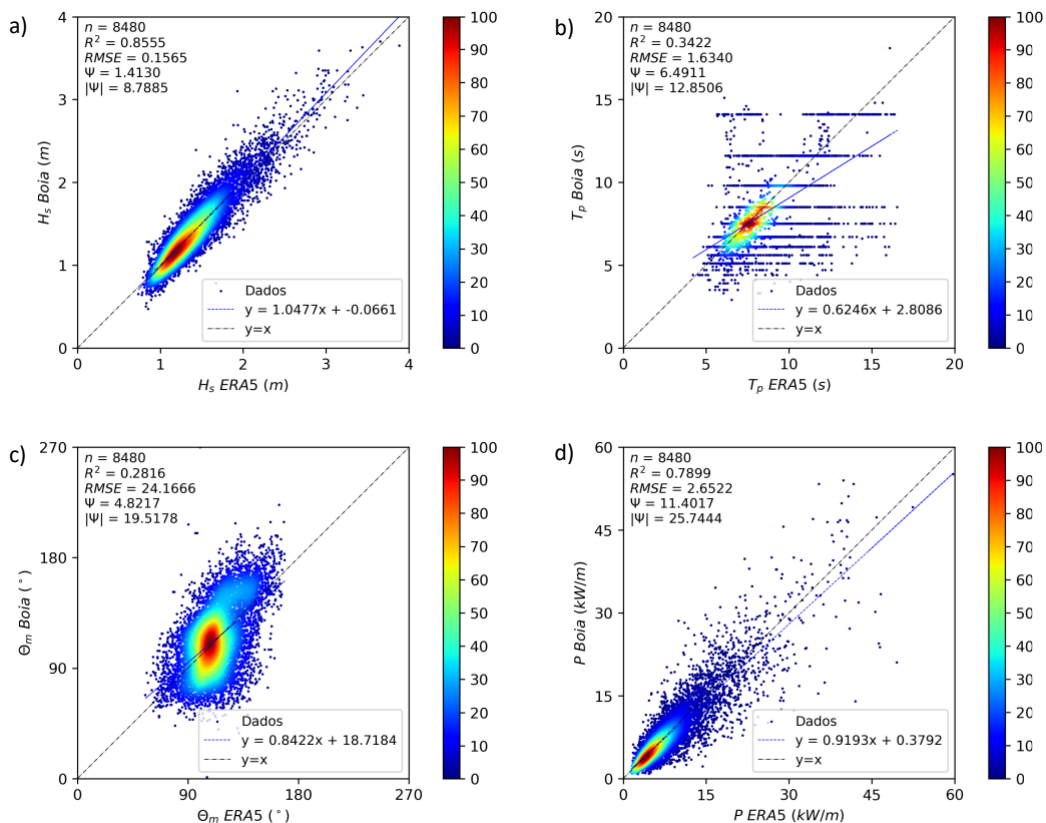


Figura 26 – Comparação mensal entre os dados médios da boia e do ERA5 (Praia do Forte) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P .

A comparação entre os dados de H_s (Figura 26a) revela um alto coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0.85$), indicando uma forte correlação entre os dados. Os baixos valores de $RMSE$ ($RMSE \approx 0.16$ m) e $bias$ ($\psi \approx 1.41\%$, $|\psi| \approx 8.79\%$) confirmam o bom ajuste das estimativas. No entanto, observa-se que o ERA5 apresenta uma ligeira tendência de superestimação em relação aos valores reais.

Para T_p (Figura 26b), percebe-se que há uma considerável dispersão dos pontos e que existem, novamente, lacunas entre os intervalos de medição, resultando em um baixo coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0.34$). No entanto, os baixos valores de $RMSE$ ($RMSE \approx 1.63$ s) e $bias$ ($\psi \approx 6.49\%$, $|\psi| \approx 12.85\%$) indicam que há um ajuste entre os dados porque uma grande maioria dos pontos se concentra sobre a curva de ajuste perfeito de 45° entre os valores medidos e estimados. Novamente, observa-se que o ERA5 tende a superestimar os valores reais.

No caso de θ_m (Figura 26c), identifica-se, novamente, uma considerável dispersão dos pontos, o que leva a um baixo coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0.28$). No entanto, os baixos valores de $RMSE$ ($RMSE \approx 24.17^\circ$) e $bias$ ($\psi \approx 4.82\%$, $|\psi| \approx 19.52\%$) confirmam que há uma concordância entre ambos os dados e que as direções se concentram sobretudo para $\theta_m \approx 100^\circ$. Nesse caso, novamente, o ERA5 tende a superestimar os valores reais.

Ao analisar os dados de P (Figura 26d), observa-se um alto coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0.80$) e baixos valores de $RMSE$ ($RMSE \approx 2.65 \text{ kW/m}$) e $bias$ ($\psi \approx 11.40\%$, $|\psi| \approx 25.74\%$). Portanto, assim como em H_s e T_p , o ERA5 apresenta uma tendência de superestimação em relação aos valores reais.

A comparação mensal entre os dados de H_s , T_p , θ_m e P , utilizando os valores médios da boia e do ERA5, é apresentada na Figura 27.

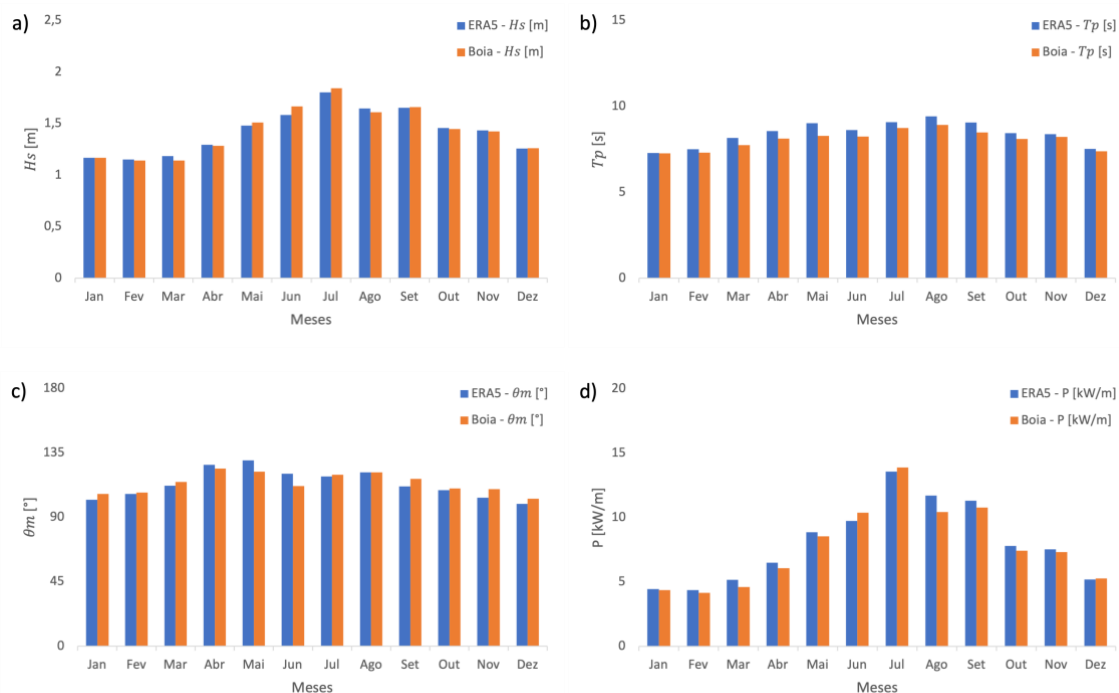


Figura 27 – Comparação mensal entre os dados médios da boia e do ERA5 (Praia do Forte, BA) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P .

A comparação mensal entre os dados médios do ERA5 e da boia para o parâmetro H_s (Figura 27a) mostra que, em todos os meses, os valores médios de ambos são muito próximos. A maior diferença entre os valores médios ocorre no mês de junho, sendo uma diferença de 0.08 m. Considerando os dados do ERA5, o menor e o maior valor médio de H_s são 1.15 m (no mês de fevereiro) e 1.80 m (no mês de julho), respectivamente. Os dados de boia, no entanto, apresentam um menor e um maior valor médio de H_s de 1.14 m (no mês de março) e 1.84 m (no mês de julho), respectivamente. Assinala-se que o bom ajuste de H_s observado é curioso porque o ponto da boia encontra-se muito

perto da costa. Seria de esperar alguma dissipação de energia e, conseqüentemente, menores valores de H_s comparativamente à localização do ponto ERA5.

Para T_p (Figura 27b), em comparação com a boia, percebe-se que em todos os meses o ERA5 apresenta maiores valores médios, com exceção do mês de janeiro, no qual os valores médios de ambos são muito próximos. Os dados do ERA5 apresentam um menor e um maior valor médio de T_p de 7.29 s (no mês de janeiro) e 9.42 s (no mês de agosto), respetivamente. Os dados da boia apresentam um menor e um maior valor médio de T_p de 7.27 s (no mês de janeiro) e 8.92 s (no mês de agosto), respetivamente, concluindo-se que a diferença entre as duas bases de dados é pequena, como espectável.

Para o parâmetro θ_m (Figura 27c), percebe-se que os valores médios do ERA5 e da boia são próximos, assim como no parâmetro H_s . A maior diferença entre os valores médios ocorre, novamente, no mês de junho, sendo uma diferença de 8.58° . Nesse caso, os dados do ERA5 apresentam um valor médio mínimo e máximo de θ_m de 99.48° (no mês de dezembro) e 129.86° (no mês de maio), respetivamente. A boia, por sua vez, apresenta um valor médio mínimo e máximo de θ_m de 103.00° (no mês de dezembro) e 124.01° (no mês de abril), respetivamente.

A Figura 27d apresenta os valores médios de P , considerando os dados do ERA5 e da boia. Com exceção dos meses de junho, julho e dezembro, nos demais meses os dados médios da boia são superiores aos dados médios do ERA5. Nesse caso, os valores médios mínimo e máximo de P considerando os dados do ERA5 são 4.36 kW/m (no mês de fevereiro) e 13.56 kW/m (no mês de julho), respetivamente. Considerando os dados da boia, os valores médios mínimo e máximo de P são quase similares de 4.16 kW/m (no mês de fevereiro) e 13.87 kW/m (no mês de julho), respetivamente.

Portanto, percebe-se que o mês de julho assume os maiores valores médios de P . Ou seja, nesse caso, é o mês com o maior potencial energético, considerando tanto os dados da boia quanto os dados do ERA5. Por outro lado, o mês de fevereiro assume os menores valores médios de P . Na sequência de julho, considerando os dados da boia, os meses com o maior potencial energético são setembro, agosto, junho, maio, outubro, novembro, abril, dezembro, março, janeiro e fevereiro. Considerando os dados do ERA5, na sequência de julho, estão os meses de agosto, setembro, junho, maio, outubro, novembro, abril, dezembro, março, janeiro e fevereiro.

A Figura 28 apresenta a variação mensal média de H_s , T_p , θ_m e P e seus desvios padrão considerando os dados da boia. A Figura 29 apresenta as informações correspondentes aos dados do ERA5.

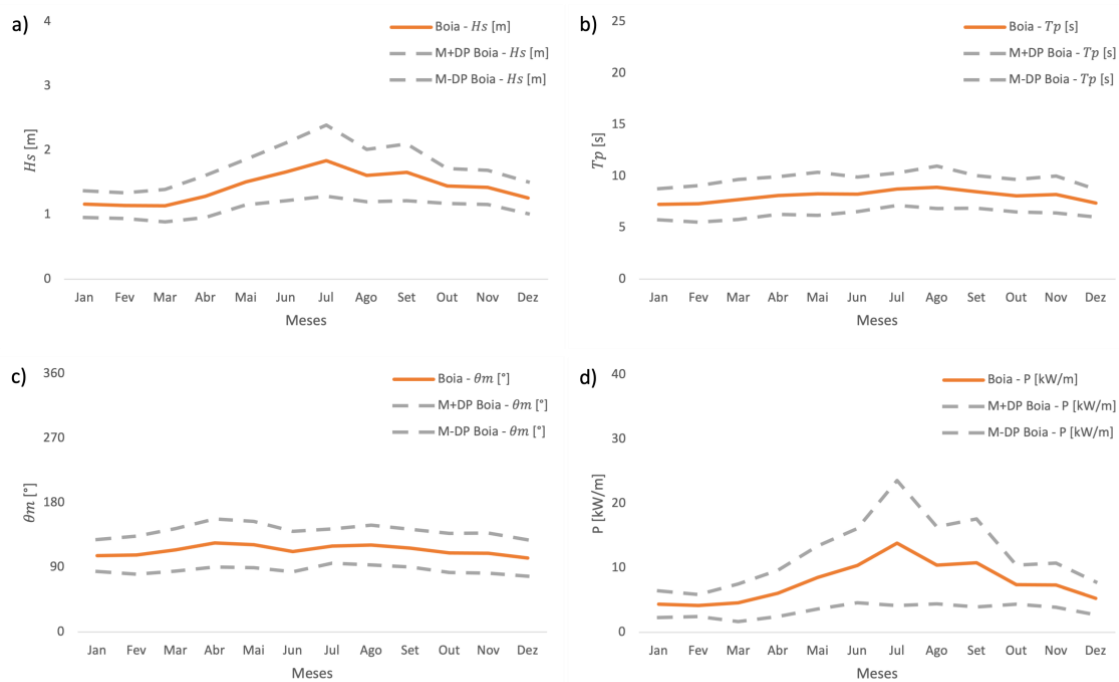


Figura 28 – Variação mensal dos dados médios da boia (Praia do Forte) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).

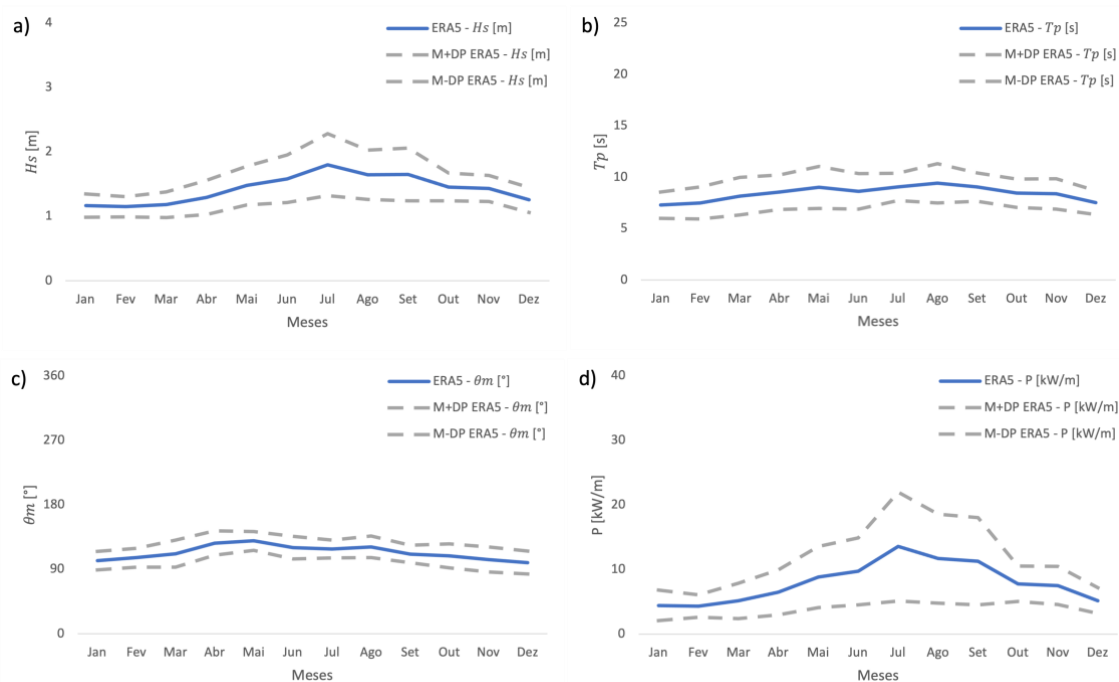


Figura 29 – Variação mensal dos dados médios do ERA5 (Praia do Forte) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).

As Figura 28 e Figura 29 permitem identificar que, durante o período de análise, os valores médios de H_s apresentam maiores valores médios entre os meses de março e novembro (especialmente no período do inverno brasileiro, que ocorre entre os meses de junho e setembro), impactando diretamente nos valores médios de P .

Avaliando o desvio padrão associado ao parâmetro P , considerando os dados da boia (Figura 28d) percebe-se que fevereiro apresenta o menor valor de desvio padrão ($\sigma \approx 1.71 \text{ kW/m}$) e que julho apresenta o maior valor de desvio padrão ($\sigma \approx 9.69 \text{ kW/m}$). Considerando os dados do ERA5 para o parâmetro P (Figura 29d), o menor valor de desvio padrão está associado ao mês de fevereiro ($\sigma \approx 1.75 \text{ kW/m}$) e o maior valor de desvio padrão está associado ao mês de julho ($\sigma \approx 8.43 \text{ kW/m}$).

A Figura 30, por sua vez, apresenta os mapas de calor que estão diretamente associados aos gráficos de densidade apresentados na Figura 26a–b.

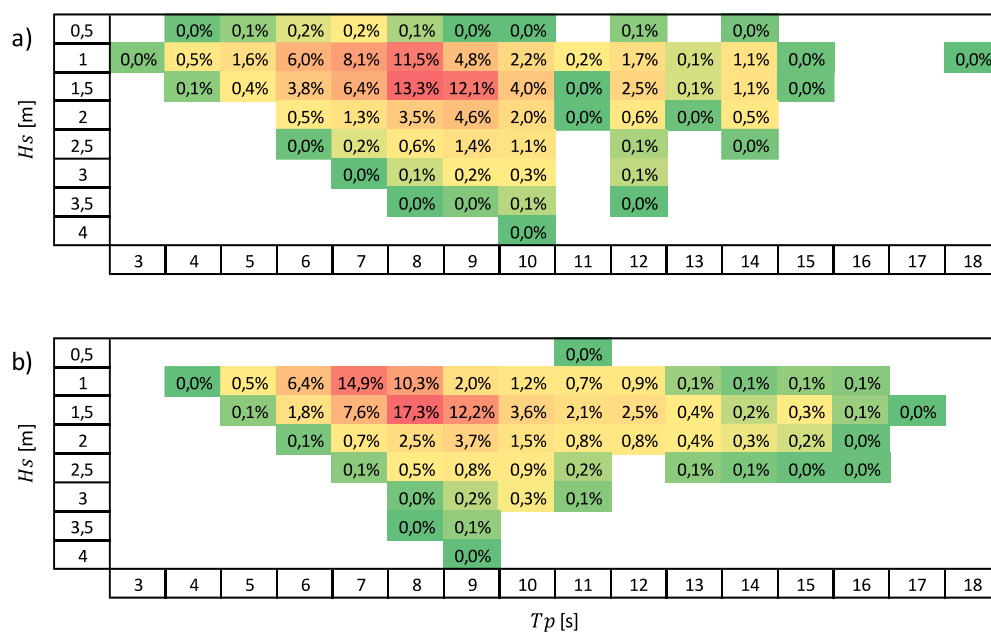


Figura 30 – Mapa de calor exibindo a percentagem de contribuição de diferentes estados marítimos para a energia das ondas da Praia do Forte, considerando os dados de a) Boia; e b) ERA5.

A partir do mapa de calor, considerando os dados da boia (Figura 30a) e do ERA5 (Figura 30b), observa-se que há uma concordância entre os dados, sendo as percentagens mais representativas correspondentes a T_p entre 6 e 10 s e H_s entre de 1 e 2 m.

4.1.6. Rio de Janeiro, RJ

A validação dos dados do modelo de reanálise ERA5 para a localidade do Rio de Janeiro foi conduzida considerando o período de coleta de dados da respectiva boia (08/2015–06/2016). Foram utilizados 7 066 pares de dados na análise.

A Figura 31 apresenta a comparação entre os valores de H_s , T_p , θ_m e P dos dados da boia e dos dados do ERA5.

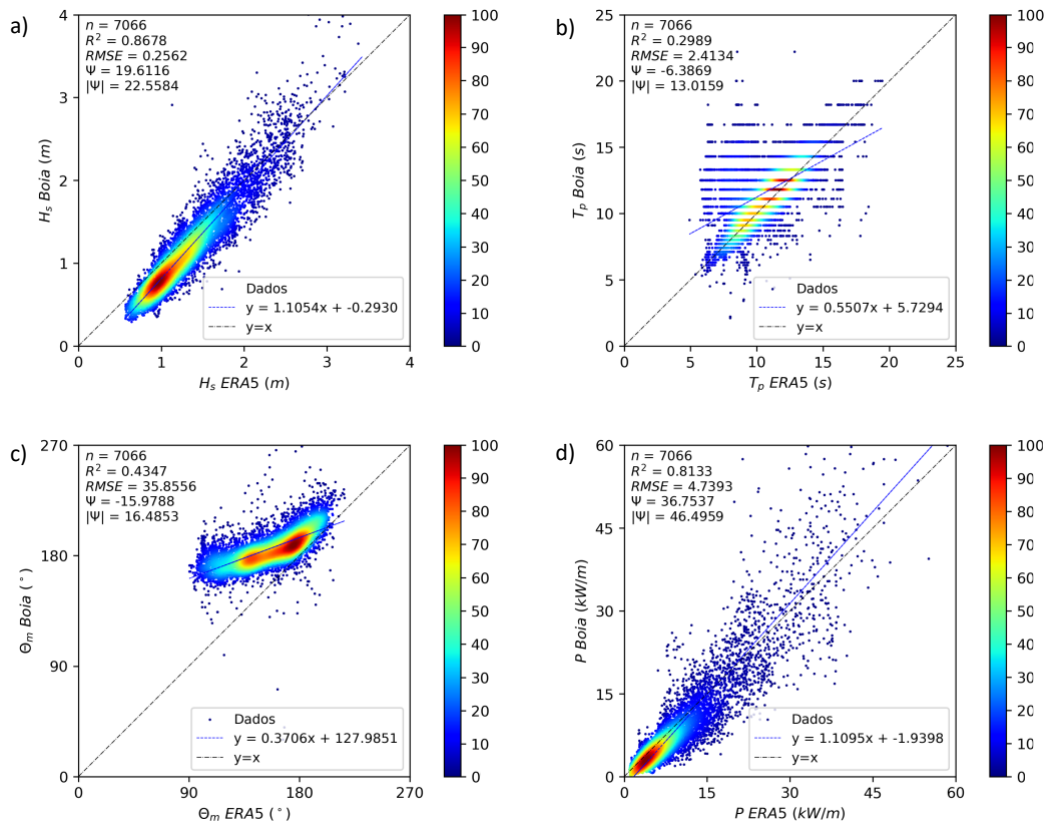


Figura 31 – Comparação mensal entre os dados médios da boia e do ERA5 (Rio de Janeiro) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P .

Através da comparação entre os dados de H_s (Figura 31a), observa-se um alto coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0.87$), indicando uma forte correlação entre os dados. O valor de $RMSE$ ($RMSE \approx 0.26$ m) é baixo, no entanto, o valor de $bias$ ($\psi \approx 19.61\%$, $|\psi| \approx 22.56\%$) é relativamente alto. Portanto, percebe-se que o ERA5 apresenta uma tendência de superestimação em relação aos valores reais.

Para T_p (Figura 31b), percebe-se que há uma considerável dispersão dos pontos e que existem, novamente, lacunas entre os intervalos de medição, resultando em um baixo coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0.30$). No entanto, os baixos valores de $RMSE$ ($RMSE \approx 2.41$ s) e $bias$ ($\psi \approx -6.39\%$, $|\psi| \approx 13.01\%$) indicam que há um bom ajuste entre os dados, observando-se que o ERA5 tende a subestimar os valores reais.

No caso de θ_m (Figura 31c), identifica-se uma dispersão considerável entre os dados, o que leva a uma redução do coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0.43$). No entanto, os baixos valores de $RMSE$ ($RMSE \approx 35.85^\circ$) e $bias$ ($\psi \approx -15.98\%$, $|\psi| \approx 16.48\%$) confirmam que há uma concordância entre os dados. Neste caso, o ERA5 tende a subestimar os valores reais e observa-se uma rotação da reta de ajuste face ao que se seria de esperar. Isso reflete uma rotação das ondas entre as duas localizações (ERA5 e boia). Embora ambos os pontos estejam muito próximos da linha de costa, a

localização da boia parece estar localizada numa embocadura, podendo ser a causa da rotação da direção das ondas relativamente aos dados do ERA5.

Ao analisar os dados de P (Figura 31d), observa-se um alto coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0.81$), um valor de $RMSE$ baixo ($RMSE \approx 4.74 \text{ kW/m}$). No entanto, o valor de $bias$ assume valores relativamente altos ($\psi \approx 36.75\%$, $|\psi| \approx 46.49\%$). Portanto, assim como em H_s e T_p , o ERA5 apresenta uma tendência de superestimação em relação aos valores reais.

A comparação mensal entre os dados de H_s , T_p , θ_m e P , utilizando os valores médios da boia e do ERA5, é apresentada na Figura 32. Assinala-se que não há dados para o mês de julho, comprometendo uma análise anual completa.

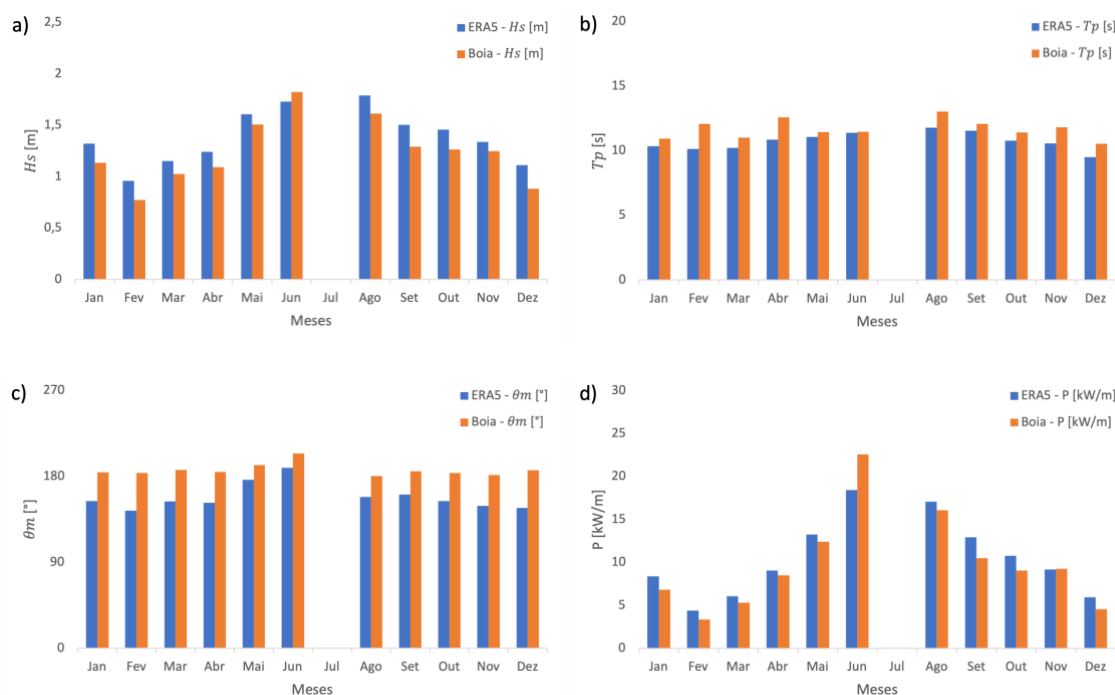


Figura 32 – Comparação mensal entre os dados médios da boia e do ERA5 (Rio de Janeiro, RJ) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P .

A comparação mensal entre os dados médios do ERA5 e da boia para o parâmetro H_s (Figura 32a) mostra que em todos os meses os valores médios do ERA5 são maiores do que os valores médios da boia, com exceção do mês de junho. Considerando os dados do ERA5, o menor e o maior valor médio de H_s são 0.96 m (no mês de fevereiro) e 1.79 m (no mês de agosto), respetivamente. Os dados de boia, no entanto, apresentam um menor e um maior valor médio de H_s de 0.77 m (no mês de fevereiro) e 1.82 m (no mês de junho), respetivamente.

Para T_p (Figura 32b), em comparação com o ERA5, percebe-se que em todos os meses a boia apresenta maiores valores médios, com exceção do mês de junho, no qual os valores médios de ambos são muito próximos. Os dados do ERA5 apresentam um menor e um maior valor médio de T_p de 9.50 s (no mês de dezembro) e 11.79 s (no mês de agosto), respetivamente. Os dados da boia

apresentam um menor e um maior valor médio de T_p de 10.54 s (no mês de dezembro) e 13.03 s (no mês de agosto), respetivamente.

Para o parâmetro θ_m (Figura 32c), em comparação com o ERA5, percebe-se que em todos os meses a boia apresenta maiores valores médios. Nesse caso, os dados do ERA5 apresentam um valor médio mínimo e máximo de θ_m de 144.16° (no mês de fevereiro) e 189.03° (no mês de junho), respetivamente. A boia, por sua vez, apresenta um valor médio mínimo e máximo de θ_m de 180.29° (no mês de agosto) e 204.17° (no mês de junho), respetivamente.

A Figura 32d apresenta os valores médios de P , considerando os dados do ERA5 e da boia. Com exceção do mês de junho, no qual o valor médio da boia supera o valor médio do ERA5, e do mês de novembro, no qual os valores médios de ambos são muito próximos, o ERA5 apresenta maiores valores médios. Nesse caso, os valores médios mínimo e máximo de P considerando os dados do ERA5 são 4.38 kW/m (no mês de fevereiro) e 18.42 kW/m (no mês de junho), respetivamente. Considerando os dados da boia, os valores médios mínimo e máximo de P são 3.37 kW/m (no mês de fevereiro) e 22.56 kW/m (no mês de junho), respetivamente.

O mês de junho assume os maiores valores médios de P . Ou seja, nesse caso, é o mês com o maior potencial energético, considerando tanto os dados da boia quanto os dados do ERA5. Por outro lado, o mês de fevereiro assume os menores valores médios de P . Na sequência de junho, considerando os dados da boia, os meses com o maior potencial energético são agosto, maio, setembro, novembro, outubro, abril, janeiro, março, dezembro e fevereiro. Considerando os dados do ERA5, na sequência de junho, estão os meses de agosto, maio, setembro, outubro, novembro, abril, janeiro, março, dezembro e fevereiro.

A Figura 33 apresenta a variação mensal média de H_s , T_p , θ_m e P e seus desvios padrão considerando os dados da boia. A Figura 34 apresenta as informações correspondentes aos dados do ERA5.

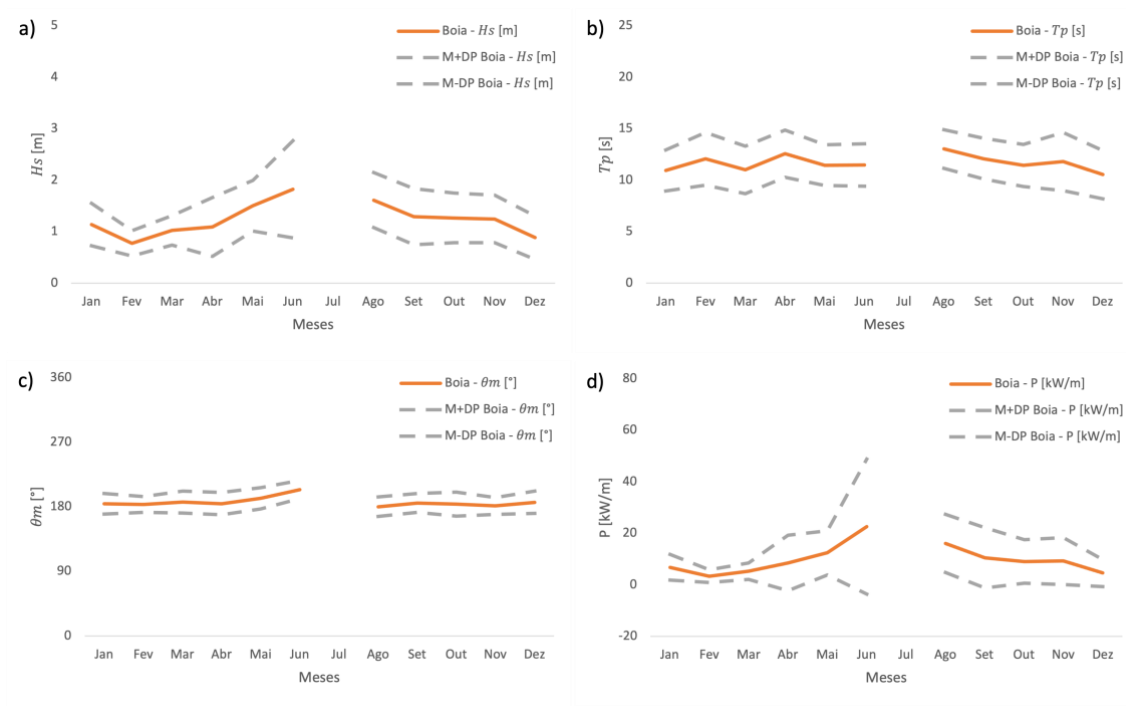


Figura 33 – Variação mensal dos dados médios da boia (Rio de Janeiro) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).

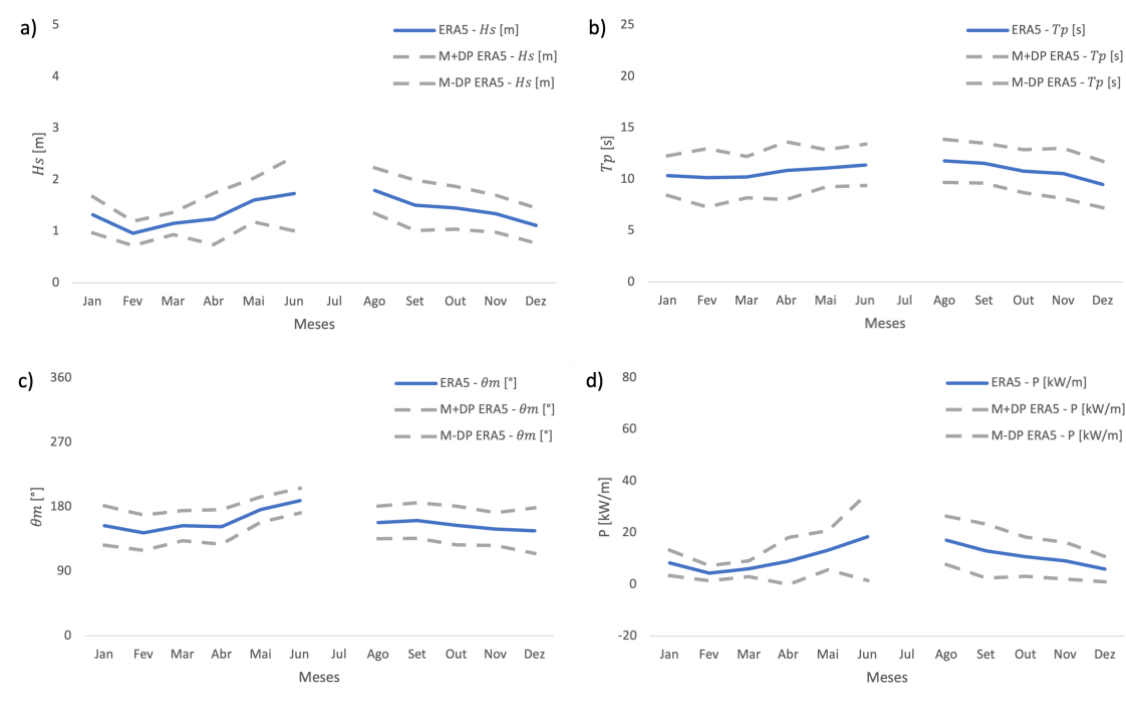


Figura 34 – Variação mensal dos dados médios do ERA5 (Rio de Janeiro) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).

As Figura 33 e Figura 34 permitem identificar que, durante o período de análise, os valores médios de H_s tendem a apresentar maiores valores médios entre os meses de abril e setembro, impactando diretamente nos valores de P . No entanto, pela falta de dados para o mês de julho, não é possível avaliar com clareza o comportamento da agitação marítima nesse período.

Avaliando o desvio padrão associado ao parâmetro P , considerando os dados da boia (Figura 33d), percebe-se que fevereiro apresenta o menor valor de desvio padrão ($\sigma \approx 2.42 \text{ kW/m}$) e que junho apresenta o maior valor de desvio padrão ($\sigma \approx 26.17 \text{ kW/m}$). Considerando os dados do ERA5 para o parâmetro P (Figura 34d), o menor valor de desvio padrão está associado ao mês de fevereiro ($\sigma \approx 2.97 \text{ kW/m}$) e o maior valor de desvio padrão está associado ao mês de junho ($\sigma \approx 16.86 \text{ kW/m}$).

A Figura 35, por sua vez, apresenta os mapas de calor que estão diretamente associados aos gráficos de densidade apresentados na Figura 31a–b.

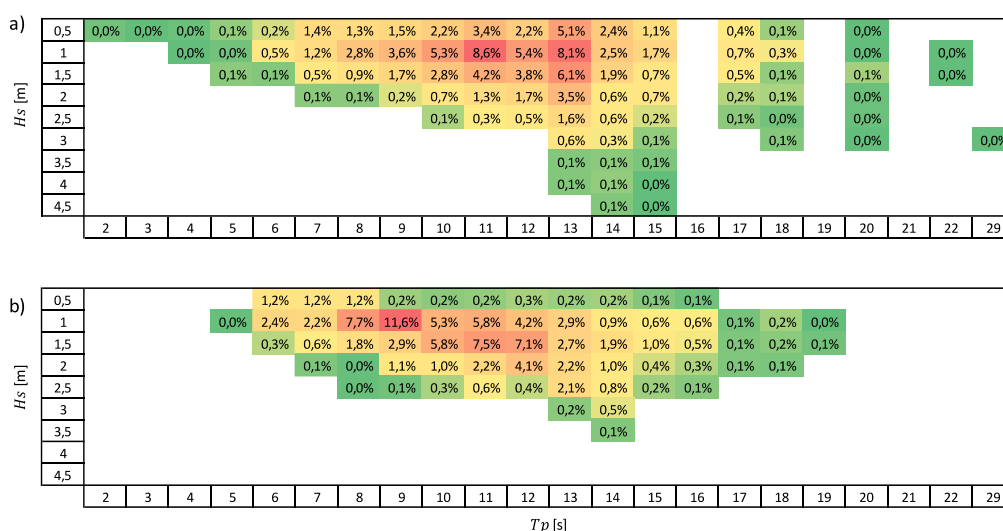


Figura 35 – Mapa de calor exibindo a percentagem de contribuição de diferentes estados marítimos para a energia das ondas do Rio de Janeiro, considerando os dados de a) Boia; e b) ERA5.

A partir do mapa de calor, considerando os dados da boia (Figura 35a) e do ERA5 (Figura 35b), observa-se que há uma concordância entre os dados, sendo as percentagens mais representativas correspondentes a T_p entre 7 e 13 s e H_s entre 1 e 2 m.

4.1.7. Tramandaí, RS

A validação dos dados do modelo de reanálise ERA5 para a localidade de Tramandaí foi conduzida considerando o período de coleta de dados da boia (11/1962–06/1963; 08/1963–09/1963; 11/2006–09/2007; 12/2013; 01/2014–03/2014; 06/2014–12/2014; 01/2015–05/2015; 01/2016–07/2016). Foram utilizados 9 074 pares de dados na análise.

A Figura 36 apresenta a comparação entre os valores de H_s , T_p , θ_m e P dos dados da boia e dos dados do ERA5.

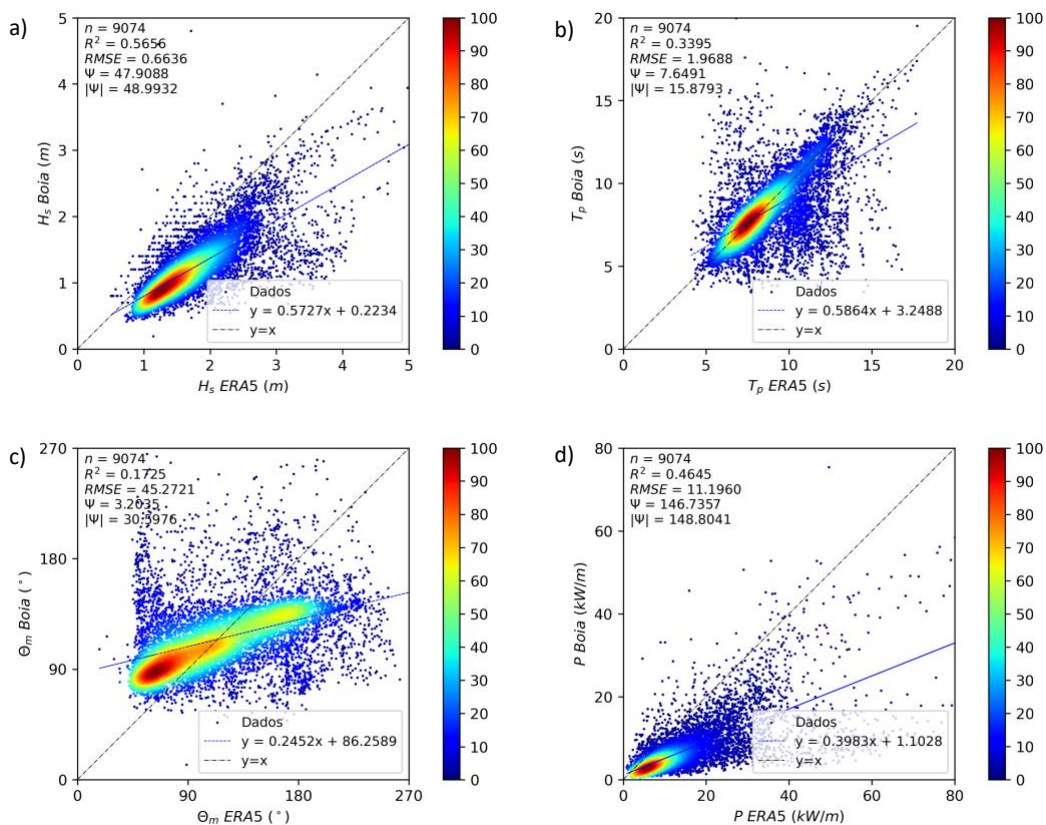


Figura 36 – Comparação mensal entre os dados médios da boia e do ERA5 (Tramandaí) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P .

Através da comparação entre os dados de H_s (Figura 36a), observa-se um coeficiente de determinação relativamente baixo ($R^2 \approx 0.56$), se comparado às outras localidades validadas. Isso indica que há correlação entre os dados, no entanto, não é uma correlação de caráter forte. O valor de $RMSE$ ($RMSE \approx 0.22$ m) é baixo, no entanto, o valor de $bias$ ($\psi \approx 47.91\%$, $|\psi| \approx 48.99\%$) é relativamente alto. Portanto, percebe-se que o ERA5 apresenta uma tendência de superestimação em relação aos valores reais. Este comportamento é compreensível e esperado na medida em que a boia se encontra muito próxima da costa e o ponto ERA5 muito mais afastado. Haverá, por conseguinte, uma dissipação de energia das ondas à medida que estas se propagam para a costa.

Para T_p (Figura 36b), percebe-se que há uma considerável dispersão dos pontos, resultando em um baixo coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0.34$). De notar que, neste caso, os registos da boia de T_p são valores contínuos e não discretos como evidenciado em muitas das boias anteriores. Os baixos valores de $RMSE$ ($RMSE \approx 1.97$ s) e $bias$ ($\psi \approx 7.65\%$, $|\psi| \approx 15.88\%$) indicam que há um bom ajuste entre os dados, refletindo que a maioria dos resultados encontra-se sobre a reta de ajuste perfeito. De uma forma geral, observa-se que o ERA5 tende a superestimar os valores reais.

No caso de θ_m (Figura 36c), identifica-se uma dispersão considerável entre os dados, o que leva a uma redução do coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0.17$). Além disso, os valores de $RMSE$ ($RMSE \approx 45.27^\circ$) e $bias$ ($\psi \approx 3.20\%$, $|\psi| \approx 30.60\%$) são altos. Há uma baixa concordância entre os dados e, novamente, o ERA5 tende a superestimar os valores reais. A rotação da reta de ajuste

pode ser justificada pelo facto da boia se localizar muito perto da costa e ter havido uma rotação das ondas (por exemplo, por refração).

Ao analisar os dados de P (Figura 36d), observa-se um coeficiente de determinação relativamente bom ($R^2 \approx 0.74$), juntamente com altos valores de $RMSE$ ($RMSE \approx 11.20 \text{ kW/m}$) e de $bias$ ($\psi \approx 146.73\%$, $|\psi| \approx 148.80\%$). Percebe-se que há uma forte tendência do ERA5 superestimar os valores reais em cerca do dobro, que é reflexo direto do comportamento observado para H_s .

A comparação mensal entre os dados de H_s , T_p , θ_m e P , utilizando os valores médios da boia e do ERA5, é apresentada na Figura 37.

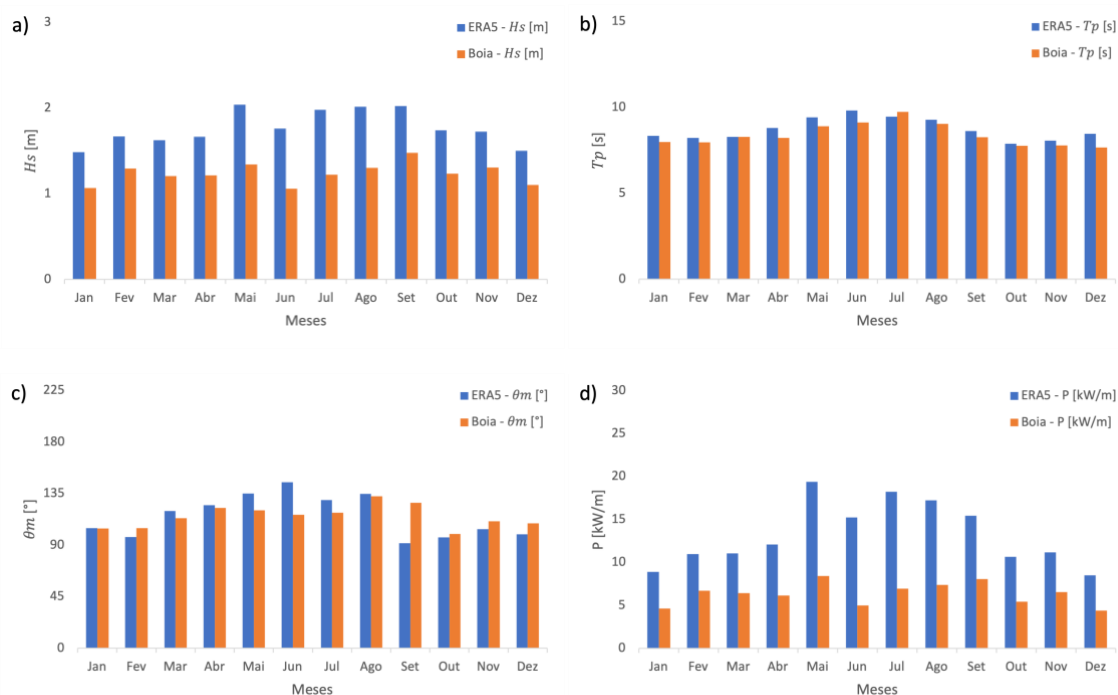


Figura 37 – Comparação mensal entre os dados médios da boia e do ERA5 (Tramandaí, RS) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P .

A comparação mensal entre os dados médios do ERA5 e da boia para o parâmetro H_s (Figura 37a) mostra que, em todos os meses, os valores médios do ERA5 são maiores do que os valores médios da boia. Considerando os dados do ERA5, o menor e o maior valor médio de H_s são 1.49 m (no mês de janeiro) e 2.04 m (no mês de maio), respetivamente. Os dados de boia, no entanto, apresentam um menor e um maior valor médio de H_s de 1.06 m (no mês de junho) e 1.48 m (no mês de setembro), respetivamente.

Para T_p (Figura 37b), em comparação com a boia, percebe-se que o ERA5 tende a apresentar, ligeiramente, maiores valores médios. Há uma exceção, no entanto, no mês de março, em que ambos apresentam valores médios muito próximos, e no mês de julho, em que os valores médios da boia são ligeiramente superiores aos valores médios do ERA5. Os dados do ERA5 apresentam um menor e um maior valor médio de T_p de 7.89 s (no mês de outubro) e 9.82 s (no mês de junho), respetivamente. Os dados da boia apresentam um menor e um maior valor médio de T_p de 7.66 s

(no mês de dezembro) e 9.75 s (no mês de julho), respetivamente. Este comportamento muito similar entre dados medidos e estimados é muito bom, pois seria de esperar um comportamento de T_p semelhante entre as duas localizações (boia e ERA5).

Para o parâmetro θ_m (Figura 37c), percebe-se que entre os meses de março e agosto os valores médios do ERA5 são superiores aos valores médios da boia. Nos outros meses (setembro, outubro, novembro, dezembro e fevereiro), os valores médios da boia são superiores aos valores médios do ERA5 e no mês de janeiro ambos apresentam valores médios muito próximos. Nesse caso, os dados do ERA5 apresentam um valor médio mínimo e máximo de θ_m de 91.77° (no mês de setembro) e 144.87° (no mês de junho), respetivamente. A boia, por sua vez, apresenta um valor médio mínimo e máximo de θ_m de 99.72° (no mês de outubro) e 132.69° (no mês de agosto), respetivamente.

A Figura 37d apresenta os valores médios de P , considerando os dados do ERA5 e da boia. Em todos os meses os valores médios do ERA5 são consideravelmente superiores aos valores médios da boia. Nesse caso, os valores médios mínimo e máximo de P considerando os dados do ERA5 são 8.49 kW/m (no mês de dezembro) e 19.41 kW/m (no mês de maio), respetivamente. Considerando os dados da boia, os valores médios mínimo e máximo de P são 4.38 kW/m (no mês de dezembro) e 8.43 kW/m (no mês de maio), respetivamente. O mês de maio assume os maiores valores médios de P . Ou seja, nesse caso, é o mês com o maior potencial energético, considerando tanto os dados da boia quanto os dados do ERA5. Por outro lado, o mês de dezembro assume os menores valores médios de P . Na sequência de maio, considerando os dados da boia, os meses com o maior potencial energético são setembro, agosto, julho, fevereiro, novembro, março, abril, outubro, junho, janeiro e dezembro. Considerando os dados do ERA5, na sequência de maio, estão os meses de julho, agosto, setembro, junho, abril, novembro, março, fevereiro, outubro, janeiro e dezembro.

A Figura 38 apresenta a variação média de H_s , T_p , θ_m e P e seus desvios padrão considerando os dados da boia. A Figura 39 apresenta as informações correspondentes aos dados do ERA5.

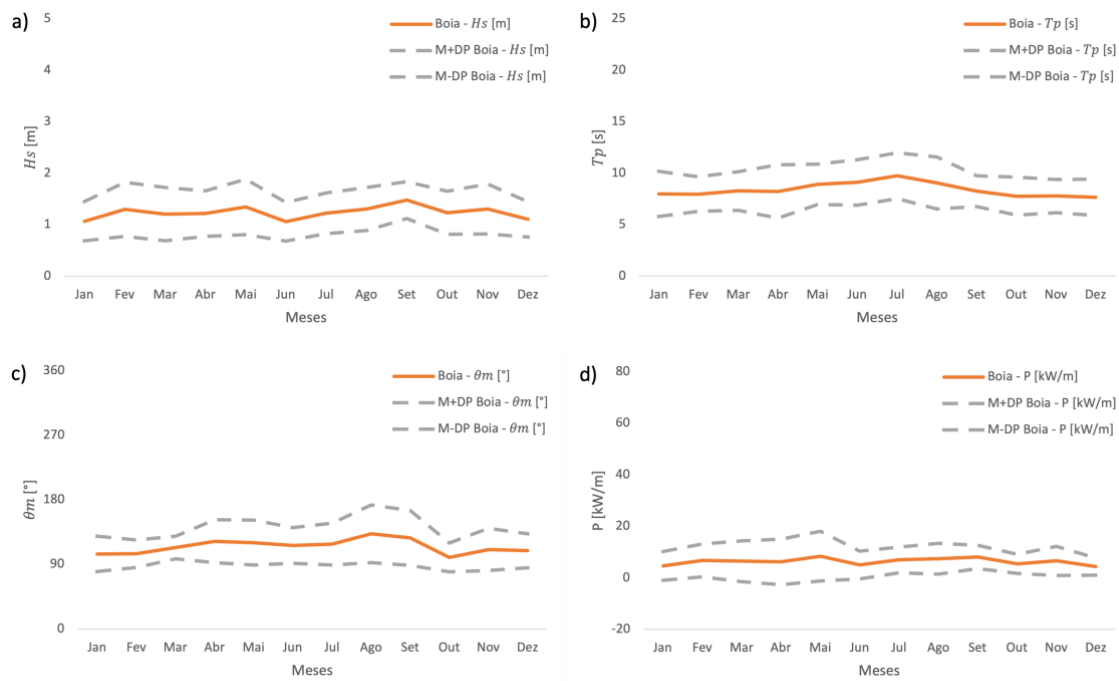


Figura 38 – Variação mensal dos dados médios da boia (Tramandaí) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).

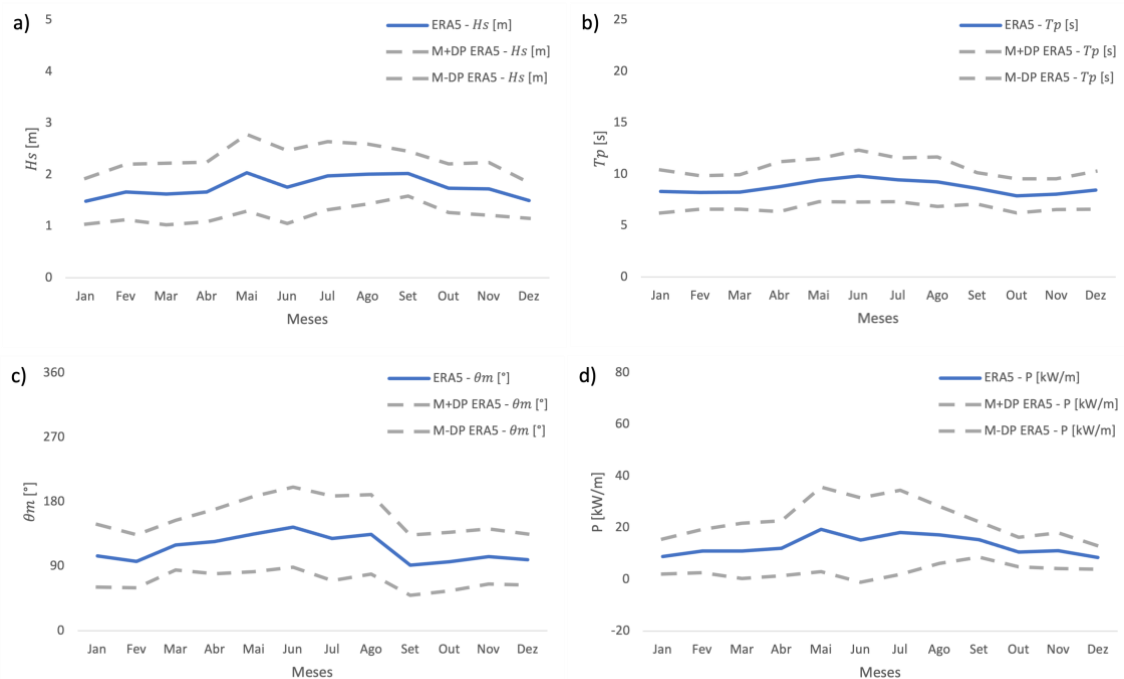


Figura 39 – Variação mensal dos dados médios do ERA5 (Tramandaí) para a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P . As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).

4.2. Caracterização da energia das ondas do Porto de Sines (Sines, Portugal)

4.2.1. Variabilidade anual

No âmbito da análise da variabilidade anual da região do Porto de Sines, a Figura 41 ilustra a variação anual dos parâmetros H_s e T_p ao longo do período de análise (entre 1940 e 2020). Ao longo das oito décadas, os valores médios anuais de H_s variam de 1.54 m (1944) a 2.04 m (2002) enquanto os valores médios de T_p variam de 10.25 s (1969) e 11.62 s (ano 2018). Ainda, pode-se perceber através da linha de tendência de cada um dos parâmetros que os valores médios têm apresentado um ligeiro aumento ao longo das oito décadas de análise.

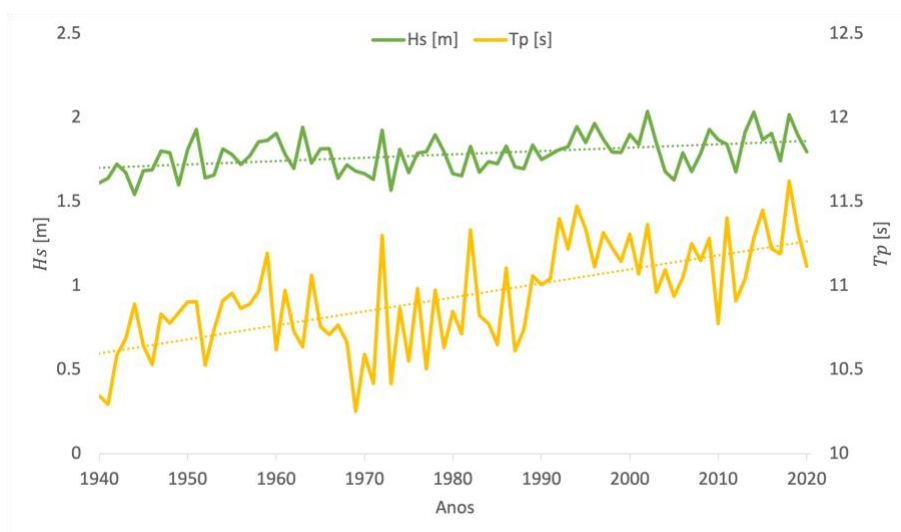


Figura 41 – Variação dos parâmetros H_s e T_p na região do Porto de Sines ao longo de 81 anos (de 1940 até 2020).

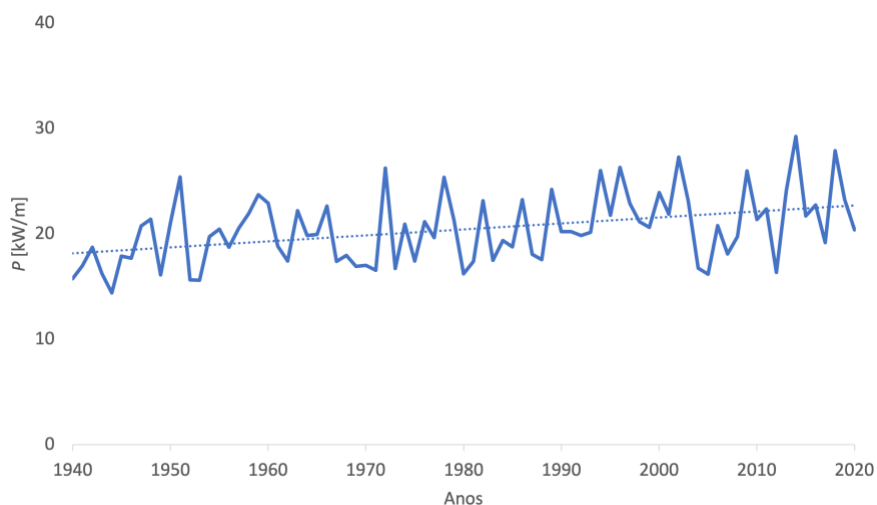


Figura 42 – Variação de P na região do Porto de Sines ao longo de 81 anos (de 1940 até 2020).

A Figura 42, por sua vez, ilustra a variação anual de P (calculada através da Equação (5)) ao longo das oito décadas de análise. Pode-se observar que os valores médios anuais variam de 14.41 kW/m (1944) a 29.24 kW/m (2014). Assim como observado em H_s e T_p , percebe-se, através da linha de tendência de P , que o parâmetro apresenta um aumento ao longo das décadas. Esse resultado está diretamente relacionado ao aumento do período de pico e da altura significativa, pelo que, sabe-se que o potencial energético é proporcional ao período e ao quadrado da altura significativa.

Em média, na região de Sines entre os anos de 1940 e 2020, os dados do ERA5 conduzem a um valor de P igual a 20.42 kW/m \pm 3.27 kW/m. Esses resultados corroboram com os valores apresentados por Mota e Pinto (2014) em um estudo sobre sete pontos da costa portuguesa, considerando dados entre os anos de 1995 e 2010. No estudo, para um ponto de análise *offshore*, foram encontrados valores médios de P de 21.51 kW/m \pm 3.60 kW/m. Já para um ponto *nearshore* (a 50 m de profundidade), foram encontrados valores médios de P de 18.81 kW/m \pm 3.07 kW/m.

Considerando os dados de P ao longo dos 81 anos de análise, obteve-se um valor de IAV de 16% (calculado através da Equação (16)), que está em consonância com o valor obtido para a região Sul de Portugal por Rusu e Rusu (2021) (entre 16% e 18%).

4.2.2. Variabilidade mensal

Para explorar a variabilidade sazonal dos parâmetros H_s , T_p , θ_m e P da região do Porto de Sines, foi realizado um estudo da variação mensal dos dados obtidos através do ERA5. Os valores médios mensais são apresentados na Figura 43. A Figura 44, por sua vez, apresenta a variação mensal de cada um dos parâmetros e seus respectivos desvios padrão.

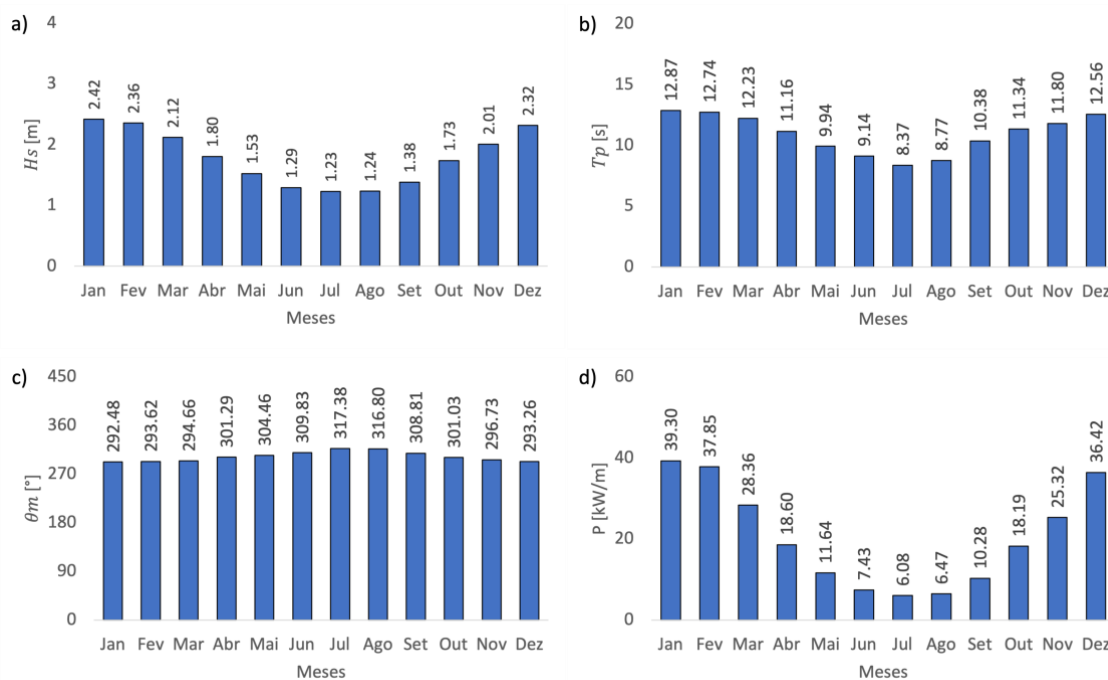


Figura 43 – Valores mensais médios de a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P na região do Porto de Sines, considerando dados de 81 anos (de 1940 até 2020).

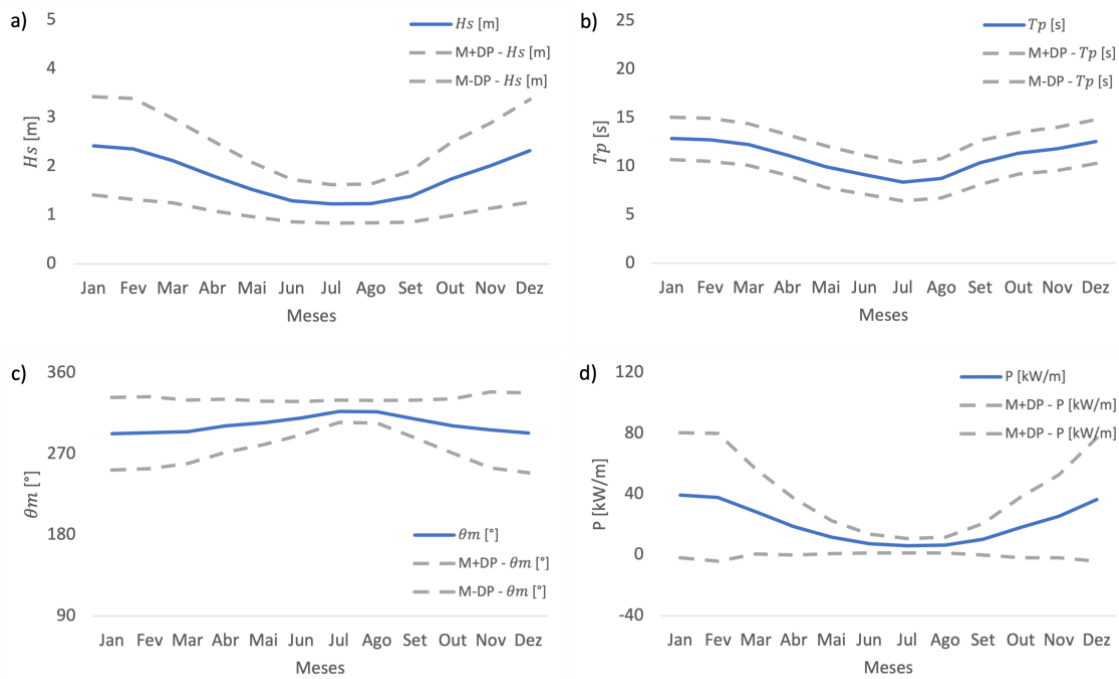


Figura 44 – Variação mensal dos dados médios de a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P na região do Porto de Sines, considerando dados de 81 anos (de 1940 até 2020). As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).

Com base na Figura 44, percebe-se que há uma grande variabilidade sazonal de H_s e T_p , sendo que os menores valores médios dos parâmetros ocorrem entre os meses de junho e agosto (período de verão europeu) e os maiores valores médios ocorrem entre os meses de dezembro e fevereiro (período de inverno europeu). Por outro lado, percebe-se uma baixa variabilidade sazonal de θ_m , sendo que entre os meses de julho e agosto, no auge do verão, os valores de direção média são quase constantes, variando entre 317.37° e 316.80° . Além disso, percebe-se que, em todos os parâmetros, é também no verão que ocorrem os menores valores de desvios padrão.

Em relação ao parâmetro P , percebe-se uma grande variabilidade sazonal. Nesse caso, o maior retorno energético ocorre no mês de janeiro, com um valor médio de P igual a 39.30 kW/m e o menor retorno energético ocorre no mês de julho, com um valor médio de P igual a 6.08 kW/m . Comparando os dois extremos, o menor valor médio de P é cerca de sete vezes menor do que o maior valor médio. Esse resultado confirma que o inverno no Hemisfério Norte produz um aumento da energia associada as ondas (Rusu e Rusu, 2021), o que está diretamente ligado ao aumento das alturas significativas e do período de pico nesse período.

Considerando os dados de P ao longo dos 81 anos de análise, obteve-se um valor de MAV de 133% (calculado através da Equação (17)), o que é ligeiramente superior ao valor obtido para a região Sul de Portugal por Rusu e Rusu (2021) (entre 120% e 130%). No estudo, foi observado que a maior variabilidade dentro de um ano ocorre no Hemisfério Norte, sendo um resultado, principalmente, das variações sazonais que ocorrem entre o verão (junho, julho e agosto – JJA) e o inverno (dezembro, janeiro e fevereiro – DJF).

4.2.3. Perspetivas para a instalação do WEC REEFS

A Figura 45 apresenta a contribuição dos diferentes estados de mar para a energia associada às ondas na região do Porto de Sines. Foram selecionados dados que correspondem aos limites de funcionamento considerados nesta dissertação ($1.50\text{ m} \leq H_s \leq 5.00\text{ m}$ e $6.00\text{ s} \leq T_p \leq 12.00\text{ s}$), considerando apenas os valores que estão dentro desses limites para o cálculo do potencial energético do dispositivo.

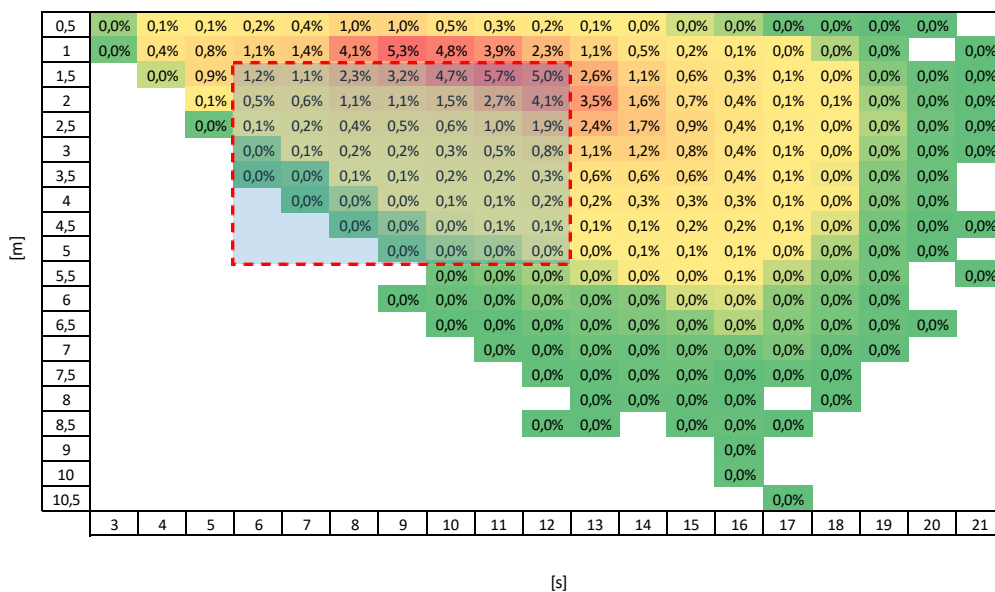


Figura 45 – Mapa de calor exibindo a percentagem de contribuição de diferentes estados de mar para a energia das ondas da região do Porto de Sines, considerando dados de 81 anos (de 1940 até 2020). Os dados sob a forma com contorno tracejado correspondem aos dados utilizados na etapa de estimativa do potencial energético do dispositivo.

A Figura 46 apresenta os valores médios de P e P_{REEFS} , calculados com base nos dados de altura significativa e período de pico selecionados na Figura 45. Ao analisar esses resultados, pode-se observar a diferença entre o potencial energético total das ondas e a quantidade desse potencial que é efetivamente capturado pelo WEC REEFS (50% do total, considerando o rendimento adotado neste trabalho). Percebe-se, ainda, que os maiores retornos energéticos ocorrem nos meses de janeiro (com P_{REEFS} igual a 12.44 kW/m), dezembro (com P_{REEFS} igual a 11.98 kW/m) e fevereiro (com P_{REEFS} igual a 11.54 kW/m), corroborando com as análises de variabilidade anual e mensal da região.

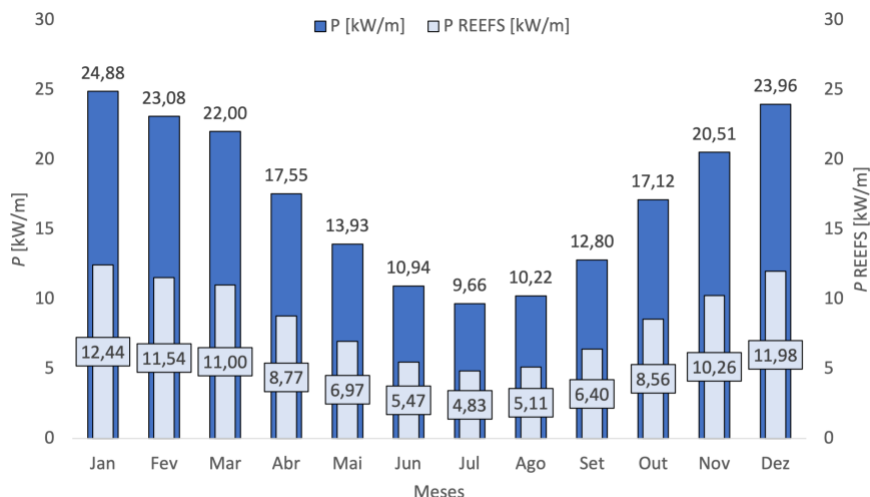


Figura 46 – Comparação entre o potencial de energia das ondas na região do Porto de Sines e o aproveitamento energético do dispositivo REEFS.

A Figura 47, por sua vez, apresenta uma estimativa da produção mensal de energia a partir da implementação do dispositivo (calculada através da Equação (14)). Anualmente, na região do Porto de Sines, estima-se uma produção de energia de 75.30 MWh/m. Ressalta-se que a estimativa da produção de energia está em função de uma largura de captura de frente de onda (C_w) de 1 m, pelo que, a variação desse parâmetro impactará em aumento ou redução das estimativas realizadas neste estudo. Considerando uma tarifa de venda de energia de €150/MWh e a estimativa de produção anual de energia de 75.30 MWh/m, chega-se a um valor de receita anual de cerca de €11 295/m (calculado através da Equação (15)).

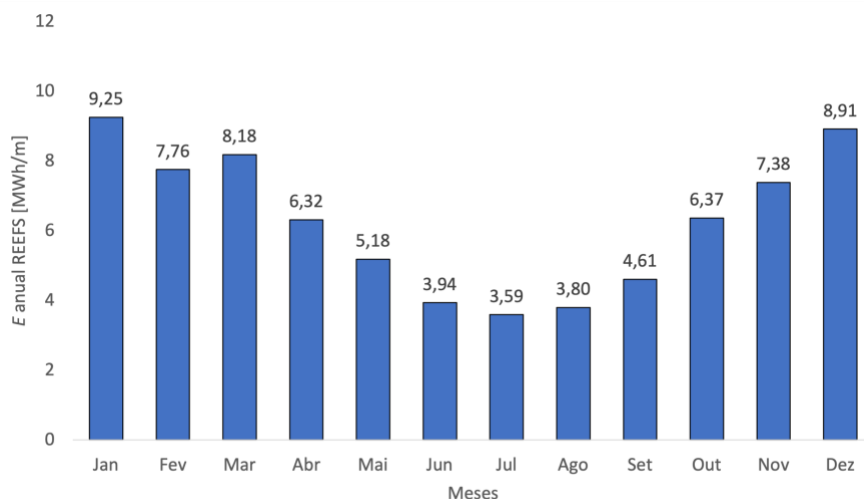


Figura 47 – Aproveitamento energético do dispositivo REEFS ao longo dos meses na região do Porto de Sines.

4.3. Caracterização da energia das ondas de Tramandaí (Rio Grande do Sul, Brasil)

4.3.1. Variabilidade anual

No âmbito da análise da variabilidade anual da região de Tramandaí, a Figura 48 a Figura 41 ilustra a variação anual dos parâmetros H_s e T_p ao longo do período de análise (entre 1940 e 2020). Ao longo das oito décadas, os valores médios anuais de H_s variam de 1.47 m (1949) a 1.93 m (2008) enquanto os valores médios de T_p variam de 8.09 s (1953) e 9.50 s (1995). Ainda, pode-se perceber através da linha de tendência de cada um dos parâmetros que os valores médios têm apresentado um ligeiro aumento ao longo das oito décadas de análise.

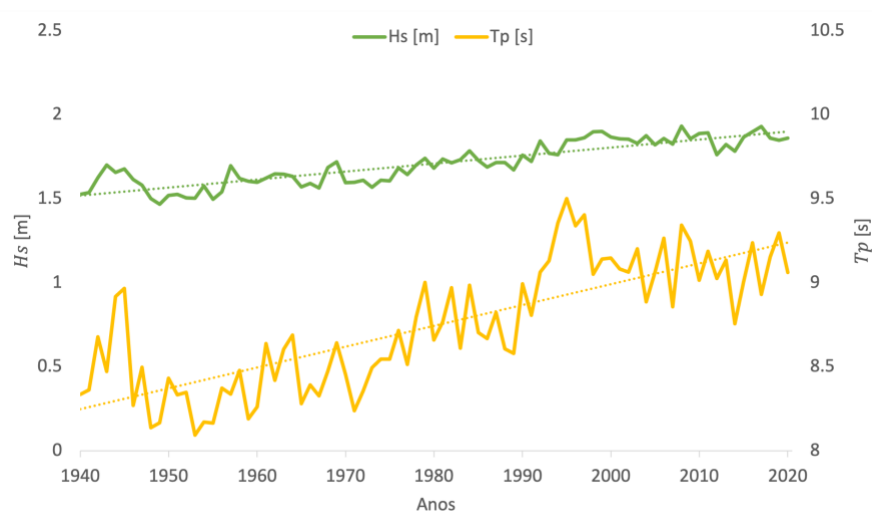


Figura 48 – Variação dos parâmetros H_s e T_p na região de Tramandaí ao longo de 81 anos (de 1940 até 2020).

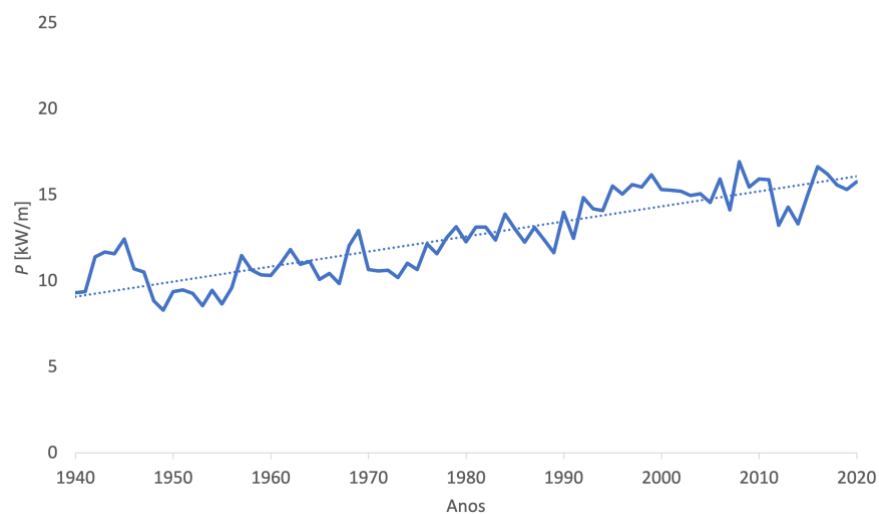


Figura 49 – Variação de P na região de Tramandaí ao longo de 81 anos (de 1940 até 2020).

A Figura 51, por sua vez, ilustra a variação anual de P ao longo das oito décadas de análise. Pode-se observar, que os valores médios anuais variam de 8.30 kW/m (1949) a 16.94 kW/m (2008). Assim como observado em H_s e T_p , percebe-se, através da linha de tendência de P , que o parâmetro apresenta um aumento ao longo das décadas.

Em média, na região de Tramandaí entre os anos de 1940 e 2020, os dados do ERA5 conduzem a um valor de P igual a 12.59 kW/m \pm 2.34 kW/m. Esse valor é ligeiramente inferior ao apresentado por (de Oliveira et al., 2021) em um estudo sobre três áreas da costa brasileira. No estudo, para a região Sul do Brasil, foi encontrado um valor médio de P igual a 12.67 kW/m. No entanto, o resultado encontrado nesta dissertação corrobora com os valores obtidos por Lisboa et al. (2017) em um estudo sobre o potencial energético na região Sul do país, considerando dados de 10 anos. No estudo, para um ponto de análise *offshore*, foram encontrados valores médios de P de 21.3 kW/m. Já para um ponto *nearshore* foram encontrados valores médios de P de 6.7 kW/m.

Considerando os dados de P ao longo dos 81 anos de análise, obteve-se um valor de IAV de 19%, o que é ligeiramente superior ao valor obtido para a região Sul do Brasil por Rusu e Rusu (2021) (entre 12% e 14%).

4.3.2. Variabilidade mensal

Para explorar a variabilidade sazonal dos parâmetros H_s , T_p , θ_m e P da região de Tramandaí, foi também realizado um estudo da variação mensal dos dados obtidos através do ERA5. Os valores médios mensais são apresentados na Figura 50. A Figura 51, por sua vez, apresenta a variação mensal de cada um dos parâmetros e seus respectivos desvios padrão.

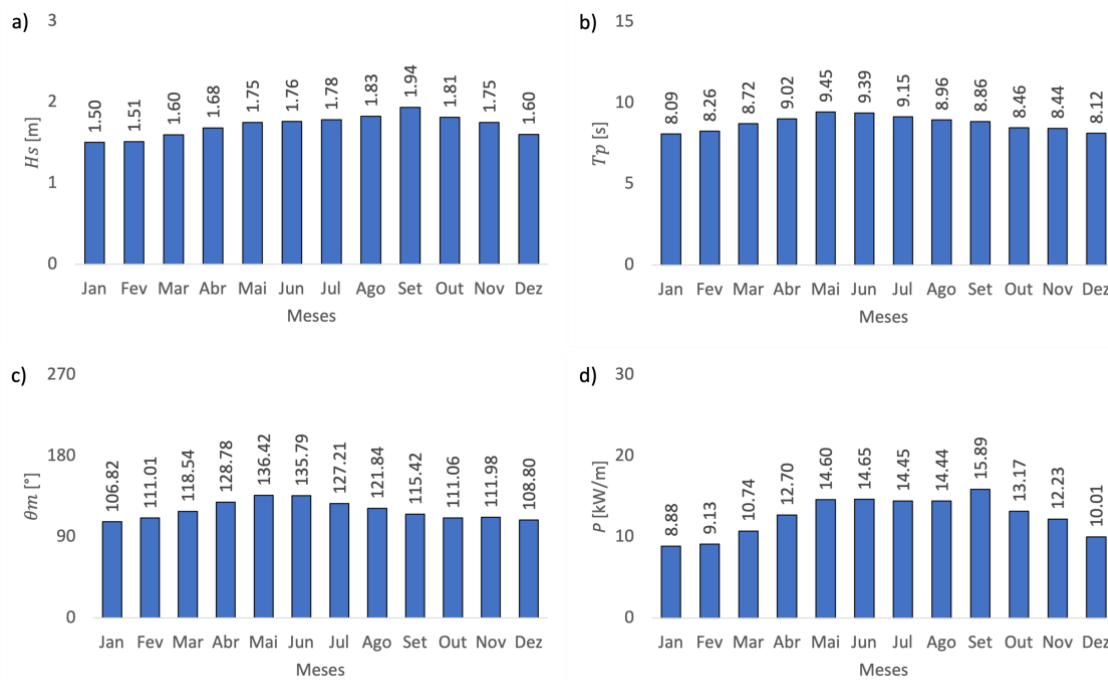


Figura 50 – Valores mensais médios de a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P na região de Tramandaí, considerando dados de 81 anos (de 1940 até 2020).

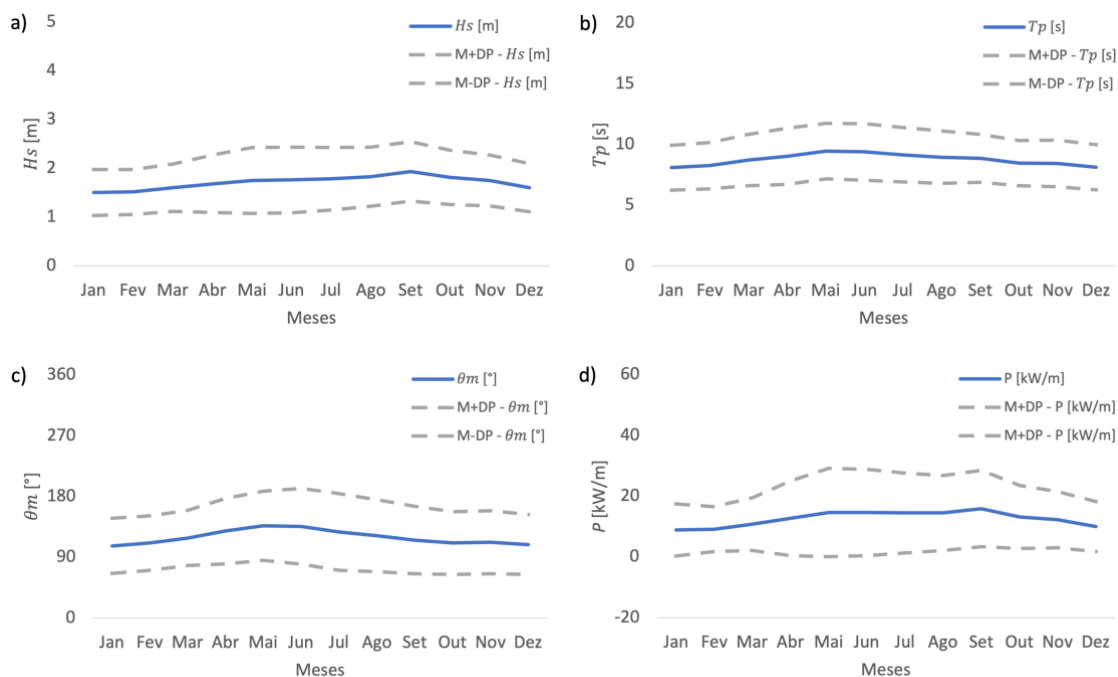


Figura 51 – Variação mensal dos dados médios de a) H_s ; b) T_p ; c) θ_m ; e d) P na região de Tramandaí, considerando dados de 81 anos (de 1940 até 2020). As linhas sólidas representam os valores médios (M) e as linhas tracejadas representam a soma e a subtração do desvio padrão (DP).

Com base na Figura 51, percebe-se que há uma baixa variabilidade sazonal em todos os parâmetros avaliados, o que promove uma certa constância quanto ao aproveitamento energético. Em relação ao parâmetro P , o maior retorno energético ocorre no mês de setembro, com um valor médio de P igual a 15.89 kW/m e o menor retorno energético ocorre no mês de janeiro, com um valor médio de P igual a 8.88 kW/m.

Comparando os dois extremos, o menor valor médio de P representa cerca de 55% do maior valor médio, o que revela um comportamento marítimo relativamente estável e sem grandes oscilações ao longo do ano. Portanto, os resultados obtidos indicam que, ao contrário do Hemisfério Norte, os parâmetros de agitação marítima no Hemisfério Sul não sofrem efeitos significativos no período de inverno.

Considerando os dados de P ao longo dos 81 anos de análise, obteve-se um valor de MAV de 87%, o que é ligeiramente inferior ao obtido para a região Sul do Brasil por Rusu e Rusu (2021) (entre 90% e 100%).

4.3.3. Perspectivas para a instalação do WEC REEFS

A Figura 52 apresenta a contribuição dos diferentes estados de mar para a energia associada às ondas na região de Tramandaí. Foram selecionados dados que correspondem aos limites de funcionamento considerados nesta dissertação ($1.50\text{ m} \leq H_s \leq 5.00\text{ m}$ e $6.00\text{ s} \leq T_p \leq 12.00\text{ s}$), considerando apenas os valores que estão dentro desses limites para o cálculo do potencial energético do dispositivo.

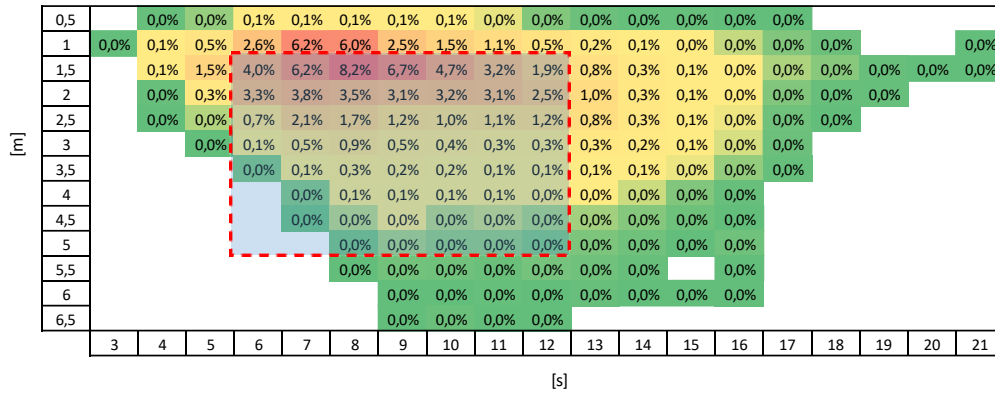


Figura 52 – Mapa de calor exibindo a percentagem de contribuição de diferentes estados de mar para a energia das ondas da região de Tramandaí, considerando dados de 81 anos (de 1940 até 2020). Os dados sob a forma com contorno tracejado correspondem aos dados utilizados na etapa de estimativa do potencial energético do dispositivo.

A Figura 53 apresenta os valores médios de P e P_{REEFS} , calculados com base nos dados de altura significativa e período de pico selecionados na Figura 52. Ao analisar esses resultados, pode-se observar a diferença entre o potencial energético total das ondas e a quantidade desse potencial que é efetivamente capturada pelo WEC REEFS. Percebe-se, ainda, que o maior retorno energético ocorre no mês de maio (com P_{REEFS} igual a 8.22 kW/m), seguido dos meses de setembro e junho, com valores médios de retorno energético quase constantes, variando de 8.19 kW/m (em setembro) a 8.08 kW/m (em junho) e dos meses de julho e agosto, cujos valores médios de retorno energético também são quase constantes, variando entre 7.89 kW/m (em julho) e 7.59 kW/m (em agosto). Esses resultados corroboram com as análises de variabilidade anual e mensal da região.

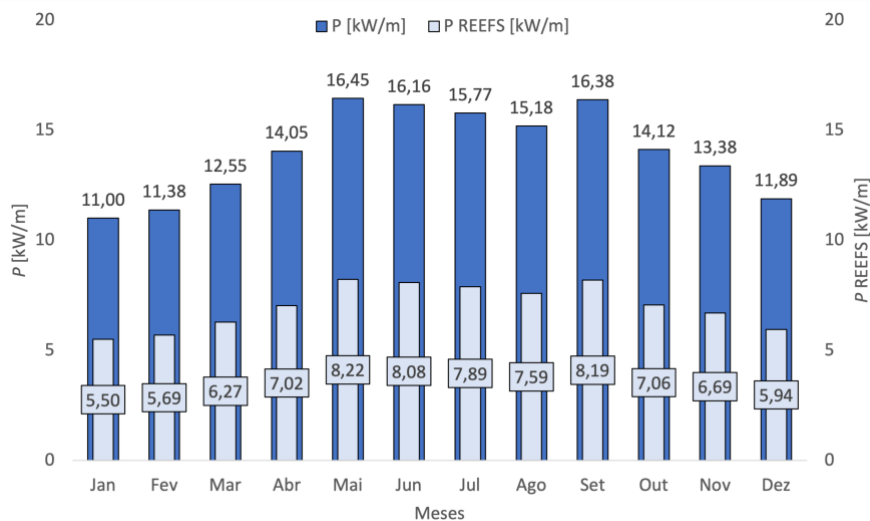


Figura 53 – Comparação entre o potencial de energia das ondas na região de Tramandaí e o aproveitamento energético do dispositivo REEFS.

A Figura 54, por sua vez, apresenta uma estimativa da produção mensal de energia a partir da implementação do dispositivo. Anualmente, na região de Tramandaí, estima-se uma produção de energia de 61.47 MWh/m. Considerando uma tarifa de venda de energia de €150/MWh e a estimativa de produção anual de energia de 61.47 MWh/m, chega-se a um valor de receita anual de cerca de €9 220.50/m.

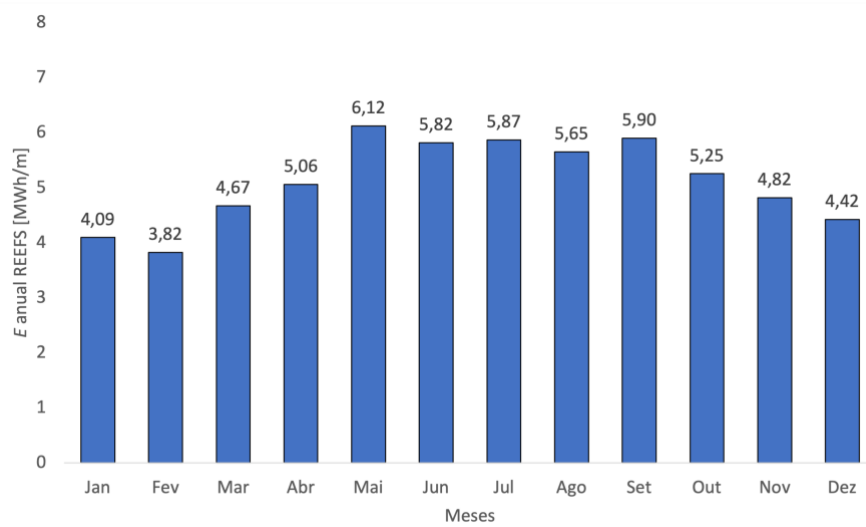


Figura 54 – Aproveitamento energético do dispositivo REEFS ao longo dos meses na região de Tramandaí.

5. CONCLUSÃO

5.1. Conclusões finais

Esta dissertação utiliza o modelo de reanálise ERA5 para obter dados de agitação marítima de um período de 81 anos (de 1940 a 2020), com o objetivo de caracterizar o potencial energético da região do Porto de Sines (Sines, Portugal) e de Tramandaí (Rio Grande do Sul, Brasil). Com os dados de oito décadas, propõe-se estimar a variabilidade inter- e intra-anual, bem como avaliar a implementação do WEC REEFS e seu aproveitamento energético em ambas as regiões.

Em uma etapa inicial, os dados do ERA5 são validados através de comparação com registros de medições *in situ*, tendo como referência dados de boia do Porto de Sines (Sines, Portugal), Florianópolis (Santa Catarina, Brasil), Pontal do Paraná (Paraná, Brasil), Praia do Cassino (Rio Grande do Sul, Brasil), Praia do Forte (Bahia, Brasil), Rio de Janeiro (Rio, de Janeiro, Brasil) e Tramandaí (Rio Grande do Sul, Brasil).

A comparação entre as fontes de dados foi realizada considerando dados de altura significativa de onda, período de pico, direção média de onda e período médio de onda (esse último parâmetro utilizado unicamente na análise da região do Porto de Sines), tratando-se de um volume de 99 841 pares de dados analisados. A partir dessa análise, percebe-se que os dados do ERA5 e das boias revelam uma boa concordância, suportando a suposição de que os dados modelados são adequados para avaliar a energia das ondas das regiões dos estudos de caso. No entanto, em geral, percebe-se que o modelo tende a superestimar a potência associada às ondas. Na região de Tramandaí, *e.g.*, essa superestimação é de cerca do dobro, o que se deve ao facto da boia ser fundeada em um ponto próximo à costa e o ponto de análise do ERA5 ser localizado mais ao largo.

Em relação aos estudos de caso, a análise dos dados das oito décadas revela que os estados de mar que mais contribuem para a energia das ondas de ambas regiões estão, em geral, dentro dos limites de funcionamento adotados nesta dissertação ($1.50\text{ m} \leq H_s \leq 5.00\text{ m}$ e $6.00\text{ s} \leq T_p \leq 12.00\text{ s}$). Desse modo, o WEC não é submetido a condições extremas de operação. Além disso, é de se referir que a direção média de onda não é considerada nesse âmbito, uma vez que o conversor de ondas é um dispositivo costeiro e, à partida, a propagação das ondas tende a ficar perpendicular à costa por causa da refração.

Em termos de avaliação anual do recurso das ondas, obteve-se, para a região do Porto de Sines, uma potência média de 20.42 kW/m. Para a região de Tramandaí, obteve-se uma potência média de 12.59 kW/m. No âmbito da variabilidade interanual, os valores médios de potência na região do Porto de Sines variam entre 14.41 kW/m (1944) e 29.24 kW/m (2014). Na região de Tramandaí, os valores médios variam de 8.30 kW/m (1949) a 16.94 kW/m (2008). Observa-se que as últimas décadas tendem a apresentar um aumento do potencial energético das ondas de ambas as regiões, sendo esse um resultado do aumento dos parâmetros da altura significativa de onda e do período de pico.

Relativamente à variabilidade intra-anual, uma avaliação mensal da região do Porto de Sines indica uma variabilidade sazonal significativa, com valores médios que variam de 6.08 kW/m a 39.30 kW/m, nos meses de julho e janeiro, respetivamente. A região de Tramandaí indica uma baixa variabilidade sazonal, pelo que, seus valores médios variam de 8.88 kW/m a 15.89 kW/m, nos

meses de janeiro e setembro, respetivamente. Portanto, percebe-se que na região de Tramandaí o retorno energético apresenta valores relativamente próximos em todos os meses do ano. Por outro lado, a região do Porto de Sines apresenta os maiores retornos energéticos no período de inverno europeu (em janeiro) e um retorno energético cerca de sete vezes menor no período de verão (em julho).

Finalmente, tratando-se da região do Porto de Sines, apesar da sua variabilidade intra-anual, que resulta em potenciais energéticos mais baixos na época de verão, estima-se que a localidade é capaz de produzir 75.30 MWh/m de energia ao ano com a implementação do WEC REEFS. Com essa energia acumulada, estima-se uma receita anual de €11 295/m. Em relação a região de Tramandaí, embora seu potencial energético mensal seja mais baixo se comparado à região de Sines, sua baixa variabilidade intra-anual resulta em uma capacidade de produção estimada de 61.47 MWh/m de energia ao ano. Nesse caso, a receita anual estimada é de €9 220.50/m.

A implementação de dispositivos WEC surge como uma alternativa renovável e sustentável. No entanto, essas tecnologias são consideradas emergentes, o que acarreta um custo de implementação mais elevado em comparação a outras tecnologias mais maduras. Nesse sentido, os estudos relacionados ao aproveitamento do recurso e ao desenvolvimento de novos dispositivos conversores contribuem para impulsionar a área, sendo um agente propulsor para o seu amadurecimento. Em conclusão, os resultados desta dissertação destacam a viabilidade técnica e económica referente à implementação do dispositivo REEFS nas regiões estudadas, contribuindo para o mapeamento do recurso e para o aprimoramento da especialidade.

5.2. Limitações e trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- utilizar um modelo de propagação de ondas que possibilite avaliar as características das ondas em regiões mais próximas da costa (*e.g.*, SWAN, Delft3D), *i.e.*, onde se pretende implementar o WEC REEFS, a partir dos dados de agitação obtidos mais ao largo;
- avaliar as influências suscitadas pelas alterações climáticas, considerando as variações dos parâmetros de agitação marítima observadas ao longo das oito décadas de análise;
- correlacionar os dados de período médio de onda e período de pico, com o objetivo de estimar o potencial energético da região do Porto de Sines considerando os dados de medições por boia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aderinto, T., & Li, H. (2019). Review on power performance and efficiency of wave energy converters. *Energies*, 12(22), 4329.

Ahn, S. (2021). Modeling mean relation between peak period and energy period of ocean surface wave systems. *Ocean Engineering*, 228, 108937.

Ahn, S., & Neary, V. S. (2020). Non-stationary historical trends in wave energy climate for coastal waters of the United States. *Ocean Engineering*, 216, 108044.

Aqua-RET Project. (2012). *Download Images and Illustrations*. Aqua-RET. Retrieved January 5, 2023, from http://www.aquaret.com/indexea3d.html?option=com_content&view=article&id=203&Itemid=344&lang=en#Animations

Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN). (2022). *Anuário 2022*. Anuário Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN). Retrieved January 5, 2023, from https://anuario.apren.pt/wp-content/themes/APREN/imgs/pdf/APREN_anuario2022.pdf

Everett, R., Boyle, G., Peake, S., & Ramage, J. (2012). *Energy systems and sustainability: power for a sustainable future*. Oxford University Press.

Cornett, A. M. (2008, July). A global wave energy resource assessment. In *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference* (pp. ISOPE-I). ISOPE.

Cruz, J. M. B. P., & Sarmento, A. J. N. A. (2004). Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos. *Econômicos e Ambientais*.

de Oliveira, L., dos Santos, I. F. S., Schmidt, N. L., Tiago Filho, G. L., Camacho, R. G. R., & Barros, R. M. (2021). Economic feasibility study of ocean wave electricity generation in Brazil. *Renewable Energy*, 178, 1279-1290.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2022). *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022*. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Retrieved January 5, 2023, from <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Fact%20Sheet%20-%20Anuário%20Estat%20C3%ADstico%20de%20Energia%20Elétrica%202022.pdf>

Governo da República Portuguesa. (2019). *Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030 (PNEC 2030)*. Business Council for Sustainable Development (BCSD) Portugal. Retrieved January 5, 2023, from <https://bcsdportugal.org/wp-content/uploads/2020/12/PNEC-2030-Plano-Nacional-Energia-e-Clima.pdf>

- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2018). ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. *Copernicus climate change service (c3s) climate data store (cds)*, 10(10.24381).
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.
- Lisboa, R. C., Teixeira, P. R., & Fortes, C. J. (2017). Numerical evaluation of wave energy potential in the south of Brazil. *Energy*, 121, 176-184.
- López, I., Andreu, J., Ceballos, S., De Alegría, I. M., & Kortabarria, I. (2013). Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. *Renewable and sustainable energy reviews*, 27, 413-434.
- Mahdy, A., Hasanien, H. M., Aleem, S. H. A., Al-Dhaifallah, M., Zobia, A. F., & Ali, Z. M. (2023). State-of-the-Art of the most commonly adopted wave energy conversion systems. *Ain Shams Engineering Journal*, 102322.
- Mendes, D., & Oliveira, T. C. (2021). Deep-water spectral wave steepness offshore mainland Portugal. *Ocean Engineering*, 236, 109548.
- Mota, P., & Pinto, J. P. (2014). Wave energy potential along the western Portuguese coast. *Renewable Energy*, 71, 8-17.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2023). *Hurricane Storm Surge*. Ocean Today. Retrieved January 5, 2023, from <https://oceantoday.noaa.gov/hurricanestormsurge/>
- Pastor, J., & Liu, Y. (2016). Wave climate resource analysis based on a revised gamma spectrum for wave energy conversion technology. *Sustainability*, 8(12), 1321.
- Rede de Monitoramento de Ondas em Águas Rasas (Rede Ondas). (2021). *A Rede Ondas*. Retrieved January 5, 2023, from <https://redeondas.furg.br/pt/a-rede-ondas>
- Governo da República Portuguesa. (2021). *Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC 2050)*. Portugal. Retrieved January 5, 2023, from <https://www.portugal.gov.pt/download-ficheiros/ficheiro.aspx?v=%3d%3dBAAAAB%2bLCAAAAAABACzMDexAAAut9emBAAAAA%3d%3d>
- Ribeiro, A. S., deCastro, M., Rusu, L., Bernardino, M., Dias, J. M., & Gomez-Gesteira, M. (2020). Evaluating the future efficiency of wave energy converters along the NW coast of the Iberian Peninsula. *Energies*, 13(14), 3563.
- Rusu, L., & Rusu, E. (2021). Evaluation of the worldwide wave energy distribution based on ERA5 data and altimeter measurements. *Energies*, 14(2), 394.

Samad, A., Sannasiraj, S. A., Sundar, V., & Halder, P. (Eds.). (2022). *Ocean Wave Energy Systems: Hydrodynamics, Power Takeoff and Control Systems*. Springer.

Shen, W., Chen, X., Qiu, J., Hayward, J. A., Sayeef, S., Osman, P., ... & Dong, Z. Y. (2020). A comprehensive review of variable renewable energy levelized cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 133*, 110301.

Sierra, J. P., González-Marco, D., Sospedra, J., Gironella, X., Mösso, C., & Sánchez-Arcilla, A. (2013). Wave energy resource assessment in Lanzarote (Spain). *Renewable Energy, 55*, 480-489.

Silva, K., Abreu, T., & Oliveira, T. C. (2022). Inter-and intra-annual variability of wave energy in Northern mainland Portugal: Application to the HiWave-5 project. *Energy Reports, 8*, 6411-6422.

Stopa, J. E., Cheung, K. F., Tolman, H. L., & Chawla, A. (2013). Patterns and cycles in the climate forecast system reanalysis wind and wave data. *Ocean Modelling, 70*, 207-220.

Wright, J., Colling, A., & Park, D. (Eds.). (1999). *Waves, tides and shallow-water processes* (Vol. 4). Gulf Professional Publishing.

Tran, T. T., & Smith, A. D. (2018). Incorporating performance-based global sensitivity and uncertainty analysis into LCOE calculations for emerging renewable energy technologies. *Applied energy, 216*, 157-171.

Universidade de Coimbra. (2023). *REEFS: Renewable Electric Energy From Sea*. Retrieved June 2, 2023, from <https://www.uc.pt/ucbusiness/reefs-renewable-electric-energy-from-sea/>

Universidade de Coimbra. (2023). *REEFS - DISPOSITIVO INOVADOR QUE PRODUZ ENERGIA A PARTIR DAS ONDAS*. Retrieved June 2, 2023, from <https://www.uc.pt/en/ucmar/latest-highlights/reefs-dispositivo-inovador-que-produz-energia-a-partir-das-ondas/>

United Nations. (2016). Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015.

Waters, R. (2008). *Energy from ocean waves: full scale experimental verification of a wave energy converter* (Doctoral dissertation, Universitetsbiblioteket).

World Energy Council. (2022). *World Energy Trilemma Index 2022*. Retrieved January 5, 2023, from https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World_Energy_Trilemma_Index_2022.pdf?v=1669839605

Young, I. R. (1999). *Wind generated ocean waves*. Elsevier.