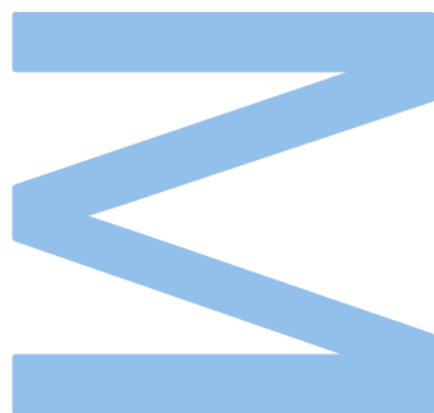


# Avaliação do Potencial Energético Na Zona Costeira Portuguesa



Ana Leonor Ferreira de Oliveira  
Mestrado em Engenharia Matemática  
Departamento de Matemática  
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto  
2024

# Avaliação do Potencial Energético Na Zona Costeira Portuguesa

Ana Leonor Ferreira de Oliveira

Dissertação realizada no âmbito do Mestrado em  
Engenharia Matemática  
Departamento de Matemática  
2024

**Orientador**

Paula Milheiro Oliveira, Professora Associada, FEUP

**Coorientador**

Paulo Avilez Valente, Professor Auxiliar, FEUP

# Resumo

Esta dissertação tem como objetivo avaliar o potencial energético das ondas na zona costeira portuguesa e comparar a eficácia de diferentes dispositivos conversores de energia (WEC). Para isso, foram utilizados dados sobre agitação marítima das bases de dados ERA5 e IBIS. As análises e cálculos subjacentes foram realizados no software Matlab. Foram estudadas variáveis como a altura significativa e o período das ondas ao longo de uma larga faixa da região costeira portuguesa, bem como em pontos selecionados da costa ocidental ibérica. Foi também realizada uma avaliação da variabilidade temporal da potência disponível, de modo a aprofundar essa análise. A comparação entre as bases de dados ERA5 e IBIS permitiu verificar a consistência dos resultados obtidos. O estudo realizado conduziu à identificação dos locais de maior potencial energético na costa portuguesa e discute a viabilidade e eficiência de dispositivos conversores de energia, como o Pelamis, o Archimedes e o WaveDragon. Este estudo traz uma contribuição para a identificação de estratégias eficazes na exploração da energia das ondas em Portugal.

**Palavras-Chave:** Energia das ondas, potencial energético, WEC, distribuição da altura significativa, distribuição do período de energia.



# Abstract

This dissertation aims to assess the energy potential of waves in the Portuguese coastal zone and compare the effectiveness of different energy converter devices (WEC). To this end, data on sea waves from the ERA5 and IBIS databases were used. The underlying analysis and calculations were carried out using Matlab software. Variables such as significant wave height and wave period were studied along a wide swathe of the Portuguese coastal region, as well as at selected points on the western Iberian coast. An assessment of the temporal variability of the available power was also carried out in order to deepen this analysis. The comparison between the ERA5 and IBIS databases made it possible to verify the consistency of the results obtained. The study led to the identification of the locations with the greatest energy potential on the Portuguese coast and discussed the feasibility and efficiency of energy converter devices such as Pelamis, Archimedes and WaveDragon. This study makes a contribution to identifying effective strategies for exploiting wave energy in Portugal.

**Keywords:** Wave energy, energy potential, WEC, significant wave height distribution, energy period distribution.



# Conteúdo

<b>Agradecimentos</b>	<b>v</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Problema em Estudo</b>	<b>5</b>
<b>3 Dados disponíveis</b>	<b>7</b>
<b>4 Agitação Marítima e Energia das Ondas</b>	<b>11</b>
4.1 Origem da agitação marítima . . . . .	12
4.2 Energia . . . . .	15
4.3 Dispositivos Conversores de Energia . . . . .	15
4.3.1 Tipos de conversores . . . . .	15
4.3.2 Matrizes de potência . . . . .	16
<b>5 Análise Exploratória dos Dados e Modelação</b>	<b>19</b>
5.1 Descrição do clima de agitação na costa ocidental ibérica . . . . .	19
5.2 Descrição do clima de agitação em pontos selecionados . . . . .	22
5.3 Direção da ondulação . . . . .	24
5.4 Análise da Potência disponível . . . . .	26
5.4.1 Caracterização da variabilidade temporal da potência disponível . . . . .	27
5.4.2 Anomalias climáticas . . . . .	33

5.5	Comparação das bases de dados ERA5 e IBIS . . . . .	36
5.6	Modelação probabilística da altura significativa, do período de energia e da potência	44
<b>6</b>	<b>Avaliação do Potencial Energético</b>	<b>49</b>
<b>7</b>	<b>Conclusão e Comentários Finais</b>	<b>57</b>
	<b>Referências</b>	<b>61</b>
<b>A</b>	<b>Anexos</b>	<b>65</b>
A.1	Caracterização do clima de agitação marítima . . . . .	65
A.2	Estudo da potência útil . . . . .	68
A.3	Funções de Autocorrelação . . . . .	72
A.4	Gráficos 3D e gráficos de dispersão . . . . .	73
A.5	Histogramas de $H_S$ e de $T_E$ . . . . .	76
A.6	Histogramas da Potência Útil $P_u$ . . . . .	77
A.7	Rosas dos Ventos . . . . .	81

# Agradecimentos

Aos meus pais, que me deram apoio e amor incondicional em todas as etapas da minha vida. Sem eles, o meu progresso universitário e a redação desta dissertação teriam sido infinitamente mais árduos e talvez até impossíveis.

À professora Paula Milheiro Oliveira, que foi uma orientadora incansável, presente em todos os momentos, sempre disponível para as minhas inúmeras dúvidas e questões, e sem a qual esta dissertação não teria sido possível.

Ao professor Paulo Avilez Valente, que passou longas horas a explicar conceitos de física das ondas a uma matemática e cujos contributos e conhecimentos se revelaram essenciais em todos os instantes deste estudo.



# Lista de Figuras

3.1	Localizações consideradas nas bases de dados disponíveis ERA5 e IBIS. . . . .	9
4.1	(a) Vagas nos George Banks (origem: NOAA). (b) <i>Swell</i> na costa do Panamá (origem National Geographic, 1933). . . . .	13
4.2	Energia relativa das ondas no oceano (adaptado de Munk (1951)). . . . .	13
4.3	Processo de geração das ondas no oceano (adaptado de ©2011 Brooks/Cole—Thomson Learning). . . . .	14
4.4	Tipos de WECs — 1. absorvedor pontual; 2. atenuador 3. pêndulo invertido; 4. coluna de água oscilante; 5. dispositivo de galgamento; 6. dispositivo acionado por diferencial de pressão (adaptado de ©2010 Ingvald Straume—Wikimedia Commons). . . . .	17
5.1	Mapas de valores de $H_S$ . . . . .	20
5.2	Mapas de valores de $T_E$ . . . . .	21
5.3	Correlação entre altura significativa, $H_S$ , e período de energia, $T_E$ . . . . .	22
5.4	Gráficos de dispersão de $(H_S, T_E)$ . . . . .	23
5.5	Rosas dos ventos das direções de propagação das ondas, em função de $H_S$ , em Aguçadora. . . . .	25
5.6	Média de $P_f$ , total e restrita às componentes de <i>swell</i> e vagas. . . . .	27
5.7	$P_f$ média calculada ao longo das diferentes décadas. . . . .	28
5.8	$P_f$ média para cada estação do ano. . . . .	29
5.9	$P_f$ em função do mês do ano, nas localizações selecionadas da costa ocidental portuguesa. . . . .	30
5.10	Valores dos coeficientes CV, MV e SV. . . . .	30

5.11	Anomalias de acordo com a base de dados ERA5. . . . .	33
5.12	Anomalias da variável $P_f$ para as diferentes estações do ano. . . . .	34
5.13	Decomposição das anomalias da variável $P_f$ para as diferentes estações do ano, de acordo com a base de dados ERA5. . . . .	35
5.14	Anomalias da variável $P_f$ e a sua decomposição, referente aos últimos 28 anos, nas bases de dados ERA5 e IBIS. . . . .	36
5.15	A potência disponível, $P_f$ , de acordo com a base de dados ERA5. . . . .	39
5.16	A potência disponível, $P_f$ , de acordo com a base de dados IBIS. . . . .	40
5.17	Representação dos QQplots da variável $H_S$ nos pontos selecionados. Nos eixos OX e OY estão representadas as bases de dados ERA5 e IBIS, respetivamente. .	41
5.18	Representação dos QQplots da variável $T_E$ nos pontos selecionados. Nos eixos OX e OY estão representadas as bases de dados ERA5 e IBIS, respetivamente. .	41
5.19	Diagrama de dispersão de $H_S$ . Nos eixos OX e OY estão representadas as bases de dados ERA5 e IBIS, respetivamente. . . . .	42
5.20	Diagrama de dispersão de $T_E$ . Nos eixos OX e OY estão representadas as bases de dados ERA5 e IBIS, respetivamente. . . . .	43
5.21	Histograma da variável $H_S$ para diferentes localizações e distribuição Lognormal ajustada. . . . .	45
5.22	Histograma da variável $P_f$ para diferentes localizações e distribuição Gaussiana Inversa ajustada. . . . .	46
5.23	Histograma da variável $T_E$ no ponto 1042072. . . . .	47
6.1	Mapas de valores de $P_W$ para o WEC Archimedes. . . . .	52
6.2	Mapas de valores de $P_w$ para o WEC Pelamis. . . . .	53
6.3	Mapas de valores de $P_w$ para o WEC WaveDragon. . . . .	54
6.4	Percentagem de energia utilizada em função de $H_S$ , para cada um dos pontos selecionados. . . . .	55
6.5	Percentagem de energia utilizada em função de $T_E$ . . . . .	55
A.1	Mapas de valores $T_P$ . . . . .	66

A.2	Mapas de valores $T_Z$ . . . . .	67
A.3	Mapa de valores $P_f$ total. . . . .	68
A.4	Mapas de valores de $P_f$ restrita a ondulação. . . . .	69
A.5	Mapas de valores de $P_f$ restrita a vagas . . . . .	70
A.6	Histogramas de $P_f$ . . . . .	71
A.7	ACF de $H_S$ . . . . .	72
A.8	ACF de $T_E$ . . . . .	73
A.9	Gráfico de dispersão 3D de $H_S$ ERA5 e $H_S$ IBIS. . . . .	74
A.10	Gráfico de dispersão 3D de $T_E$ ERA5 e $T_E$ IBIS. . . . .	74
A.11	Gráfico de dispersão 3D $H_S T_E$ . . . . .	75
A.12	Histogramas de $H_S$ . . . . .	76
A.13	Histogramas de $T_E$ . . . . .	77
A.14	Histograma da variável $P_f$ no dispositivo Pelanis para diferentes localizações. . .	78
A.15	Histograma da variável $P_f$ no dispositivo DragonWave para diferentes localizações.	79
A.16	Histograma da variável $P_f$ no dispositivo Archimedes para diferentes localizações.	80
A.17	Rosas dos ventos das direções de propagação das ondas, em função de $H_S$ , em Cascais. . . . .	82
A.18	Rosas dos ventos das direções de propagação das ondas, em função de $H_S$ , em Figueira da Foz. . . . .	83
A.19	Rosas dos ventos das direções de propagação das ondas, em função de $H_S$ , em Sines. . . . .	84
A.20	Rosas dos ventos das direções de propagação das ondas, em função de $H_S$ , em Peniche. . . . .	85
A.21	Rosas dos ventos das direções de propagação das ondas, em função de $H_S$ , no Ponto 1042072. . . . .	86
A.22	Rosas dos ventos das direções de propagação das ondas, em função de $H_S$ , no Ponto 1046074. . . . .	87



# Lista de Tabelas

4.1	Classificação das ondas no mar (adaptado de Andersen and Frigaard (2011)). . .	13
4.2	Características gerais de alguns WECs (extraído de Patel et al., 2018; Rusu, 2014; Rusu and Onea, 2016). . . . .	18
4.3	Matrizes de potência dos dispositivos (extraídas de Guillou and Chapalain, 2018; Sinden, 2005). . . . .	18
5.1	Coordenadas dos pontos selecionados. . . . .	23
5.2	Valores do coeficiente CV para as diferentes localizações em estudo. . . . .	31
5.3	Valores do coeficiente SV para as diferentes localizações em estudo. . . . .	31
5.4	Valores do coeficiente MV para as diferentes localizações em estudo. . . . .	32
5.5	Valores das anomalias médias em cada década, calculadas com base na base de dados ERA5. . . . .	34
5.6	Coordenadas de várias localizações em Portugal, afastadas da linha de costa. . .	37
5.7	Resultados obtidos no ajuste da distribuição lognormal à variável $H_S$ . . . . .	44
5.8	Resultados obtidos no ajuste da distribuição gaussiana inversa à variável $P_f$ . . .	48



# Lista de Símbolos

## VARIÁVEIS

$C_W$	Largura de captura
$H_S$	Altura significativa da onda
$P_f$	Potência disponível por unidade de comprimento de crista da onda
$P_w$	Potência útil
$T_E$	Período de energia
$T_P$	Período de pico
$T_Z$	Período de zero ascendente
$\rho$	Massa volúmica da água

## ACRÓNIMOS

<b>ECMWF</b>	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
<b>ERA5</b>	Projecto de reanálise atmosférica e oceânica do clima global do ECMWF, cobrindo o período de janeiro de 1940 até ao presente
<b>IBI</b>	Atlantic—Iberian Biscay Irish—Ocean Wave Reanalysis. Projecto de reanálise oceânica do EU Copernicus Marine Service
<b>WEC</b>	Dispositivo Conversor de Energia

# Capítulo 1.

## Introdução

A crescente procura por fontes de energia renováveis e sustentáveis tem incentivado a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias que aproveitem os recursos naturais de maneira eficiente (Zachmann et al., 2021; Communication-EU, 2023; Vargas et al., 2019; Abolhosseini et al., 2014). Entre estas tecnologias, a energia das ondas tem emergido como uma solução promissora (Bento et al., 2021), especialmente para países com extensas zonas costeiras como Portugal que, com uma costa de aproximadamente 987 quilómetros, apresenta um potencial significativo para a exploração de energia das ondas (Clément et al., 2002).

Esta dissertação tem como objetivo avaliar o potencial energético da energia das ondas na zona costeira oeste da península ibérica, utilizando para isso dados climatológicos das bases de dados ERA5 e IBIS. A análise realizada permitirá identificar as regiões mais promissoras para a implementação de tecnologias de conversão de energia das ondas, bem como avaliar a eficácia de diferentes dispositivos conversores de energia (WECs) considerando as características específicas das ondas na costa de Portugal.

A exploração do potencial energético das ondas tem sido objeto de numerosos estudos, alguns dos quais abordam a costa portuguesa e a base de dados ERA5 (Hersbach et al., 2020). Outros estudos versam regiões mais a norte, no Oceano Atlântico, particularmente regiões situadas no Mar do Norte.

Em Silva et al. (2018), podemos encontrar uma avaliação detalhada do recurso energético das ondas ao longo da costa continental portuguesa, utilizando uma reconstrução histórica (dita "hindcast"), referente a 33 anos (período 1979-2012). A abordagem combinou dois modelos espectrais de ondas: o WAVEWATCH III (WWIII), para a geração de ondas, e o SWAN (Simulating WAVes Nearshore) para a transformação das ondas em áreas costeiras. O modelo SWAN foi

aprimorado com a inclusão de seis áreas de alta resolução (Aguçadoura, Figueira da Foz, São Pedro de Moel, Peniche, Cascais e Sines). Os resultados deste estudo revelaram que o potencial energético das ondas em Portugal é mais elevado no noroeste e diminui quando percorremos o mapa em direção ao sul. O mês com maior energia disponível para aproveitamento é, segundo os autores do estudo, o mês de janeiro. Além disso, o estudo apresenta uma distribuição bivariada da altura significativa das ondas e do período de energia, revelando que os estados do mar em que se pode extrair mais energia das ondas são diferentes daqueles que ocorrem com mais frequência.

Num estudo anterior, Silva et al. (2013) avaliam diversos Dispositivos de Conversão de Energia das Ondas (ditos WECs), na zona costeira portuguesa. Este estudo é crucial para os objetivos desta dissertação, uma vez que estabelece uma comparação da eficácia de diferentes dispositivos considerando as características específicas das ondas na costa de Portugal. O referido artigo conclui que a eficácia das tecnologias dos WECs varia significativamente dependendo da localização e das características das ondas no local, destacando a importância de uma abordagem híbrida, a qual permitiria otimizar a extração de energia ao longo da costa combinando diferentes tecnologias. Numa outra área geográfica, a costa da Noruega, Stefanakos et al. (2021) avaliam a disponibilidade e a variabilidade dos recursos eólicos e de ondas, recorrendo à base de dados ERA5. Dão particular ênfase à análise da complementaridade destas duas fontes de energia. Os referidos autores concluem que as águas norueguesas possuem um elevado potencial, tanto para a energia eólica como para a energia das ondas. A base de dados de ERA5 permitiu uma avaliação detalhada da distribuição espacial dos recursos, identificando áreas com maior potencial energético. O referido estudo reveste-se de um especial interesse para esta dissertação por utilizar a mesma base de dados do nosso estudo, ainda que noutra região geográfica.

No contexto da Península Ibérica, o estudo de Iglesias et al. (2009) sobre o potencial energético das ondas na Galiza, noroeste da Espanha, fornece uma importante comparação regional. Utilizando dados de boias e modelagem numérica, este estudo identifica áreas com elevado potencial energético e discute a sua viabilidade técnica. Este trabalho é relevante para a nossa dissertação, pois incide sobre a energia da onda na Península Ibérica e oferece uma base com-

parativa para os resultados obtidos na nossa dissertação.

A base de dados IBIS (Toledano et al., 2023) é uma base de dados mais recente, que repousa sobre uma malha espacial mais fina do que a base de dados ERA5, embora não forneça informação sobre um leque de variáveis tão alargado. Existem vantagens no uso desta base de dados na caracterização do clima de agitação marítima, mas, tanto quanto é do nosso conhecimento, este recurso ainda não foi usado na avaliação do potencial energético na região geográfica que nos interessa nesta dissertação, ou seja, na costa de Portugal Continental e Oeste da Galiza.

O estudo Dialyna and Tsoutsos (2021) foca-se nas tecnologias de Conversão de Energia das Ondas por dispositivos WECs e do seu potencial de aplicação no Mar Mediterrâneo. O estudo destaca que, embora existam muitos desafios tecnológicos e de infraestrutura, a energia das ondas é uma opção promissora devido à sua elevada densidade energética e à sua previsibilidade. Além disso, esse artigo sublinha que a escolha do tipo de WEC deve ser adaptada às características específicas do local de implementação, o que reforça a importância de estudos regionais detalhados como o que está a ser realizado nesta dissertação.

Os resultados e figuras apresentados nesta dissertação foram obtidos recorrendo ao software interativo MATLAB, que se mostrou particularmente útil devido à sua capacidade de ler eficientemente ficheiros NetCDF e às suas vantagens no cálculo matricial. O trabalho subjacente exigiu a escrita de milhares de linhas de código.

Esta Dissertação é constituída por 7 capítulos, incluindo a introdução ao tema que constitui este Capítulo 1. No Capítulo 2 são discutidos os problemas e desafios relacionados com a energia das ondas, incluindo considerações sobre os dispositivos WECs e a metodologia de análise dos dados disponíveis. No Capítulo 3 são apresentadas as duas bases de dados utilizadas no estudo e as suas particularidades. No Capítulo 4 é apresentada a descrição da física subjacente à agitação das ondas, assim como a caracterização dos dispositivos conversores de energia das ondas (WECs). O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos da análise dos dados climatológicos e a identificação das áreas de maior potencial energético ao longo da costa portuguesa, em termos de potência disponível. No Capítulo 6 é realizada uma discussão sobre a potência útil, incluindo a comparação entre soluções de aproveitamento de energia das ondas baseadas nos dispositivos Pelamis e WaveDragon. A Dissertação termina com algumas considerações gerais,

conclusões e comentários finais (Capítulo 7).

## Capítulo 2.

### Problema em Estudo

Portugal dispõe de uma costa litoral de aproximadamente 987 quilómetros, no entanto poucos estudos têm sido desenvolvidos no sentido de aproveitar esta longa faixa costeira para fins de aproveitamento de energia renovável. Um aproveitamento racional da energia das ondas, numa era de abandono das energias fósseis e da procura de novas fontes renováveis, reveste-se de uma importância estratégica.

Nesta dissertação pretendemos analisar uma faixa do Oceano Atlântico junto à costa portuguesa, alargada à Galiza, com vista a averiguar as localizações mais propícias à instalação de aparelhos de conversão de energia das ondas. Nesse sentido contamos com a informação disponível nas bases de dados ERA5 e IBIS sobre o clima de agitação marítima nessa faixa. Dado que o potencial energético de um local depende essencialmente das características das ondas nesse local, a solução do problema passará por uma análise estatística das ondas, incluindo uma discussão sobre a possibilidade de estarmos perante alterações climáticas.

A principal questão que esta dissertação procura responder é: Quais são as áreas mais promissoras ao longo da costa portuguesa para a instalação de tecnologias de conversão de energia das ondas? E quais dispositivos são mais eficazes para utilização nessas áreas específicas?

Para dar resposta a esta questão, esta dissertação propõe-se:

- Avaliar o potencial energético das ondas ao longo da costa portuguesa alargada à costa ocidental da Galiza, utilizando dados climatológicos das bases de dados ERA5 e IBIS.
- Comparar a eficiência de diferentes dispositivos de conversão de energia das ondas, incluindo o Pelamis e o WaveDragon, considerando as características específicas das ondas em diferentes regiões da costa.

- Identificar as áreas com maior potencial energético e discutir as implicações para o desenvolvimento de parques de energia das ondas em Portugal.

As variáveis cuja informação será retirada das bases de dados são: a altura significativa da onda,  $H_S$ , que é definida como a altura média do terço mais alto das ondas; o período de energia,  $T_E$ ; a orientação das ondas; outras variáveis que, embora menos cruciais, descrevem o clima de agitação marítima.

## Capítulo 3.

### Dados disponíveis

Ao longo deste trabalho foram utilizadas duas bases de dados diferentes. Na primeira base de dados, que denominamos ERA5, foram objetos de estudo os dados sobre as variáveis correspondentes a altura significativa das ondas, ao período de pico, ao período de energia, ao período de zero ascendente e direção das ondas além das variáveis correspondentes a separação da ondulação ( *swell* ) e ondas de vagas ( *wind waves* ) das variáveis altura significativa das ondas e período de energia. Na segunda base de dados, que denominamos IBIS, menos detalhada em termos de variáveis disponíveis, mas mais precisa, foram objetos de estudo apenas as variáveis correspondentes a altura significativa e ao período de energia.

As variáveis da base de dados ERA5 encontram-se no formato longitude×latitude×tempo, e o período de tempo considerado estende-se desde as zero horas do dia 1 de janeiro de 1940 até às vinte e três horas do dia 31 de dezembro de 2023, correspondendo assim um período de 83 anos. A latitude e longitude varridas correspondem a uma malha de 0.5 em 0.5 graus ao longo de 45.5 °N a 33.5 °N para latitude a 15.5 °E a 5.5 °E para a longitude. A base de dados ERA5 tem a escala temporal compreendida entre o ano mais antigo que estava disponível no seu arquivo e o último ano padrão completo (2023), tendo sido excluídos os dados já disponíveis no arquivo do ano padrão atual (2024). A área escolhida para análise, nesta base de dados, pode considerar-se representativa da costa peninsular ocidental, tendo como foco a zona económica portuguesa respeitante a Portugal Continental.

As variáveis da base de dados IBIS encontram-se também no formato longitude×latitude×tempo, mas o tempo representado estende-se desde as zero horas do dia 2 de janeiro de 1993 às vinte e três horas do dia 26 de dezembro de 2021, correspondendo assim a um período de aproximadamente 28 anos. A latitude e longitude correspondem a uma malha de aproxima-

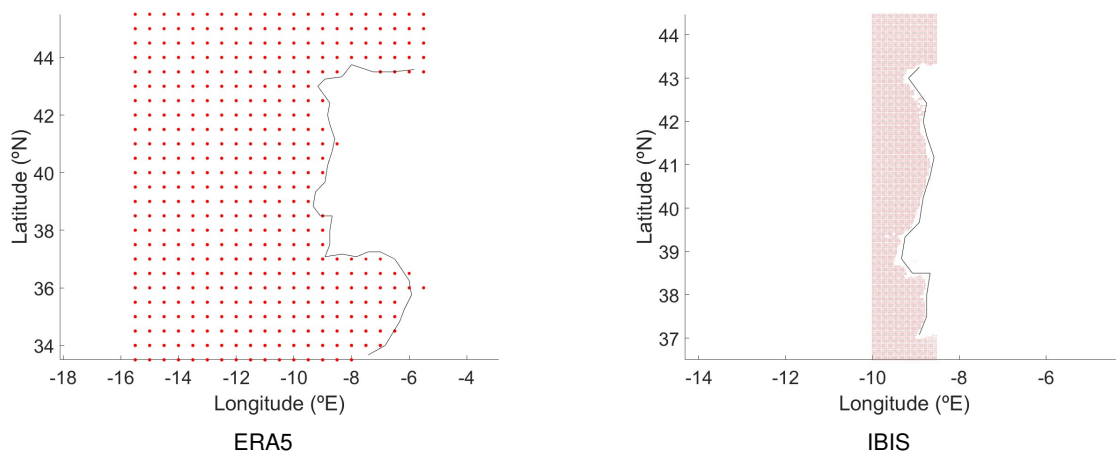
mente 0.027 em 0.027 graus, ao longo de 36.5 °N a 44.5 °N para latitude e 10 °E a 8.5 °E para longitude.

A escolha das variáveis que iremos estudar foi ditada pelo facto de serem aquelas que são necessárias ao cálculo da potência disponível para aproveitamento da energia das ondas pelos WECs, como explicaremos no Capítulo 4.

De realçar que a base de dados IBIS apresenta os dados a escalas muito menores, quer a nível temporal quer a nível espacial, em comparação com a base de dados ERA5. A escala temporal reduzida deve-se exclusivamente à forma como são disponibilizadas as variáveis no seu arquivo, tendo sido adotada, neste estudo, a maior escala temporal disponível. Em termos de tamanho da área geográfica considerada, o facto de termos considerado uma região com uma área menor do que a considerada na base de dados ERA5 deve-se a restrições de memória e capacidades computacionais. O elevado grau de resolução disponibilizado pela rede fina da base IBIS tem como desvantagem a elevada memória necessária para armazenar os dados (cerca de 330 GB para uma área igual a retirada do ERA5) e a elevada capacidade computacional necessária para efetuar os cálculos necessários a partir desse dados.

Apesar de a base de dados ERA5 ter uma maior representatividade temporal, necessária para analisar possíveis alterações climáticas na costa portuguesa a longo prazo, e de ser mais eficiente a nível computacional, a sua baixa resolução pode tornar-se problemática quando utilizada para análise em particular nas zonas mais costeiras. Trata-se de uma desvantagem importante, uma vez que os locais próximos da costas são em geral os locais mais propícios para colocação de dispositivos WEC. A base de dados IBIS deve ser vista como mais fiável quando estão em causa os últimos 28 anos, devido à sua elevada resolução.

A Figura 3.1 mostra a localização geográfica das regiões consideradas, respetivamente na base de dados ERA5 e na base de dados IBIS. Estão representados os pontos de recolha de dados.



**Figura 3.1:** Localizações consideradas nas bases de dados disponíveis ERA5 e IBIS.



## Capítulo 4.

# Agitação Marítima e Energia das Ondas

A agitação marítima e a energia das ondas são fenómenos fundamentais no estudo das ciências do mar e da engenharia costeira. A análise e compreensão destes fenómenos não só proporcionam informação valiosa sobre a dinâmica dos oceanos, mas também apresentam um potencial significativo para a exploração de fontes renováveis de energia. Iremos explorar a origem das ondas marítimas, a sua classificação e a forma como a energia das ondas pode ser aproveitada através de dispositivos conversores de energia.

Os oceanos são constantemente agitados por uma variedade de ondas que se formam devido à interação de diferentes forças, como o vento, a gravidade e as pressões atmosféricas. Estas ondas transportam energia através das suas oscilações e movimentos, oferecendo uma fonte de energia limpa e sustentável que pode ser capturada e convertida em eletricidade. A compreensão detalhada dos tipos de ondas, da sua formação e do comportamento energético é crucial para o desenvolvimento eficaz de tecnologias de conversão de energia das ondas (WEC - Wave Energy Converters).

Neste capítulo, começaremos por examinar a origem e a classificação das ondas marítimas, destacando os diferentes fenómenos que contribuem para a agitação marítima. Em seguida, analisaremos a energia das ondas, apresentando as fórmulas e os princípios físicos subjacentes à sua medição e cálculo. Finalmente, discutiremos os vários dispositivos conversores de energia, explorando as suas características, princípios de operação e estado atual de desenvolvimento.

## 4.1 Origem da agitação marítima

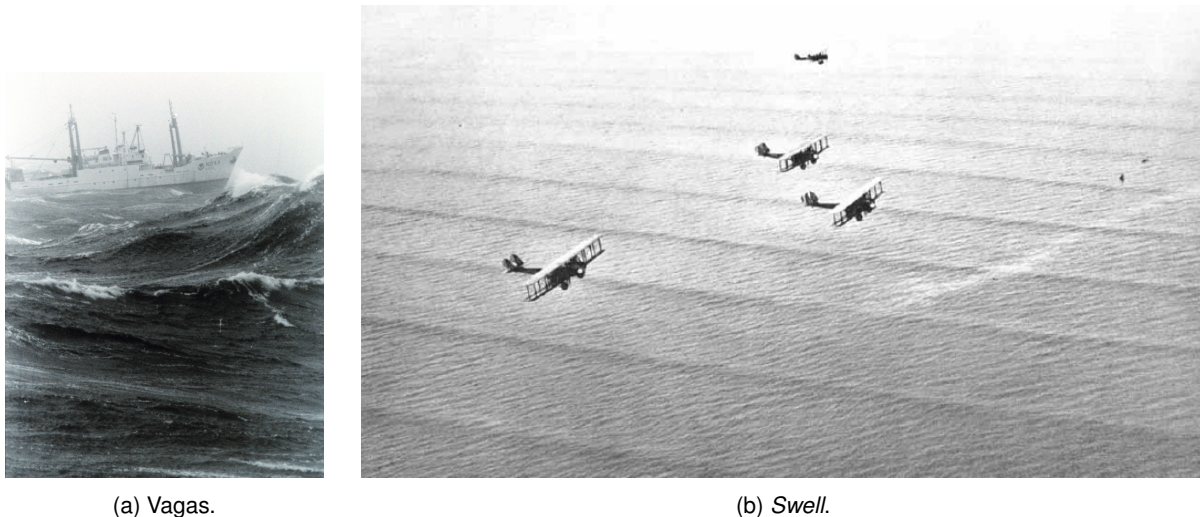
No mar, podem ser observados diversos tipos de ondas, que podem ser classificadas conforme as forças que as originam (ver Tabela 4.1). A energia presente nestas ondas está ilustrada na Figura 4.2.

Os fenómenos de longo período, como as marés, constituem o primeiro grupo, caracterizando-se por variações lentas do nível do mar e representando, nos estudos sobre energia das ondas, o nível médio da água. As ondas geradas pelo vento, com períodos na gama de 1 a 40 s, são as que impulsionam a dinâmica dos conversores de energia das ondas (Wave Energy Converters — WEC).

A energia do vento é transferida para as ondas a velocidades do vento superiores a 1 m/s, originando ondas de curto período, conhecidas como ondas capilares, cuja dinâmica é dominada pelas tensões superficiais. Com a persistência da acção do vento, estas ondas tendem a aumentar em altura e período, passando a sua dinâmica a ser dominada pela força gravitacional (ondas de vento ou ondas gravitacionais). Este tipo de ondas é denominado vagas. Após certo ponto, atinge-se um estado de equilíbrio onde as ondas cessam de crescer: a energia fornecida pelo vento é dissipada imediatamente por um fenómeno de rebentação da crista, conhecido como *white-capping*. Neste estado, diz-se que o mar está completamente desenvolvido. A condição de mar completamente desenvolvido depende da distância ao longo da qual a tempestade se desenrola ou do tempo de duração da tempestade, bem como da velocidade do vento. Quando as ondas se afastam da zona onde o vento sopra ou quando este cessa, podem propagar-se por longas distâncias sem perda significativa de energia. Neste estado, estas ondas são designadas por *swell* (ver Figura 4.3) (Folley, 2017).

Vagas e *swell* apresentam características distintas. O *swell* tem características de onda plana (bi-dimensional), com cristas longas e propagando-se numa única direcção. As vagas são ondas com características tridimensionais, com cristas relativamente curtas, propagando-se em múltiplas direcções (elevada dispersão direcional) (ver Figura 4.1).

Ao entender a origem e a classificação das ondas marítimas, podemos avançar para a análise da energia que essas ondas contêm e como essa energia pode ser medida e aproveitada.



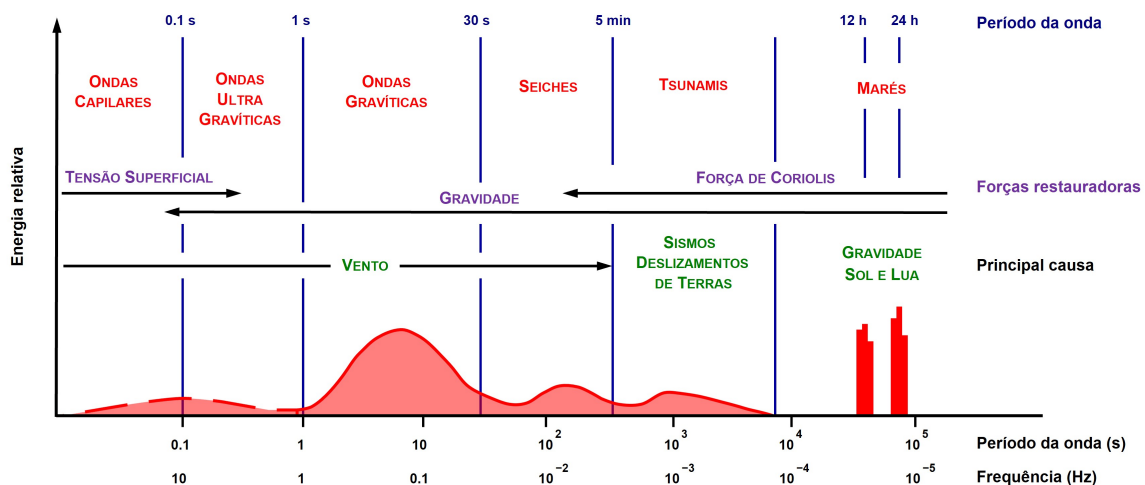
(a) Vagas.

(b) Swell.

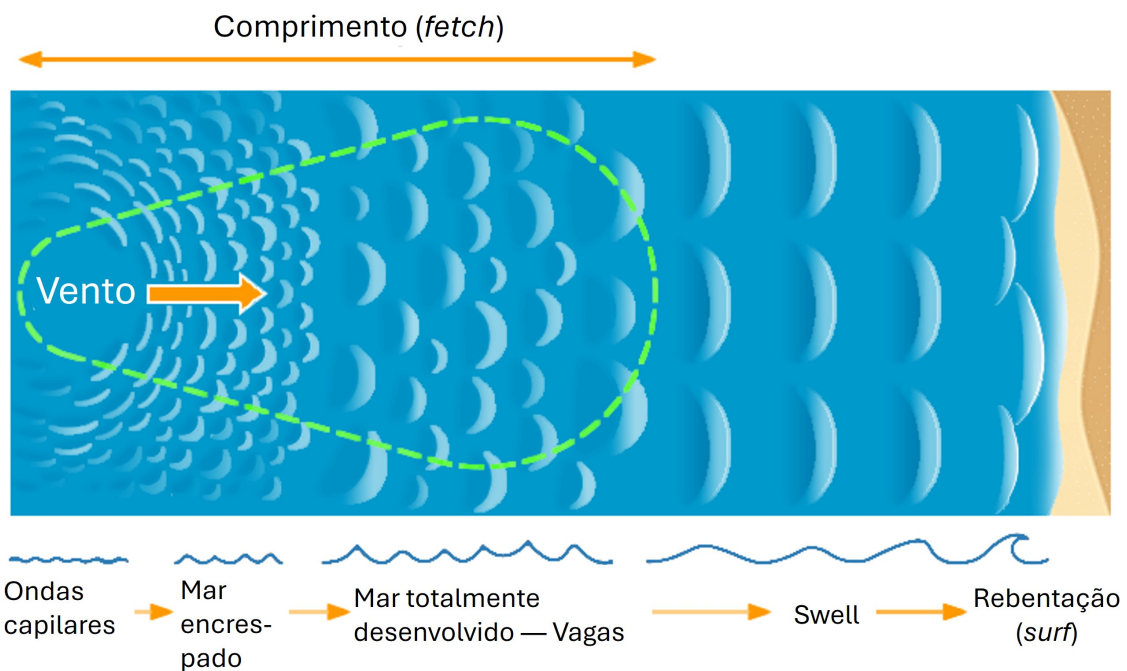
**Figura 4.1:** (a) Vagas nos George Banks (origem: NOAA). (b) Swell na costa do Panamá (origem National Geographic, 1933).

Fenómeno	Origem	Período
Surges	Pressão atmosférica e vento	1 – 30 dias
Marés	Forças gravitacionais da Lua e do Sol	aprox. 12 e 24 h
Onda barométrica	Variações da pressão atmosférica	1 – 20 h
Tsunami	Terramoto, deslizamento submarino ou vulcão submerso	5 – 60 min
Seichas	Ressonância de componentes de ondas de longo período em bacias portuárias	1 – 30 min
Vagas	Tensões superficiais causadas pelo vento na superfície do mar	< 25 s
Swells	Ondas geradas em tempestades distantes	< 40 s

**Tabela 4.1:** Classificação das ondas no mar (adaptado de Andersen and Frigaard (2011)).



**Figura 4.2:** Energia relativa das ondas no oceano (adaptado de Munk (1951)).



**Figura 4.3:** Processo de geração das ondas no oceano (adaptado de ©2011 Brooks/Cole—Thomson Learning).

## 4.2 Energia

A potência das ondas em águas profundas é dada pela expressão

$$P_f = \frac{\rho \cdot g^2 H_s^2 T_E}{64\pi \cdot 1000}, \quad (4.1)$$

onde  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  é a aceleração gravítica,  $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$  é a densidade da água do mar,  $H_S$  é a altura significativa das ondas e  $T_E$  é o período de energia (Stefanakos et al., 2021). A altura significativa da onda,  $H_S$ , é definida como a altura média do terço mais alto das ondas. O período de energia,  $T_E$ , é uma quantidade definida a partir das características espectrais da onda, através de um quociente de momentos espectrais.

A potência das ondas é medida por unidade de comprimento de crista da onda e avalia a potência total disponível no mar. Apenas uma parte dessa potência é convertida em potência útil pelos conversores de energia das ondas.

## 4.3 Dispositivos Conversores de Energia

Um dispositivo conversor de energia das ondas, ou Wave Energy Converter (WEC) em inglês, é um dispositivo que converte energia das ondas em energia mecânica através de uma turbina, que aciona um gerador e produz energia elétrica. É uma tecnologia que se encontra em contínuo desenvolvimento (Lagoun et al., 2010; Lopes de Almeida, 2017; Patel et al., 2018; Clemente et al., 2022; Zeng et al., 2022).

### 4.3.1 Tipos de conversores

Uma das classificações tem em conta o princípio de funcionamento do dispositivo (Lagoun et al., 2010; EMEC, 2024), dos quais se listam os mais frequentes (ver também Figura 4.4).

**Absorvedor pontual:** o sistema consiste numa boia, movendo-se ao longo de um eixo vertical.

O sistema é omnidirecional, absorvendo energia de todas as direções. O deslocamento vertical da boia, provocado pela passagem da onda, movimentam um pistão que ativa a

turbina.

**Atenuador:** este sistema é essencialmente um dispositivo longo, composto por vários segmentos cilíndricos ligados entre si. Estes dispositivos flutuam orientados ao longo da direção de propagação das ondas, extraíndo energia do movimento relativo dos cilindros.

**Pêndulo invertido:** este dispositivo consiste numa placa vertical montada sobre um eixo horizontal. A placa tem um movimento pendular que acompanha a componente horizontal do movimento orbital das partículas de água, induzido pelas ondas. Um êmbolo hidráulico irá acionar as turbinas.

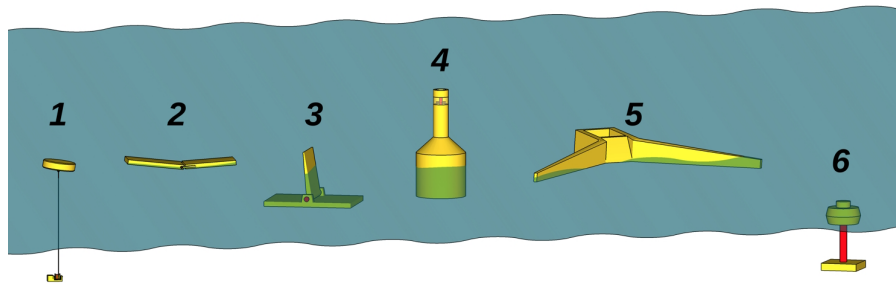
**Coluna de água oscilante:** uma coluna de água oscilante é uma estrutura oca, em torre, parcialmente submersa, com uma abertura abaixo da superfície da água. As ondas fazem com que a coluna de água oscile no interior da torre, comprimindo e descomprimindo a coluna de ar imediatamente acima. Esta coluna de ar faz girar uma turbina, independentemente da direção do fluxo de ar.

**Dispositivo de galgamento:** estes dispositivos são semelhantes a reservatórios flutuantes. As ondas percorrem uma rampa, galgando-a e enchendo o reservatório de água. Quando o reservatório está cheio, água retorna ao mar através de turbinas de baixa queda instaladas no fundo. A rampa é orientada paralelamente à crista das ondas. Alguns destes dispositivos têm longos braços que são usados como concentradores da energia da onda, orientando a onda para a rampa.

**Dispositivo acionado por diferencial de pressão:** estes dispositivos são fixados ao fundo do mar, em zonas de pequena profundidade. O movimento das ondas faz com que o nível do mar oscile, induzindo um diferencial de pressão no dispositivo. Esta oscilação de pressão, bombeia um fluido através de uma turbina, gerando energia elétrica.

#### 4.3.2 Matrizes de potência

Idealmente, a potência absorvida por um WEC seria obtida pelo produto entre a potência disponível por unidade de largura de crista,  $P_f$ , e a dimensão do WEC na direção perpendicular



**Figura 4.4:** Tipos de WECs — 1. absorvedor pontual; 2. atenuador 3. pêndulo invertido; 4. coluna de água oscilante; 5. dispositivo de galgamento; 6. dispositivo acionado por diferencial de pressão (adaptado de ©2010 Ingvald Straume—Wikimedia Commons).

à propagação da onda, i.e.  $P_w = p_f \times L$ , onde  $L$  seria a máxima largura do WEC. No entanto, os dispositivos apresentam sempre um rendimento inferior a 100 %. Assim, a potência útil, potência absorvida pelo WEC, é dada por

$$P_w = P_f \times L_W, \quad (4.2)$$

onde  $L_W = L_W(H, f)$  é a largura de captura.

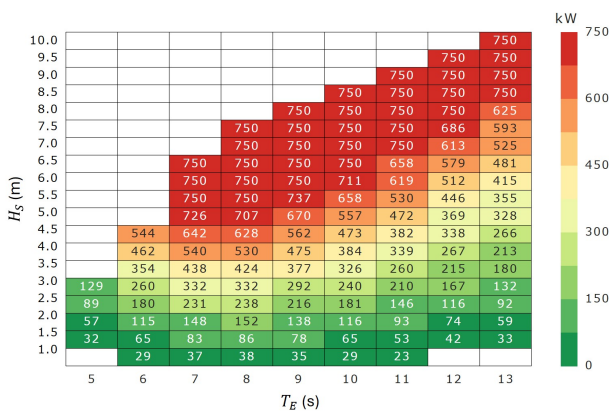
A determinação da potência útil é feita experimentalmente, *in situ* ou em laboratório, e publicada pelos fabricantes sob a forma de tabelas de dupla entrada  $P_w = P(H_S, T_E)$ , designadas por matrizes de potência.

Nesta dissertação, foi estudada a possibilidade de instalação na costa ocidental ibérica de três tipos de WEC: Archimedes Wave Swing (do tipo acionado por diferencial de pressão); Pelamis (do tipo atenuador); e WaveDragon (do tipo acionado por galgamento). Algumas características gerais destes dispositivos estão resumidas na Tabela 4.2, e as suas matrizes de potência são apresentadas na Tabela 4.3. As matrizes de potências destes dispositivos podem ser consultadas em Guillou and Chapalain (2018) e (Sinden, 2005).

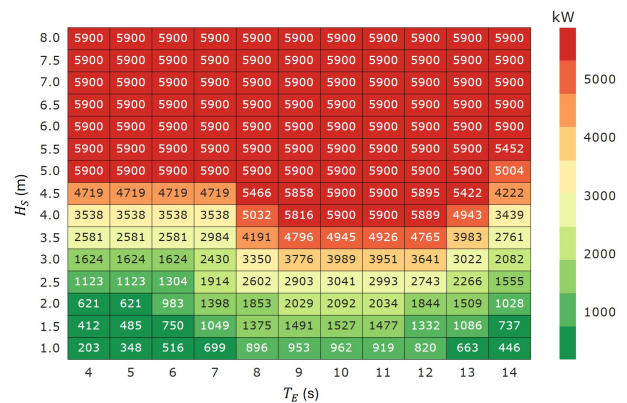
Avaliação do Potencial Energético na Zona Costeira Portuguesa

Dispositivo	Potência Unitária (kW)	Profundidade de Operação (m)	Princípio / Movimento	Dimensão (m)
AWS (Archimedes Wave Swing)	2403	>100	Diferencial de pressão / Vertical	25
Pelamis	750	>50	Atenuador / Horizontal & vertical	—
WaveDragon	5900	>30	Galgamento / —	300

Tabela 4.2: Características gerais de alguns WECs (extraído de Patel et al., 2018; Rusu, 2014; Rusu and Onea, 2016).



(a) Pelamis



(b) WaveDragon

$H_s$ (m)	$T_g$ (s)																										
	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5	15.0	15.5	16.0	16.5	17.0	17.5	18.0
0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.0	2	7	13	19	26	34	41	48	58	68	81	93	105	118	131	144	153	163	183	203	213	223	223	223	223	225	227
1.5	4	15	28	41	56	72	85	99	121	143	173	203	226	248	266	285	309	334	357	380	389	398	398	398	398	403	409
2.0	8	26	49	73	100	127	150	172	210	247	292	337	366	395	418	442	482	523	543	563	579	596	596	596	596	597	598
2.5	15	43	78	113	159	205	234	263	320	376	438	499	531	563	603	643	675	708	741	774	785	797	797	797	797	800	804
3.0	25	61	111	161	227	293	339	386	453	521	600	680	722	765	827	888	897	906	945	984	996	1009	1009	1009	1009	1003	998
3.5	35	92	155	218	305	391	454	517	605	694	772	851	913	975	1036	1096	1119	1141	1163	1185	1198	1211	1211	1211	1211	1208	1206
4.0	35	114	194	273	380	486	572	659	776	894	961	1027	1103	1179	1227	1275	1316	1357	1365	1374	1394	1414	1414	1414	1414	1415	1416
4.5	0	0	235	332	479	626	722	819	957	1096	1168	1240	1320	1401	1449	1497	1547	1598	1590	1583	1610	1637	1637	1637	1637	1616	1595
5.0	0	0	280	400	592	784	899	1014	1144	1274	1380	1487	1569	1651	1691	1731	1785	1838	1807	1777	1806	1836	1836	1836	1836	1806	1777
5.5	0	0	320	432	641	849	1033	1216	1331	1446	1568	1690	1778	1867	1919	1970	1977	1984	1994	2005	2017	2030	2030	2030	2030	1990	1951
6.0	0	0	0	0	680	944	1155	1367	1495	1623	1759	1895	1983	2072	2137	2202	2205	2207	2226	2246	2240	2234	2234	2234	2234	2194	2154
6.5	0	0	0	0	720	1123	1335	1547	1678	1809	1963	2116	2200	2284	2332	2380	2425	2470	2452	2434	2403	2373	2373	2373	2373	2354	2336

(c) Archimedes

Tabela 4.3: Matrizes de potência dos dispositivos (extraídas de Guillou and Chapalain, 2018; Sinden, 2005).

## Capítulo 5.

# Análise Exploratória dos Dados e Modelação

Neste capítulo apresentamos uma descrição das variáveis mais importantes para o nosso estudo, a saber  $H_S$ ,  $T_E$  e  $P_f$ . Para além destas variáveis, analisámos ainda, embora com menos ênfase, algumas variáveis complementares que permitem perceber as características das ondas. A descrição estatística que apresentamos a seguir incluirá uma abordagem de descrição do clima de agitação marítima na costa ibérica, na região em estudo.

### 5.1 Descrição do clima de agitação na costa ocidental ibérica

Apresenta-se de seguida uma descrição estatística das variáveis  $H_S$  (Figura 5.1),  $T_E$  (Figura 5.2),  $P_K$  (Figura A.1) e  $T_Z$  (Figura A.2), conforme constam da base de dados ERA5. Tendo em consideração que, no cálculo da potência disponível,  $P_f$ , as variáveis  $P_K$  e  $T_Z$  são por vezes utilizadas em substituição da variável  $T_E$ , quando esta não está presente na base de dados disponível, incluímos estas duas variáveis suplementares numa análise preliminar (e.g. Stuhlmeier and Xu, 2018; Cornett, 2009). Cada uma das variáveis foi avaliada ao longo do tempo a nível de máximos, mínimos, média, mediana, quantis 25 %, 75 %, 90 %, 95 %, 99 % e 99.9 %, assimetria, curtose e desvio padrão, sendo obtido um mapa para cada uma destas estatísticas espaciais. A variável  $H_S$  tende a apresentar valores elevados no noroeste, enquanto  $T_E$  atinge seus máximos no sudeste, exceto na zona algarvia mediterrânica, onde ambas as variáveis apresentam os valores mais baixos. No entanto,  $T_E$  também mantém valores elevados no noroeste. Atendendo a que a média e a mediana são próximas uma da outra em ambas as variáveis, podemos assumir

Avaliação do Potencial Energético na Zona Costeira Portuguesa

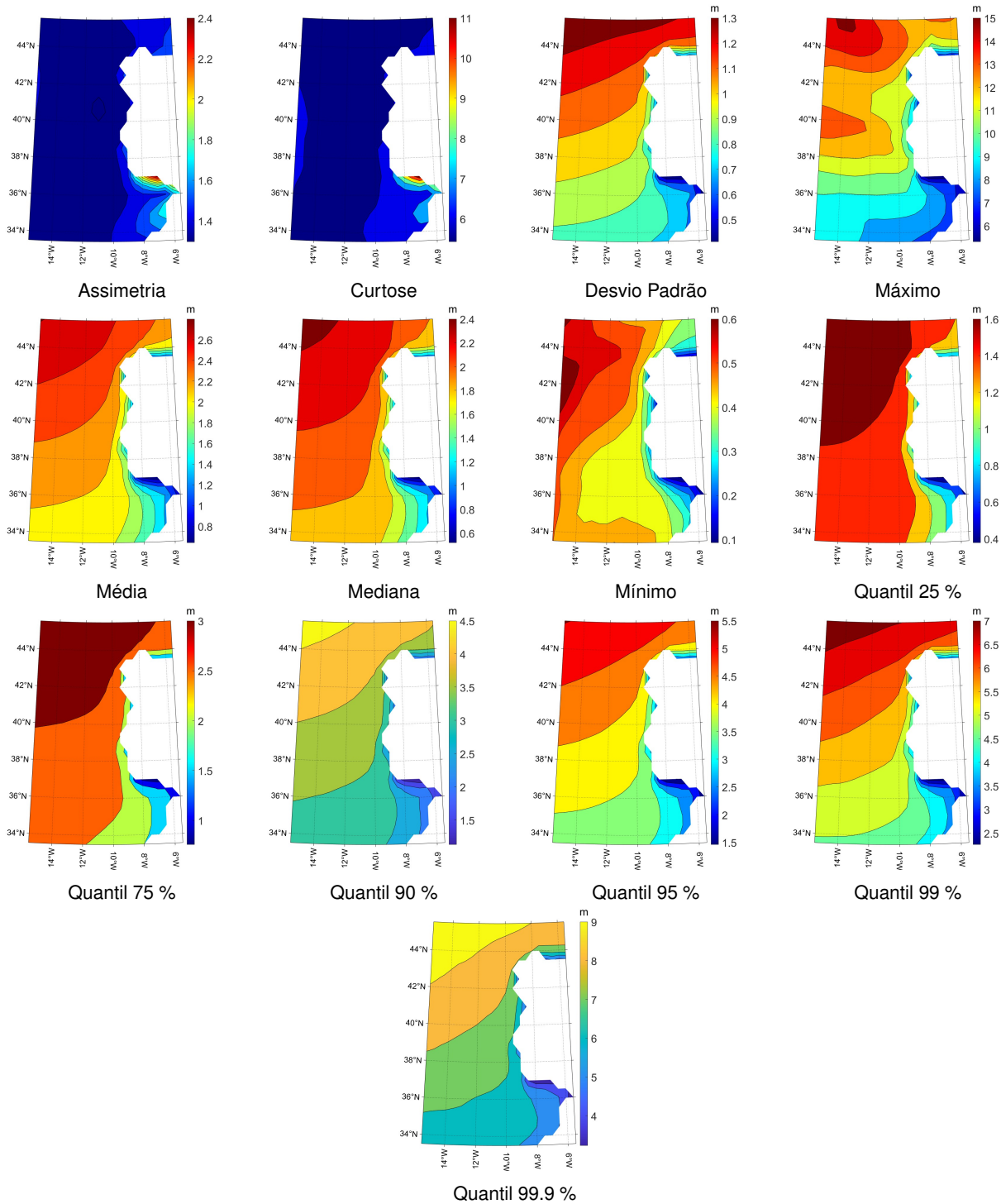


Figura 5.1: Mapas de valores de  $H_S$ .

que as medidas estatísticas são robustas e não são significativamente influenciadas por outliers ou valores extremos. A variável  $H_S$  apresenta uma assimetria significativamente maior do que a variável  $T_E$ , o que será indicativo de que a altura significativa das ondas tende a ter eventos extremos com maior frequência quando comparada com  $T_E$ , que é menos propensa a eventos extremos, isto é as ondas de grande período são pouco frequentes. Os valores de assimetria

Avaliação do Potencial Energético na Zona Costeira Portuguesa

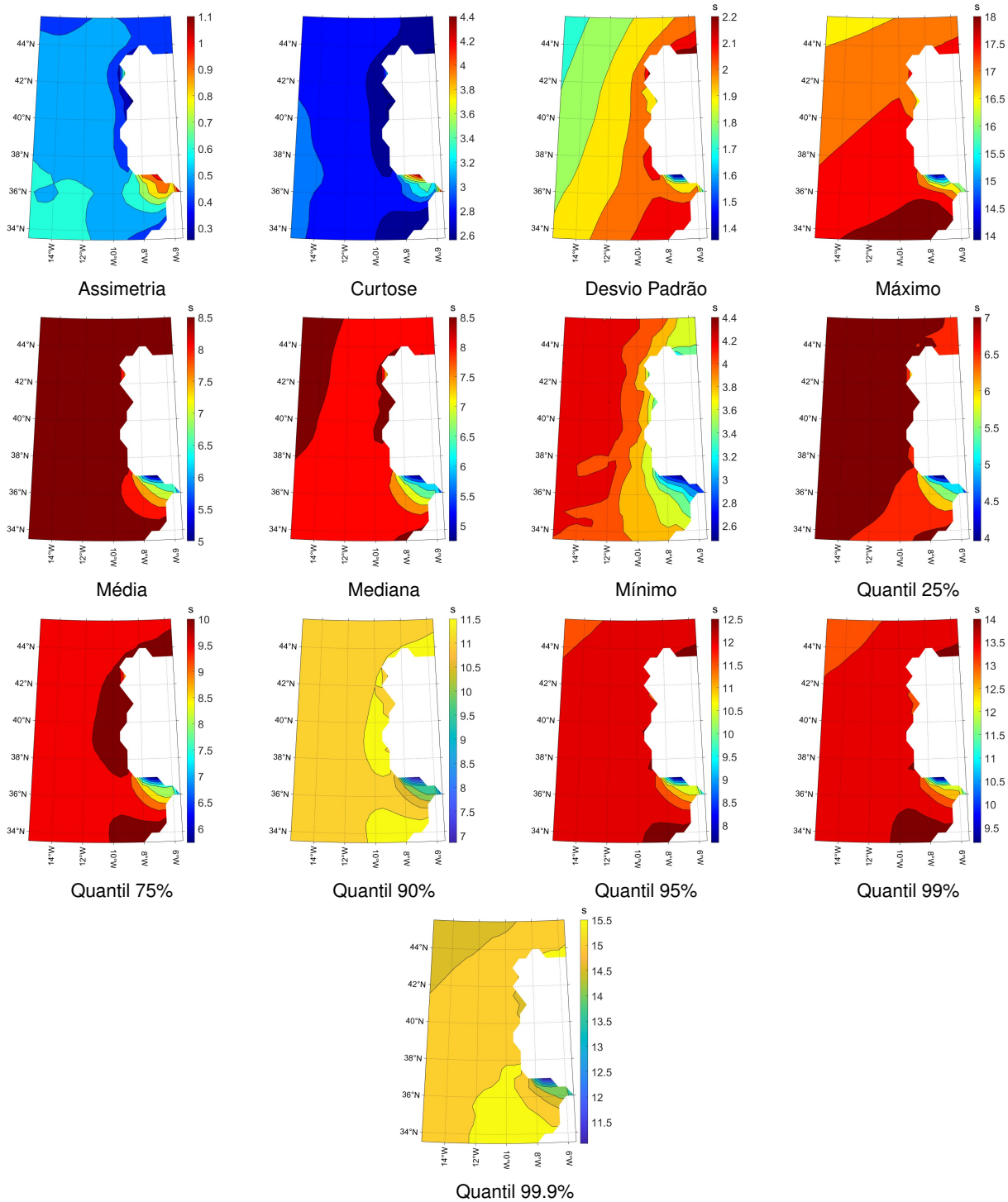
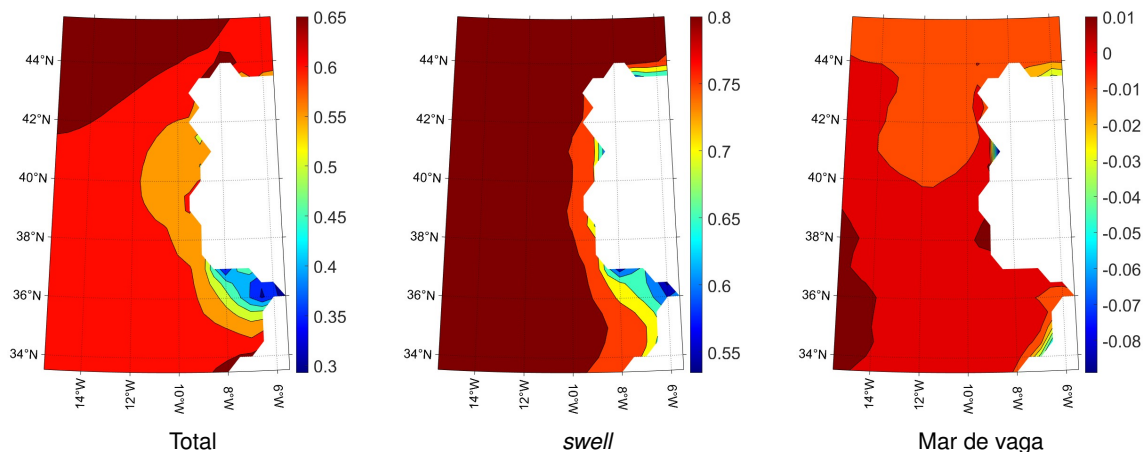


Figura 5.2: Mapas de valores de  $T_E$ .

são sempre positivos em ambas as variáveis, indicando que ambas apresentam distribuições alongadas para a direita, levemente alongada no caso de  $T_E$  e fortemente alongada no caso de  $H_S$ . Os valores de curtose são consideravelmente mais elevados na variável  $H_S$  do que na variável  $T_E$ , o que mais uma vez sugere que a primeira variável apresenta uma maior frequência de valores extremos e também um pico mais acentuado. A variável  $T_E$  apresenta uma maior va-

riabilidade em comparação com  $H_S$ , sugerindo que os períodos das ondas são mais irregulares e menos consistentes do que as alturas das ondas.

Quanto à correlação entre as variáveis  $H_S$  e  $T_E$  (ver Figura 5.3), deparamos com localizações em que existe uma correlação significativa entre estas variáveis, especialmente em áreas não costeiras, com um mínimo observado na região algarvia mediterrânica, onde o coeficiente de correlação é de apenas 0.3 (Figura 5.3a). Interessa também explorar as correlações separadamente nas componentes de *swell* (Figura 5.3b) e vagas (Figura 5.3c). Ao separarmos as variáveis nas suas componentes de *swell* e vagas, notamos uma correlação mais elevada na componente de *swell*, superando consideravelmente a correlação observada antes da separação. Por outro lado, na componente de vagas, o coeficiente de correlação é bastante baixo. É interessante constatar que a elevada correlação em geral é explicada pela componente de *swell*, onde o coeficiente de correlação atinge valores tão altos quanto 0.8.



**Figura 5.3:** Correlação entre altura significativa,  $H_S$ , e período de energia,  $T_E$ .

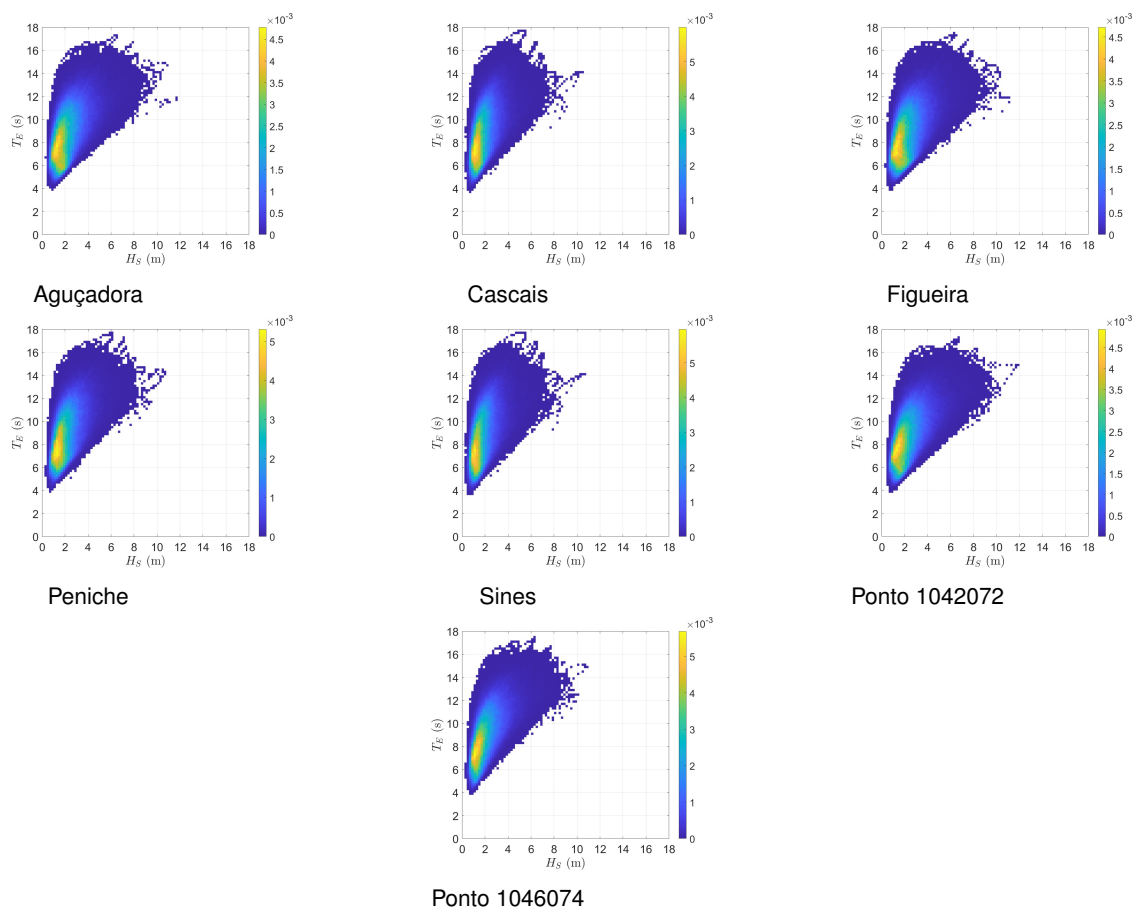
## 5.2 Descrição do clima de agitação em pontos selecionados

Foi selecionado um conjunto de pontos na base de dados ERA5 para uma análise mais aprofundada. Cinco pontos foram escolhidos pelas suas localizações estratégicas na costa portuguesa e foram ainda selecionados mais dois pontos na costa da Galiza. Estes últimos foram também objeto de estudo em Iglesias et al. (2009). Os pontos selecionados estão identificados na Tabela 5.1 através das suas coordenadas.

Localização	Latitude	Longitude
Aguçadora	42°N	9.5°E
Cascais	38.5°N	9.5°E
Figueira da Foz	41.0°N	9.5°E
Peniche	39.5°N	9.5°E
Sines	38.0°N	9.0°E
1042072	43.0°N	9.5°E
1046074	43.5°N	8.5°E

**Tabela 5.1:** Coordenadas dos pontos selecionados.

Para cada um destes pontos foram obtidos os histogramas de  $H_S$  (ver Anexo, Figura A.12) e de  $T_E$  (ver Anexo, Figura A.13), assim como os diagramas de dispersão dos pares  $(H_S, T_E)$  (Figura 5.4).



**Figura 5.4:** Gráficos de dispersão de  $(H_S, T_E)$ .

Os gráficos de dispersão de reta são semelhantes em todos os pontos observados. O gráfico de dispersão entre as variáveis não segue um padrão linear ou uma relação direta. Isto indica

que as variáveis não variam de maneira proporcional ou correlacionada linearmente entre si. A dispersão dos pontos no gráfico não forma uma reta ou uma curva claramente definida e os seus pontos não estão distribuídos de forma a que dividam o quadrado ou o plano de maneira equitativa em duas partes. Isso sugere uma distribuição assimétrica ou não uniforme das observações ao longo das variáveis analisadas.

### 5.3 Direção da ondulação

Foi feito um estudo preliminar da componente direcional associada às ondas. Apresentamos aqui as rosas dos ventos que ilustram as direções das ondas em Aguçadora (Figura 5.5), estando as restantes localizações representadas no Anexo A.7. A Figura 5.5 apresenta a altura significativa das ondas ( $H_S$ ) dividida em seis categorias: entre 0 e 0,5 metros, entre 0,5 e 1 metro, entre 1 e 2 metros, entre 2 e 3 metros, entre 3 e 4 metros e superior a 4 metros, apresentando também a sua totalidade. É possível verificar que, em todas as categorias, as ondas predominam do noroeste, o que, em parte, explica a ocorrência de alturas significativas mais elevadas nesta região.

Os modelos direcionais estatísticos são parte de um subramo da Estatística que lida com direções ou rotações, normalmente em  $\mathbf{R}^2$  ou  $\mathbf{R}^p$  com  $p \geq 3$  (ver e.g. Jammalamadaka and SenGupta (2001); Ley and Verdebout (2017); Johnson and Wehrly (1978)). A eficiência de certas famílias de dispositivos conversores de energia marítima depende da direção do dispositivo, sendo necessário um estudo da direção da ondulação para otimizar a transformação deste meio em energia e, assim, torná-los economicamente viáveis. Em Soukissian (2014) é apresentada uma introdução a conceitos básicos de estatística circular e são apresentados alguns modelos, inclusive modelos bivariados, para lidar com os modelos híbridos emergentes que utilizam energia das ondas e energia do vento.

Avaliação do Potencial Energético na Zona Costeira Portuguesa

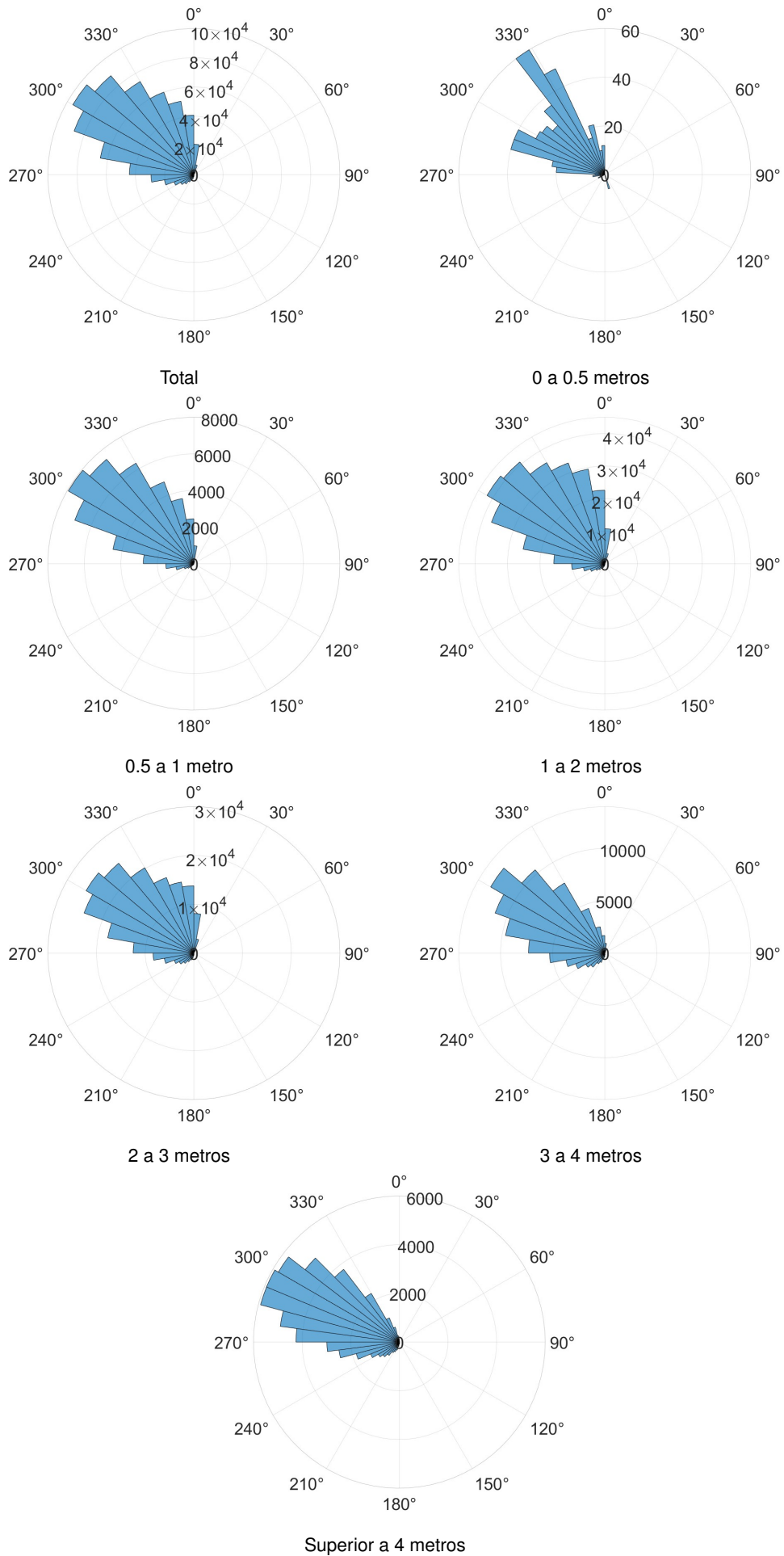


Figura 5.5: Rosas dos ventos das direções de propagação das ondas, em função de  $H_s$ , em Aguçadora.

## 5.4 Análise da Potência disponível

A potência  $P_f$ , definida pela expressão (4.1), representa a quantidade de potência disponível no mar por unidade de comprimento da onda, denominada potência disponível. Realizamos uma análise exploratória semelhante à apresentada nas secções anteriores mas agora para  $P_f$ , e em seguida, separamos as variáveis  $H_S$  e  $T_E$  nas suas componentes de *swell* e *vagas*, recalculando e analisando a potência restrita a essas componentes. Deste procedimento resultaram três variáveis (condicionais):  $P_f$ ,  $P_f$  restrita à componente de *vagas*, e  $P_f$  restrita à componente de *swell*. Cada uma dessas variáveis foi avaliada ao longo do tempo no que respeita a máximos, mínimos, média, mediana, moda, quantis (25%, 75%, 90%, 95%, 99%, 99.9%), assimetria, curtose e desvio padrão, gerando um mapa para cada uma destas estatísticas espaciais.

A componente de *vagas* apresentou mínimos e moda iguais a zero em toda a extensão, e, portanto, as imagens correspondentes a essa componente não são apresentadas nesta Dissertação. Incluímos aqui apenas algumas representações gráficas, a saber a representação da média para cada uma das variáveis analisadas (ver Figura 5.6), estando os restantes mapas disponíveis no Anexo (Figura A.2). Observando a média geral da potência disponível na costa portuguesa, concluímos que a zona mais energética está localizada no noroeste geográfico, enquanto a zona menos energética é o Algarve mediterrânico. Resultados semelhantes estão documentados em Silva et al. (2018). É também notório que a maior parte de  $P_f$  parece originar-se da sua componente de *swell*. Pensando especialmente nos pontos de interesse listados na Tabela 5.1, foram examinados os histogramas da potência disponível nessas localizações e que remetemos para o Anexo, Figura A.6.

Na Figura 5.7 está representada a potência das ondas ao longo das mais de oito décadas consideradas na base de dados ERA5. Para este estudo, cada década corresponde a um período de dez anos, começando no início exato de um dado ano. Por exemplo, a década de 1940 abrange os anos de 1940 a 1949, com início às 0:00 horas do dia 1 de Janeiro. A única exceção é a última década representada, identificada como 2020, que inclui apenas os quatro anos de 2020 a 2023. É possível observar um ligeiro aumento da potência das ondas ao longo das décadas, um fenómeno que é particularmente acentuado na região Norte.

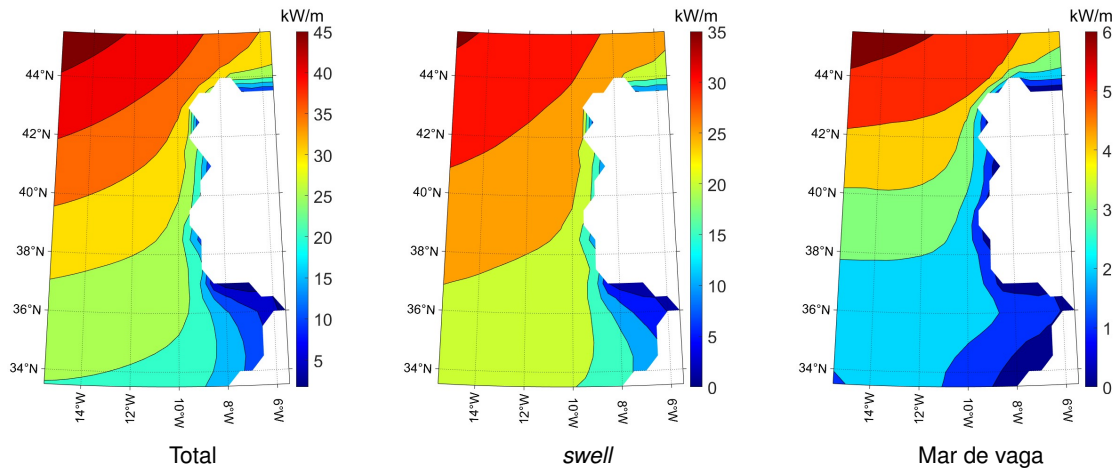


Figura 5.6: Média de  $P_f$ , total e restrita às componentes de *swell* e vagas.

Foram ainda analisadas as diferenças entre as 4 estações do ano, sendo que a separação das estações foi efetuada da seguinte forma: primavera (março, abril, maio), verão (junho, julho, agosto), outono (setembro, outubro, novembro) e inverno (dezembro, janeiro, fevereiro). As respectivas representações gráficas constam da Figura 5.8. O inverno apresenta consistentemente maiores valores de  $P_f$ , enquanto que o verão é a estação com menor potência disponível. A primavera e o outono mostram-se semelhantes entre si, posicionando-se como um meio termo entre o verão e o inverno. O nosso estudo revela resultados semelhantes aos obtidos em Silva et al. (2018).

O fluxo de potência disponível médio, ao longo de cada mês, está representado na Figura 5.9. Para facilitar a visualização das diversas linhas, foram excluídos desta representação os dois pontos escolhidos situados na Galiza, tendo apenas sido representados os cinco pontos situados na costa ocidental portuguesa. Janeiro aparece destacado como o mês mais energético, enquanto que Julho é identificado como o menos energético. Estes são resultados semelhantes aos reportados em Silva et al. (2018). Para os pontos avaliados na costa ocidental portuguesa, a Aguçadora é a localização com o maior fluxo de potência mensal, enquanto Sines apresenta o menor fluxo de potência mensal.

#### 5.4.1 Caracterização da variabilidade temporal da potência disponível

À semelhança de Silva et al. (2018) e Cornett (2009), foram calculados 3 coeficientes de variabilidade: CV, MV e SV, para a região abrangida pelo mapa, assim como para cada um dos

## Avaliação do Potencial Energético na Zona Costeira Portuguesa

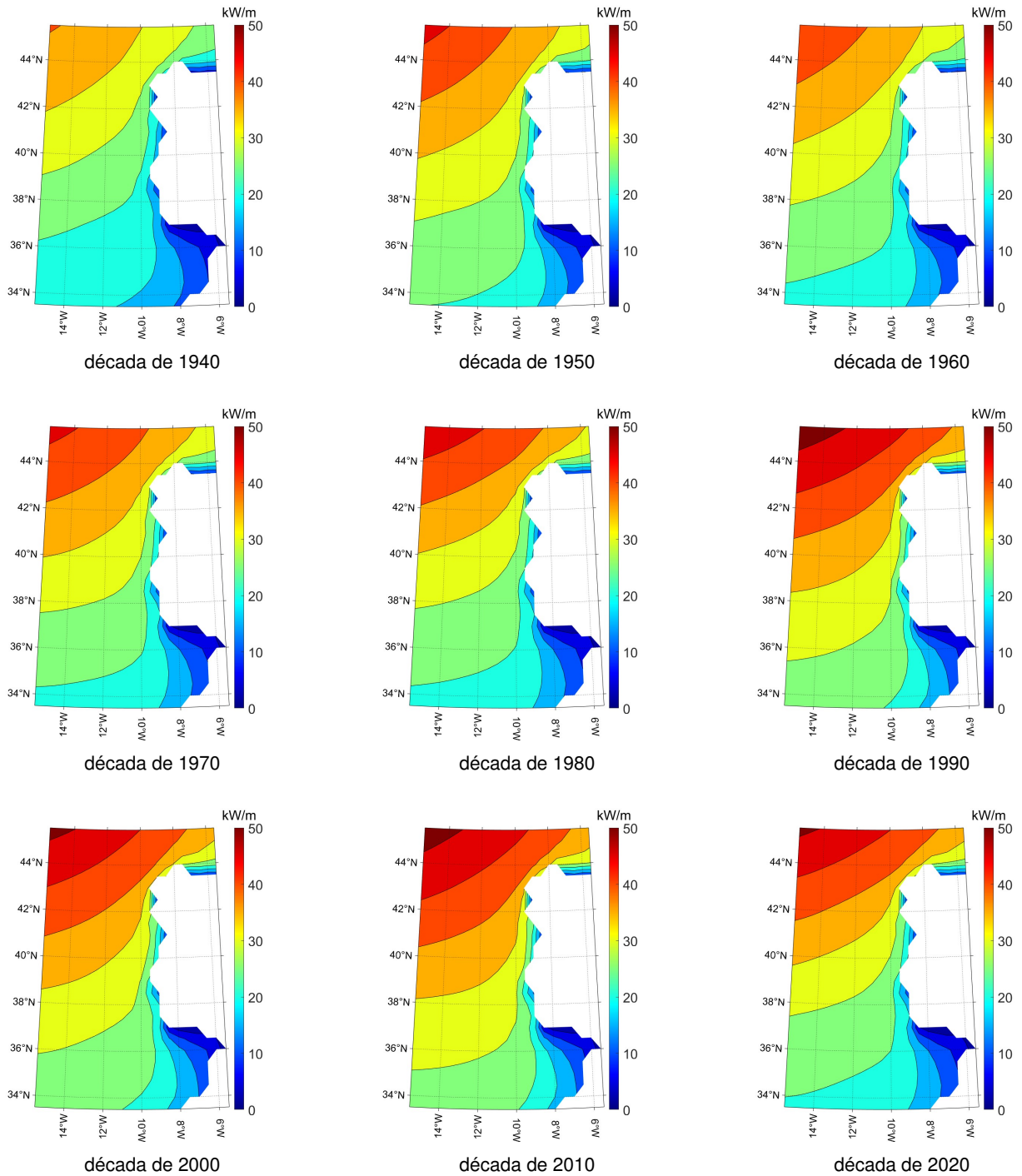


Figura 5.7:  $P_f$  média calculada ao longo das diferentes décadas.

pontos mencionados na Tabela 5.1. O coeficiente de variação (CV) quantifica a variabilidade temporal da potência das ondas, sendo igual a zero quando não há variabilidade. A fórmula utilizada para o cálculo de CV é:

$$CV(P) = \frac{\sigma(P(t))}{\mu(P(t))} \quad (5.1)$$

## Avaliação do Potencial Energético na Zona Costeira Portuguesa

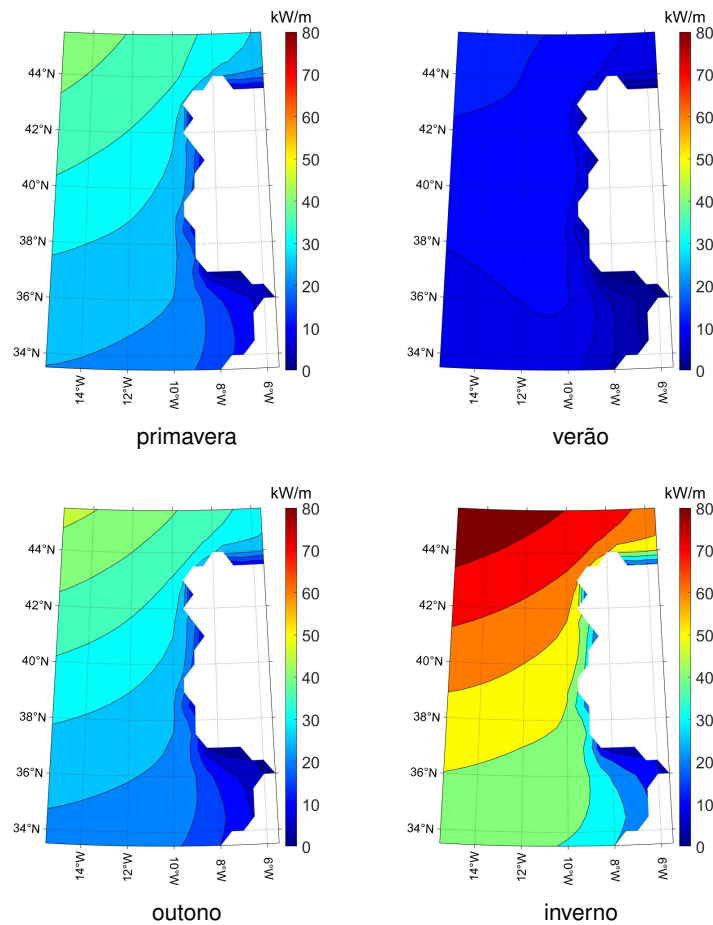


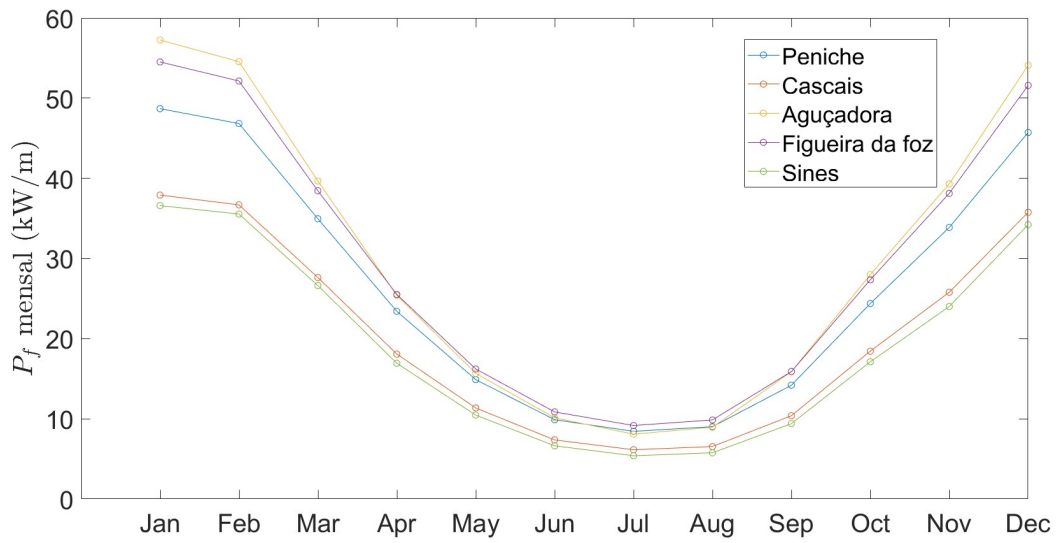
Figura 5.8:  $P_f$  média para cada estação do ano.

onde

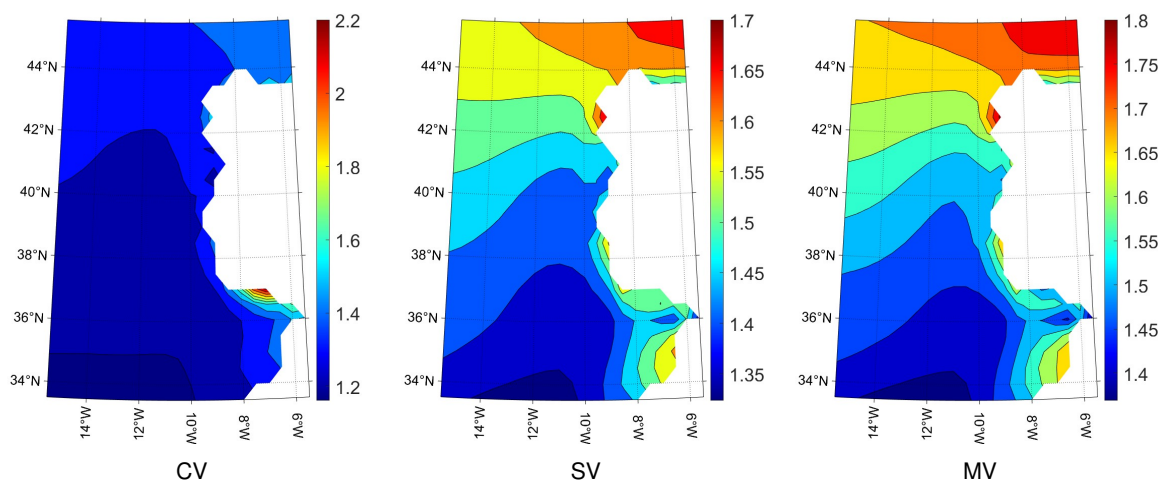
$$\sigma(P(t)) = \text{desvio padrão de } P_f,$$

$$\mu(P(t)) = \text{média de } P_f.$$

Os valores obtidos para o coeficiente CV no presente estudo variam entre 1.2 e 2.2 (Figura 5.10a), valores estes consideravelmente elevados quando comparados com os resultados reportados em Silva et al. (2018), que variam entre 0.5 e 0.8. Os valores que aqui apresentamos são indicativos de uma elevada variabilidade temporal. A região do Algarve apresenta os valores mais elevados, embora, de forma geral, os maiores valores estejam concentrados no Norte, revelando que esta é a região onde existe maior variabilidade no tempo. Analisando a Tabela 5.2, vemos que, para as localizações selecionadas no estudo, o coeficiente CV situa-se entre 1.3 e 1.45, com Peniche a ser a localização com menor variabilidade temporal, com o valor de CV situado nos 1.316, enquanto que, por oposição, o Ponto 1046074 se afasta dos restantes pontos da tabela, com um valor de CV de 1.421.



**Figura 5.9:**  $P_f$  em função do mês do ano, nas localizações selecionadas da costa ocidental portuguesa.



**Figura 5.10:** Valores dos coeficientes CV, MV e SV.

Silva et al. (2018) analisam também o chamado índice de variabilidade sazonal (SV). Este índice quantifica a variabilidade sazonal entre o verão e o inverno. A fórmula utilizada para definir o SV é:

$$SV = \frac{P_{S1} - P_{S4}}{P_{year}}, \quad (5.2)$$

onde

Localização	CV
Peniche/São Pedro Moel	1.316
Cascais	1.332
Sines	1.395
Aguçadora	1.372
Figueira da Foz	1.323
Ponto 1042072	1.369
Ponto 1046074	1.421

**Tabela 5.2:** Valores do coeficiente CV para as diferentes localizações em estudo.

Localização	SV
Peniche/São Pedro Moel	1.456
Cascais	1.499
Sines	1.557
Aguçadora	1.563
Figueira da Foz	1.476
Ponto 1042072	1.592
Ponto 1046074	1.601

**Tabela 5.3:** Valores do coeficiente SV para as diferentes localizações em estudo.

$P_{S1}$  = média de  $P_f$  na estação mais energética (inverno - dezembro a fevereiro),

$P_{S4}$  = média de  $P_f$  na estação menos energética (verão - junho a agosto),

$P_{\text{year}}$  = média global de  $P_f$ .

Os nossos resultados variam entre 1.35 e 1.7 (ver Figura 5.10b), concluindo-se assim que existe uma diferença notória entre as estações do ano designadas por verão e inverno. Os nossos valores são um pouco mais baixos do que os obtidos no estudo realizado em Silva et al. (2018), cujos valores chegam a atingir 2. Analisando a Tabela 5.3 vemos que, para as localizações em estudo, o coeficiente SV situa-se entre 1.46 e 1.61, com Peniche a ser a localização com menor variação entre estações (coeficiente SV igual a 1.456), enquanto que o Ponto 1046074 se afasta dos restantes pontos da tabela, com um valor de SV de 1.601.

Localização	MV
Peniche/São Pedro Moel	1.543
Cascais	1.582
Sines	1.645
Aguçadora	1.660
Figueira da Foz	1.563
Ponto 1042072	1.696
Ponto 1046074	1.711

**Tabela 5.4:** Valores do coeficiente MV para as diferentes localizações em estudo.

O índice de variabilidade mensal (MV) é também usado em Silva et al. (2018) para quantificar a variabilidade existente entre o mês considerado mais ativo (janeiro) e o mês considerado menos ativo (julho), conforme ilustrado na Figura 5.10c; ver também, a propósito, a Figura 5.9. A fórmula utilizada para definir o índice MV é:

$$MV = \frac{P_{M1} - P_{M12}}{P_{year}}, \quad (5.3)$$

onde

$P_{M1}$  = média de  $P_f$  no mês mais energético (janeiro),

$P_{M12}$  = média de  $P_f$  no mês menos energético (julho),

$P_{year}$  = média de  $P_f$  total.

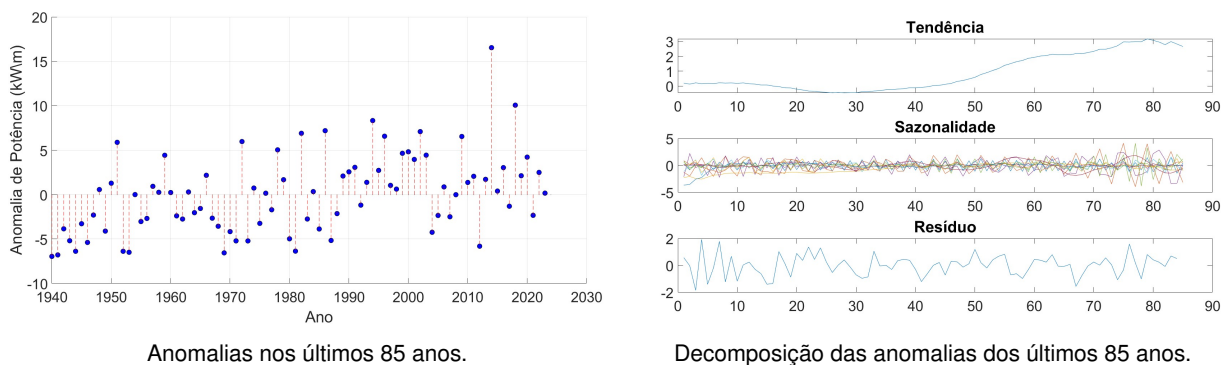
Os resultados que obtivemos para este índice variam entre 1.4 e 1.8 (ver Figura 5.10c). Isto significa que a potência disponível no mar pode chegar quase ao dobro no mês de janeiro, quando comparada com a potência disponível no mês de julho, sendo que a maior variabilidade é observada no Norte. Mais uma vez, os nossos valores são um pouco menos elevados do que os obtidos em Silva et al. (2018), cujos valores chegam a atingir 2. Novamente, ao analisar a Tabela 5.4, verificamos que Peniche continua a ser a localização com menor valor de MV, apresentando menor variação entre os meses de julho e janeiro, e o Ponto 1046074 permanece o ponto com maior afastamento, tendo um valor de MV de 1.711.

Posto isto, uma vez que Peniche é o ponto em que todos os coeficientes de variação são menores, podemos concluir que este será um ponto mais estável ao longo do tempo, mais

especificamente ao longo de um ano padrão, enquanto que o Ponto 1046074, para o qual se obtêm os maiores valores em todos os 3 índices, com alguma margem em relação aos restantes pontos, reflete uma maior instabilidade temporal, nomeadamente anual.

### 5.4.2 Anomalias climáticas

Anomalia climática é a designação dada à diferença entre a média global da potência disponível,  $P_f$ , e a média anual dessa mesma potência calculada num determinado ano. Na Figura 5.11 estão representadas as anomalias climáticas correspondentes aos 85 anos presentes na base de dados ERA5, seguidas da decomposição destas anomalias nas suas vertentes de tendência, sazonalidade e resíduo. Isto permite-nos verificar que existe uma tendência de aumento ao longo dos últimos 85 anos, particularmente acentuada a partir de 1980. Existem também múltiplas sazonalidades, provavelmente associadas a sazonalidades mensais ou anuais inerentes à agitação marítima. A Tabela 5.5 contém os valores das anomalias que se verificaram em cada década. As anomalias são predominantemente negativas até à década de 1980, momento a partir do qual se tornam positivas, indicando uma alteração no comportamento da agitação marítima. É importante notar que 1980 é também o ano a partir do qual a tendência crescente presente nas anomalias dos últimos 85 anos se torna mais óbvia.

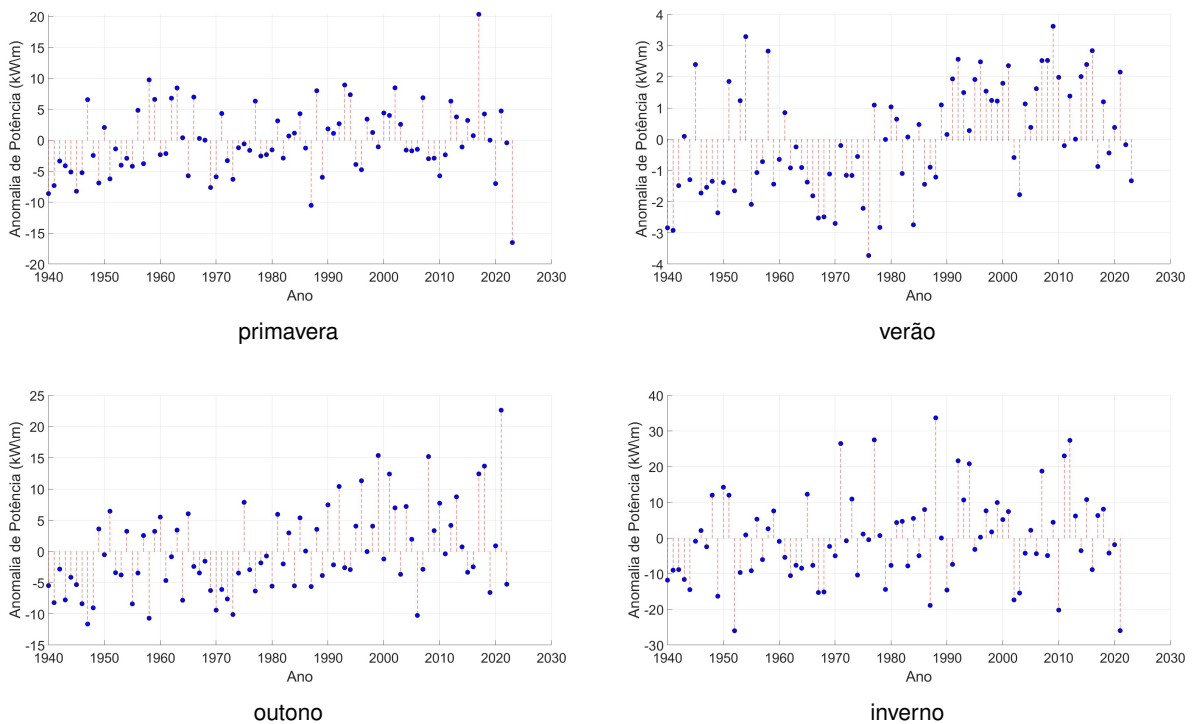


**Figura 5.11:** Anomalias de acordo com a base de dados ERA5.

Os resultados da separação da variável  $P_f$  pelas quatro estações do ano e o re-cálculo das anomalias estão ilustrados na Figura 5.12, seguidos da decomposição destas anomalias em tendência, sazonalidade e resíduo, ilustrada na Figura 5.13. A tendência evidenciada na totalidade dos 85 anos não é encontrada em todas as estações, sendo que uma tendência de subida pode ainda ser visualizada no verão e, de forma muito acentuada, no outono.

Década	Média	Diferença em relação à Média Total ERA5
ERA5 total	30.6627	0.0000
Década 1940	26.3253	-4.3374
Década 1950	30.0935	-0.5691
Década 1960	28.8320	-1.8307
Década 1970	29.9677	-0.6950
Década 1980	30.1026	-0.5601
Década 1990	33.4147	2.7520
Década 2000	32.5981	1.9354
Década 2010	33.8489	3.1862
Década 2020	30.9689	0.3062
IBIS total	29.2732	-1.3895

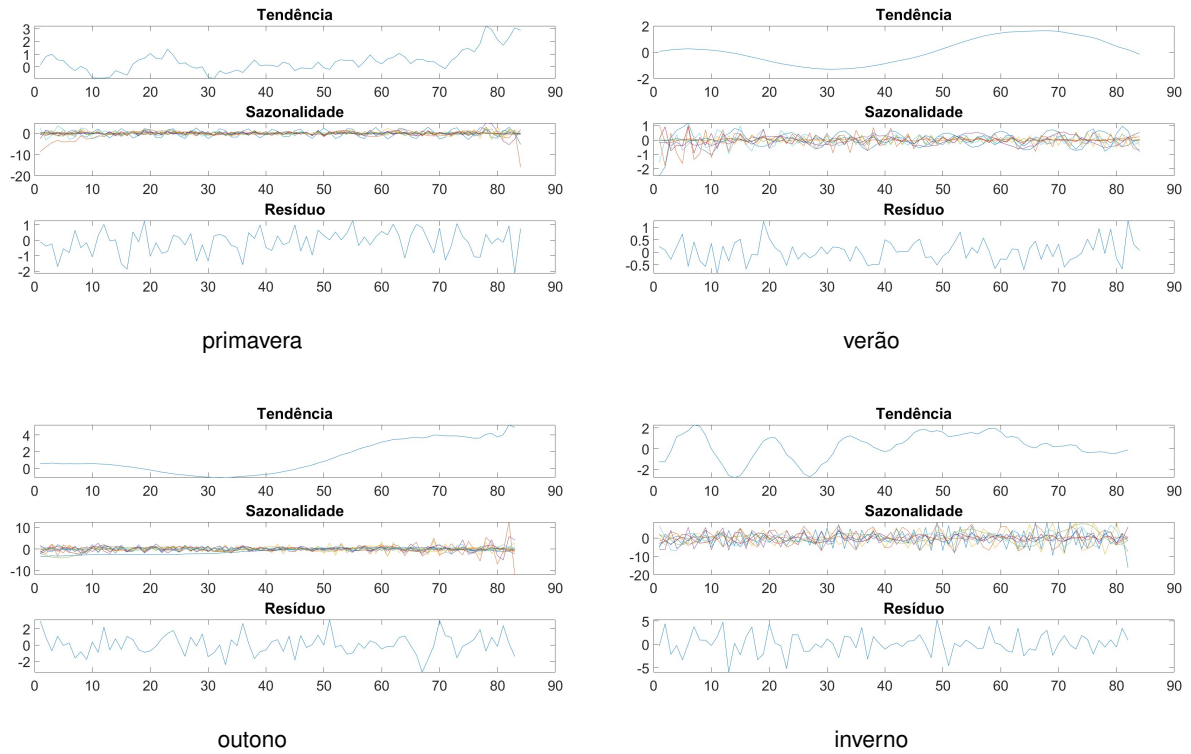
**Tabela 5.5:** Valores das anomalias médias em cada década, calculadas com base na base de dados ERA5.



**Figura 5.12:** Anomalias da variável  $P_f$  para as diferentes estações do ano.

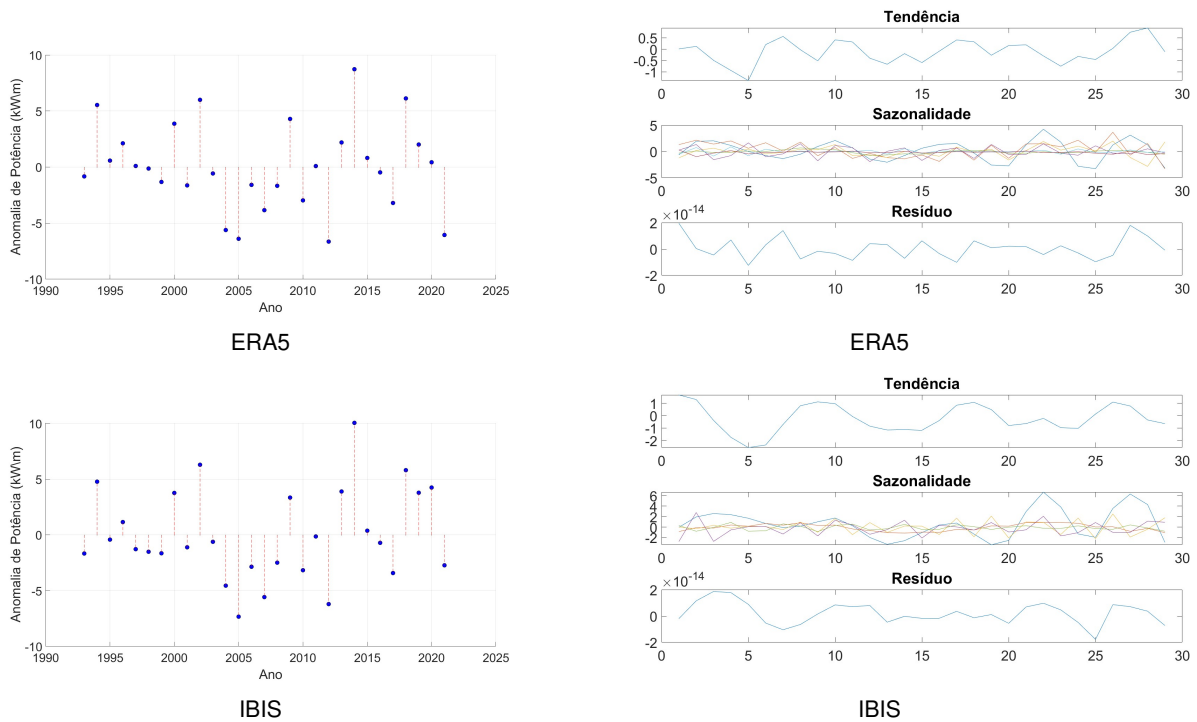
Analisámos também as anomalias recorrendo à base de dados IBIS e, com o objetivo de comparar as duas bases de dados, recalculámos as anomalias da variável  $P_f$  utilizando a base de dados ERA5 no mesmo período de tempo e na mesma área geográfica coberta pela base de dados IBIS. Realizámos novamente a decomposição das anomalias em tendência, sazonalidade

Avaliação do Potencial Energético na Zona Costeira Portuguesa



**Figura 5.13:** Decomposição das anomalias da variável  $P_f$  para as diferentes estações do ano, de acordo com a base de dados ERA5.

e componente residual, conforme ilustrado na Figura 5.14. Observámos que a tendência identificada ao longo de 85 anos não é perceptível nos 28 anos de dados que são comuns a ambas as bases de dados. Não foi encontrada nenhuma tendência significativa em nenhuma delas, no que respeita aos últimos 28 anos. Isso torna-se perceptível na tendência global de 85 anos que se observa na base de dados ERA5, onde parece haver uma estabilidade nos últimos 28 a 30 anos.



**Figura 5.14:** Anomalias da variável  $P_f$  e a sua decomposição, referente aos últimos 28 anos, nas bases de dados ERA5 e IBIS.

## 5.5 Comparação das bases de dados ERA5 e IBIS

Para comparar as bases de dados, a base de dados ERA5 foi reduzida à mesma escala temporal e à mesma área geográfica que a base de dados IBIS. Um novo conjunto de pontos, que está identificado na Tabela 5.6 foi escolhido para uma análise mais aprofundada. De notar que estes pontos têm de facto coordenadas diferentes dos pontos indicados na Tabela 5.1 e foram escolhidos de modo a que se localizassem mais longe da costa do que os usados anteriormente (Tabela 5.1). A razão da escolha deste novo conjunto de pontos reside no facto de ser bem conhecido que a base de dados ERA5 tem pouca precisão em localizações perto da costa.

A potência disponível foi calculada em ambas as bases de dados e está representada nas Figuras 5.15 e 5.16. Ajustando as suas barras de cores para valores iguais de mínimo e máximo, tendo sempre o cuidado de escolher sempre o maior intervalo possível na representação, é possível comparar os mapas no respeito à média (Figuras 5.15a e 5.16a), mediana (Figuras 5.15b e 5.16b), quantis 25 % (Figuras 5.15c e 5.16c), 75 % (Figuras 5.15d e 5.16d), 90 % (Figuras 5.15e e 5.16e), 95 % (Figura 5.15f e 5.16f), 99 % (Figuras 5.15g e 5.16g) e 99.9 % (Figuras 5.15h

Localização	Latitude	Longitude
Aguçadora	42°N	10.0°E
Cascais	38.5°N	10.0°E
Figueira da Foz	40.0°N	10.0°E
Peniche	39.5°N	10.0°E
Sines	38.0°N	10.0°E
1042072	43.0°N	9.5°E
1046074	43.5°N	8.5°E

**Tabela 5.6:** Coordenadas de várias localizações em Portugal, afastadas da linha de costa.

e 5.16h). Não parece haver uma diferença significativa entre as bases de dados apresentadas nestes mapas, com as zonas de maior e menor incidência permanecendo consistentes. No entanto, é possível notar uma ligeira tendência da base de dados ERA5 para apresentar valores um pouco mais elevados.

Os gráficos Quantil-Quantil da variáveis  $H_S$  e  $T_E$  respeitantes aos pontos da Tabela 5.6 estão representados, respetivamente, nas Figuras 5.17 e 5.18. Observa-se um desalinhamento entre as bases de dados ERA5 e IBIS nos gráficos Quantil-Quantil da variável  $H_S$  para pontos de valores mais elevados. Especificamente para ondas com altura superior a 4 metros, parece ocorrer uma sobrevalorização por parte da base de dados ERA5, quando comparada com a IBIS. Em relação à variável  $T_E$ , este desalinhamento é menos significativo, embora ainda seja perceptível, especialmente após os 14 a 16 segundos. No entanto, com exceção dos pontos 1042072 e 1046074, onde há aparentemente uma sobrevalorização semelhante à que acabámos de referir, nos demais pontos, a base de dados ERA5 tende a apresentar valores menores do que a IBIS.

Analisámos também os diagramas de dispersão entre as variáveis  $H_S$  (Figura 5.19) e  $T_E$  (Figura 5.20) das duas bases de dados. As correspondentes representações dos histogramas a 3 dimensões constam dos Anexos A.9 e A.10.

Os diagramas de dispersão, em ambas as variáveis, mostram uma relação positiva linear, com alguma dispersão, o que está em linha com as nossas observações até ao momento. Notavelmente, a densidade de pontos é mais elevada nos valores mais baixos das variáveis, que se concentram ao longo da linha de tendência central, indicando que a maioria dos dados é confiável. Além disso, constata-se a presença de alguns outliers, especialmente nas representações

da variável  $T_E$ .

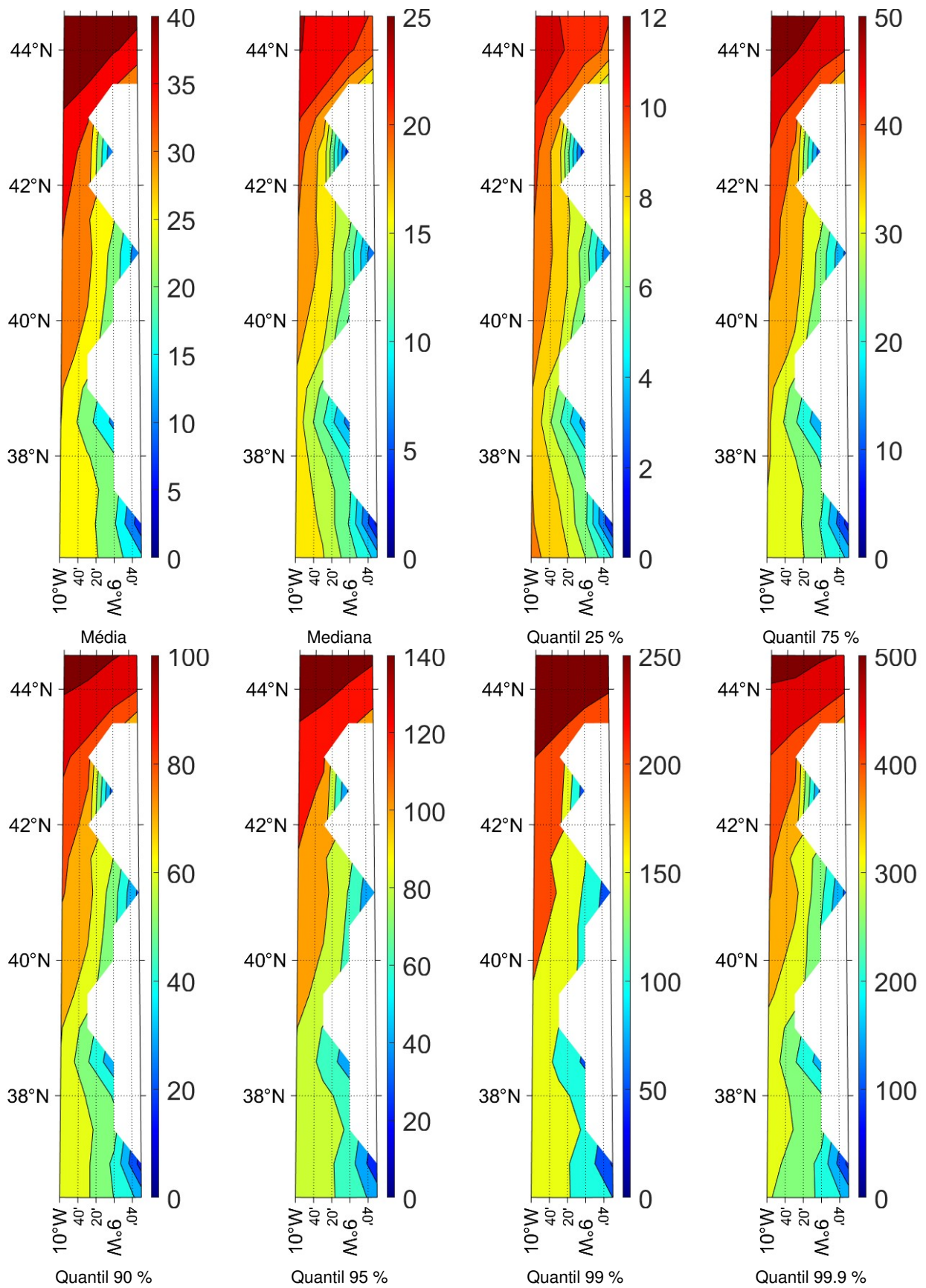


Figura 5.15: A potência disponível,  $P_f$ , de acordo com a base de dados ERA5.

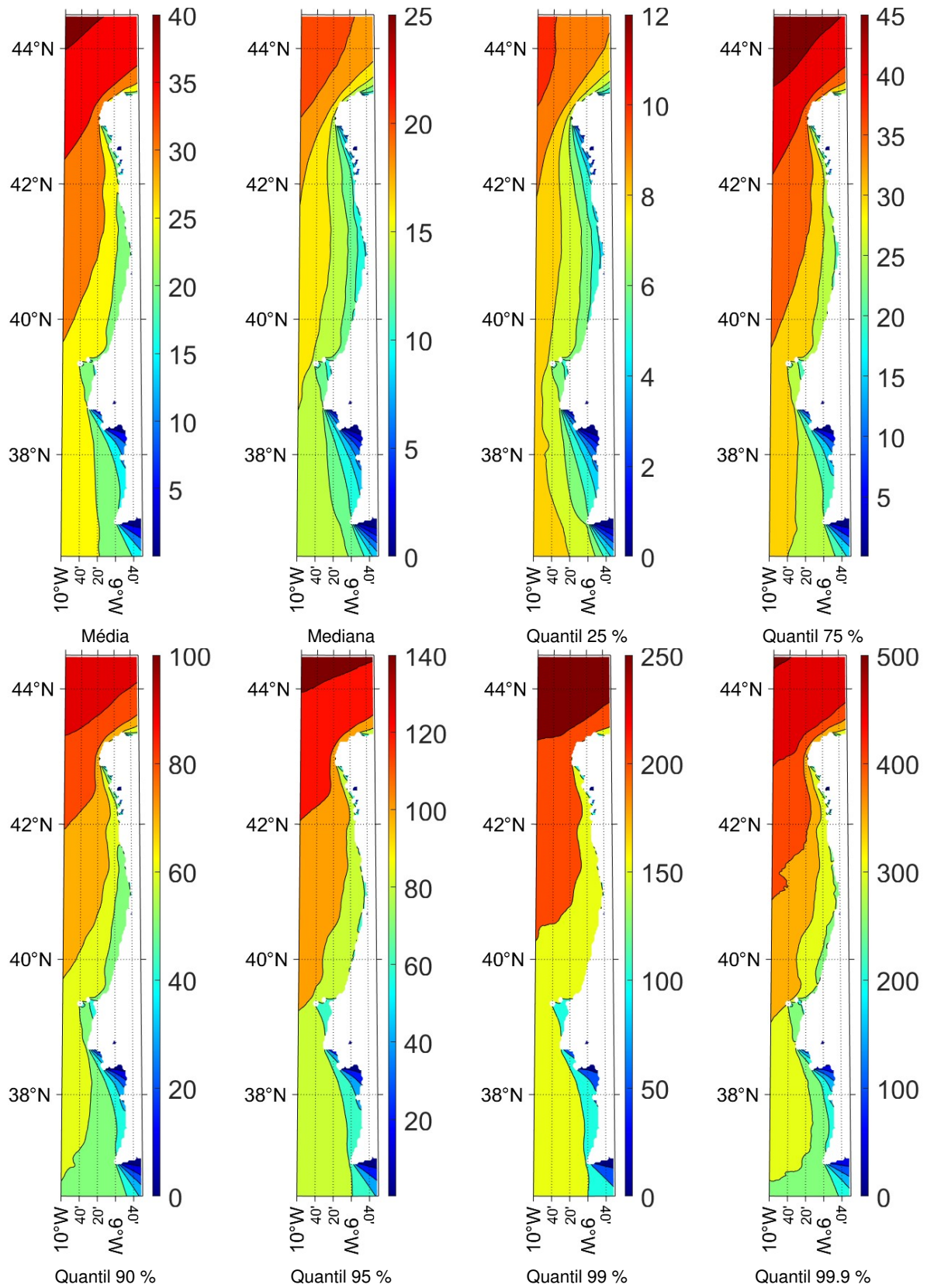
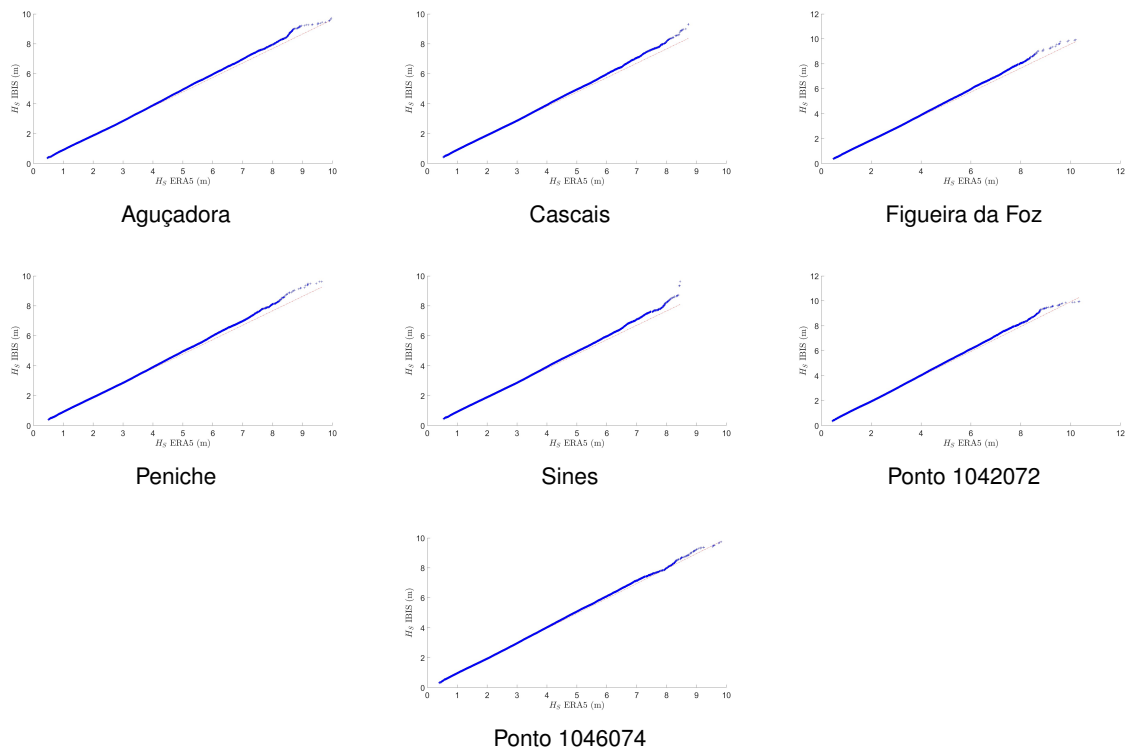
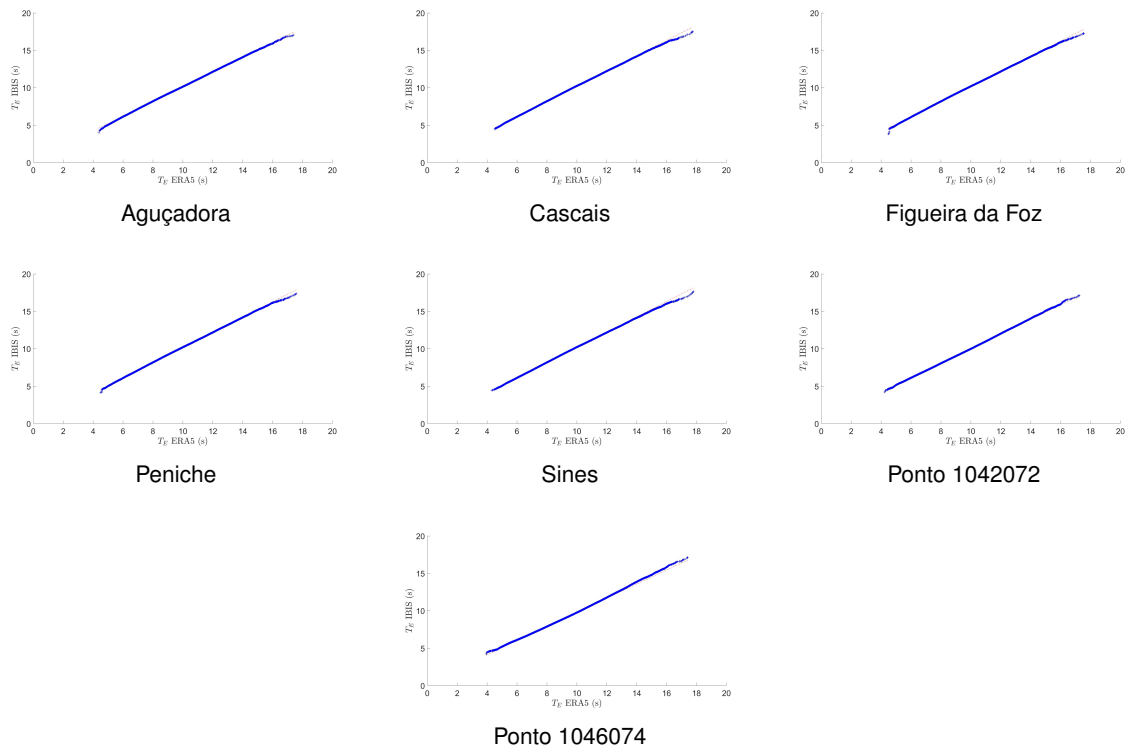


Figura 5.16: A potência disponível,  $P_f$ , de acordo com a base de dados IBIS.

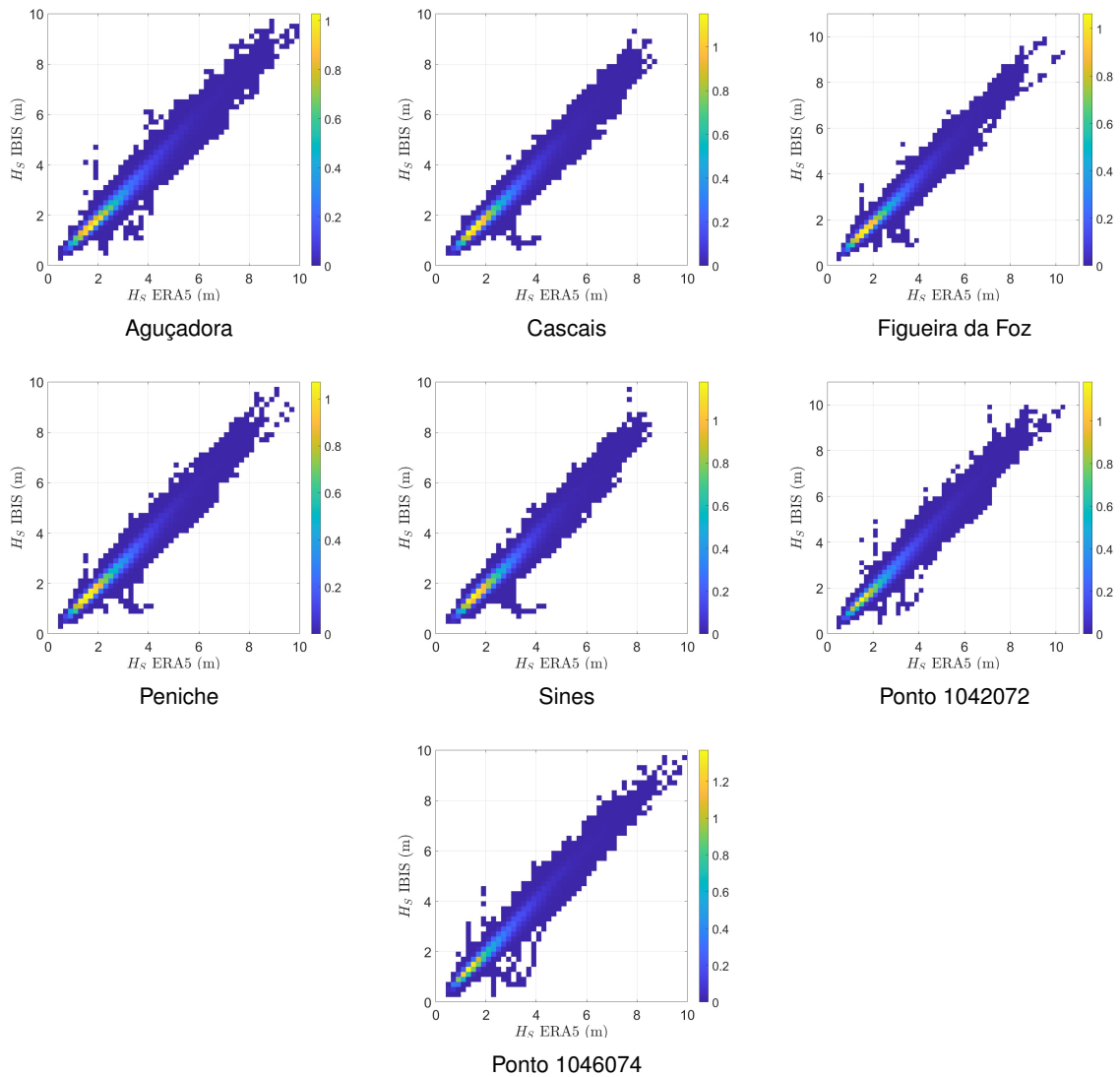
Avaliação do Potencial Energético na Zona Costeira Portuguesa



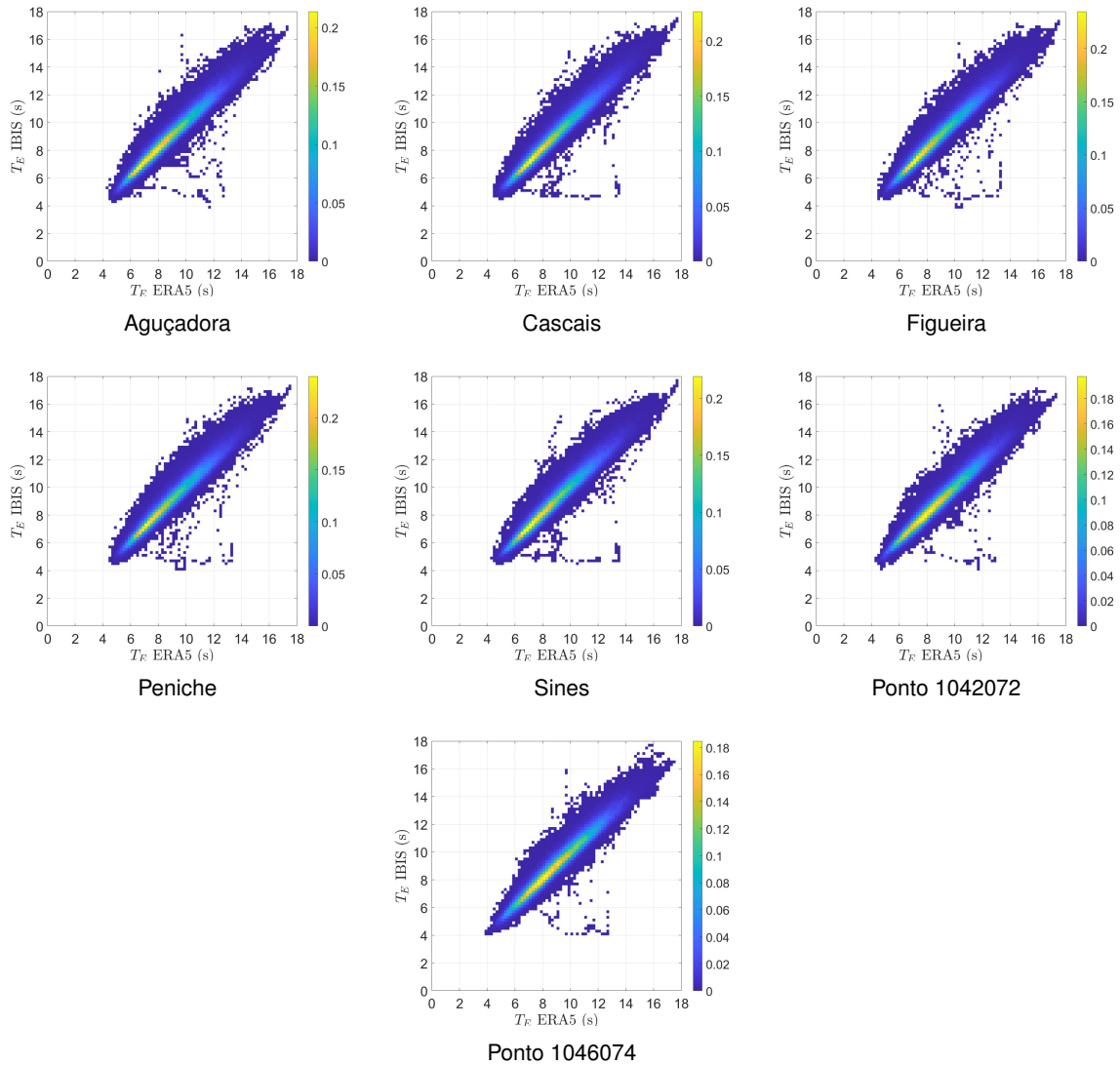
**Figura 5.17:** Representação dos QQplots da variável  $H_S$  nos pontos seleccionados. Nos eixos OX e OY estão representadas as bases de dados ERA5 e IBIS, respetivamente.



**Figura 5.18:** Representação dos QQplots da variável  $T_E$  nos pontos seleccionados. Nos eixos OX e OY estão representadas as bases de dados ERA5 e IBIS, respetivamente.



**Figura 5.19:** Diagrama de dispersão de  $H_s$ . Nos eixos OX e OY estão representadas as bases de dados ERA5 e IBIS, respetivamente.



**Figura 5.20:** Diagrama de dispersão de  $T_E$ . Nos eixos OX e OY estão representadas as bases de dados ERA5 e IBIS, respetivamente.

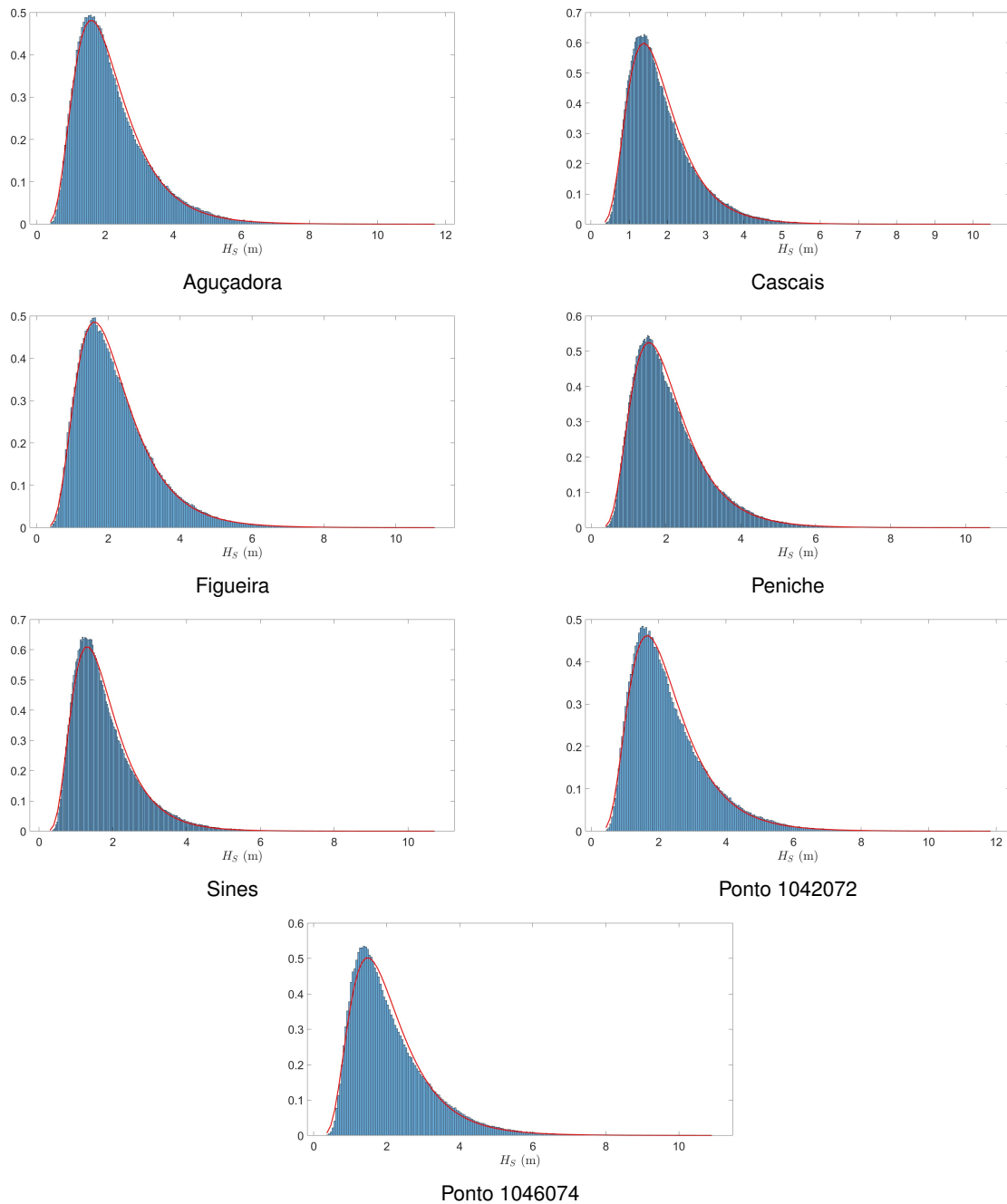
## 5.6 Modelação probabilística da altura significativa, do período de energia e da potência

Foram realizados vários ajustes às variáveis  $H_S$ ,  $T_E$  e  $P_f$ , para cada um dos pontos da Tabela 5.1, sendo as estimativas obtidas pelo método da máxima verosimilhança ("maximum-likelihood estimation"). Para uma localização pré-fixada, a variável  $H_S$  apresentou um bom ajuste à distribuição Lognormal (ver Figura 5.21) e a variável  $P_f$  apresentou um bom ajuste à distribuição gaussiana inversa (ver Figura 5.22).

Os parâmetros da distribuição Lognormal,  $\mu$ , representando a média, e  $\sigma$ , representando o desvio padrão, assim como o valor- $p$  e a estatística do teste de Komogrov-Smirnov constam da Tabela 5.7. Como é bem conhecido, um valor- $p$  maior indica um melhor ajuste, uma vez que um elevado valor- $p$  indica que a hipótese nula (de que os dados seguem uma distribuição Lognormal) não pode ser rejeitada. A distância de Komogrov-Smirnov, que mede a diferença máxima entre a função de distribuição acumulada empírica de  $H_S$  e a função de distribuição acumulada da distribuição Lognormal ajustada, revela um melhor ajuste quanto menor for o seu valor. Ao avaliar os resultados deste teste estatístico, é preciso ter em consideração a grande quantidade de dados disponíveis em cada variável e, como tal, a dificuldade de obter um ajuste estatisticamente válido, explicando assim os valores- $p$  muito baixos encontrados em todas as localizações.

Localização	$\mu$	$\sigma$	$p$	Estatística de teste
Aguçadora	0.6820	0.4669	4.9499e-67	0.0102
Figueira da Foz	0.6875	0.4584	4.5705e-25	0.0062
Peniche	0.6330	0.4456	8.2480e-77	0.0109
Cascais	0.5158	0.4380	3.5241e-181	0.0168
Sines	0.4702	0.4523	2.2759e-202	0.0178
1042072	0.7249	0.4662	2.9251e-130	0.0143
1046074	0.6198	0.4794	2.6811e-274	0.0207

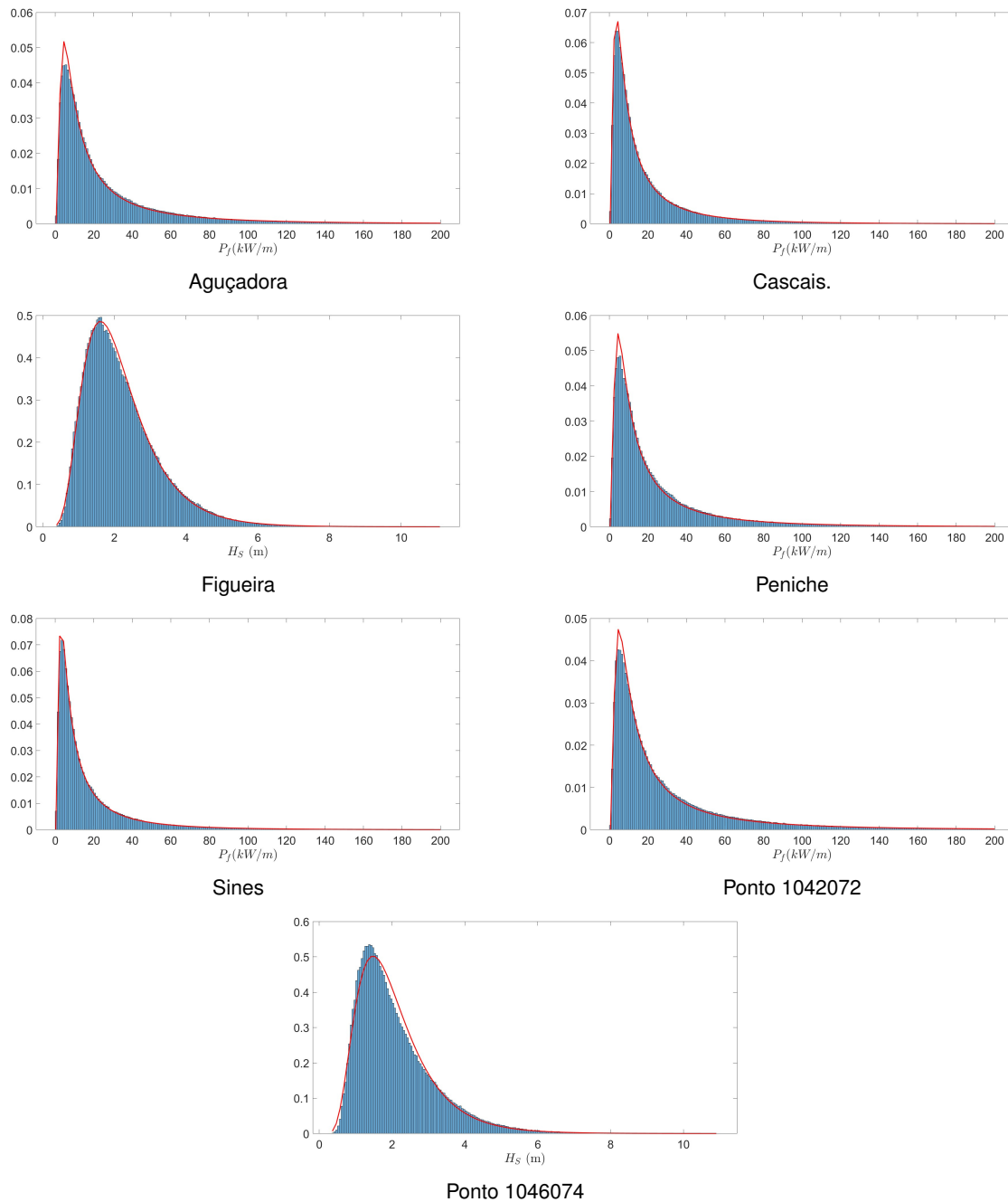
**Tabela 5.7:** Resultados obtidos no ajuste da distribuição lognormal à variável  $H_S$ .



**Figura 5.21:** Histograma da variável  $H_S$  para diferentes localizações e distribuição Log-normal ajustada.

Os locais apresentam uma variabilidade baixa a moderada em  $H_S$ , com todos os valores do desvio padrão entre 0.4 e 0.5 (ver Tabela 5.7). A Figueira da Foz apresenta o melhor ajuste com o menor valor da estatística de teste (0.0062) e, conseqüentemente, o mais elevado valor- $p$  (4.5705e-25), enquanto que o ajuste mais desadequado se encontra na localização 1046074, onde se nota a maior discrepância em relação aos restantes pontos.

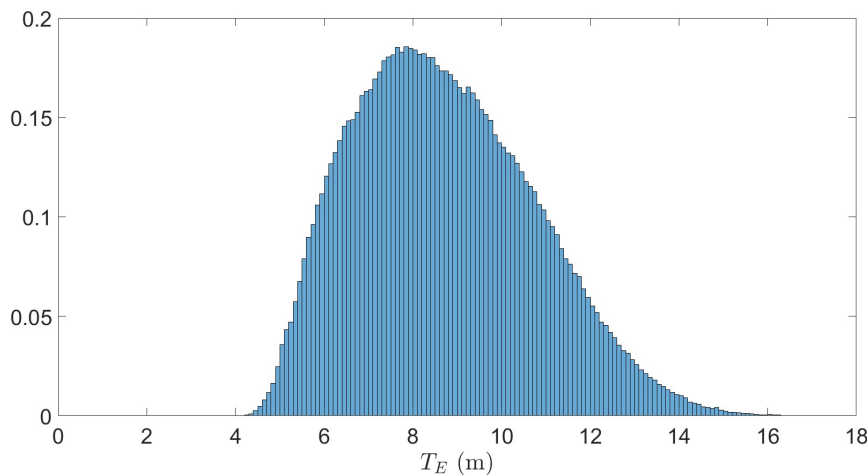
Infelizmente, para a variável  $T_E$ , não foi possível encontrar algum ajuste que tivesse viabili-



**Figura 5.22:** Histograma da variável  $P_f$  para diferentes localizações e distribuição Gaussiana Inversa ajustada.

dade. A título de exemplo, apresentamos na Figura 5.23 o histograma desta variável no ponto 1042072.

A distribuição gaussiana inversa, à qual a potência disponível foi ajustada, é também conhecida como distribuição normal inversa de Wald. Esta distribuição foi introduzida pela primeira vez por Schrödinger em 1915 no contexto do movimento Browniano. Posteriormente, recebeu maior atenção e foi formalmente desenvolvida por R. A. Fisher e L. H. C. Tippett na década de 1920



**Figura 5.23:** Histograma da variável  $T_E$  no ponto 1042072.

(Folks and Chhikara, 1978; Tweedie, 1957a,b). É uma distribuição de probabilidade contínua com parâmetros  $\mu > 0$ , que representa a média da distribuição, e  $\lambda > 0$ , o parâmetro de forma, também conhecido como parâmetro de escala. A função densidade de probabilidade (f.d.p) da distribuição gaussiana inversa é dada por:

$$f(x; \mu, \lambda) = \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi x^3}} \exp\left(-\frac{\lambda(x - \mu)^2}{2\mu^2 x}\right)$$

para  $x > 0$  (Folks and Chhikara, 1978). Esta distribuição é infinitamente divisível e relaciona-se com outras distribuições, como a distribuição normal e a distribuição gama (Folks and Chhikara, 1978; Tweedie, 1957a).

A Tabela 5.8 apresenta os resultados do ajuste de uma distribuição gaussiana inversa aos dados disponíveis sobre a variável  $P_f$ , em cada uma das localizações previamente selecionadas. São indicadas as estimativas dos parâmetros, assim como os valores- $p$  e da estatística do teste de Komogrov-Smirnov obtidos. Analisando a tabela, os pontos onde o ajuste aparenta ser mais adequado são os identificados como sendo Sines e Cascais, sendo que os pontos 1046074, Aguçadora, Figueira da Foz e Peniche apresentam um valor- $p$  igual a 0, com Figueira da Foz a apresentar o pior ajuste, uma vez que é o único ponto onde a estatística de teste ultrapassa 0.03. No entanto, é possível constatar que o ajuste da distribuição gaussiana inversa à variável  $P_F$  é, em geral, pior do que o ajuste da distribuição Lognormal a  $H_S$ .

Uma cópula é uma função que une, ou seja, acopla, funções de distribuição multivariadas às suas distribuições marginais. Essas funções têm margens unidimensionais uniformes no inter-

Localização	$\mu$	$\lambda$	$p$	Estatística de teste
1046074	27.9998	11.4155	0	0.0261
1042072	32.4156	14.8562	1.3614e-273	0.0207
Aguçadora	29.6153	13.6926	0	0.0238
Figueira	29.0149	14.3413	0	0.0316
Peniche	26.0802	13.5532	0	0.0252
Cascais	20.0870	10.8607	8.3803e-144	0.0150
Sines	18.9711	9.2735	2.3237e-117	0.0135

**Tabela 5.8:** Resultados obtidos no ajuste da distribuição gaussiana inversa à variável  $P_f$ .

valo  $[0,1]$  e são invariantes sob transformações crescentes monótonas das distribuições marginais (Fazeres-Ferradosa et al., 2018). Inicialmente, um dos objetivos desta dissertação consistia em ajustar as variáveis  $H_S$  e  $T_E$  e, por meio de cópulas, modelar a função de distribuição conjunta de  $H_S$  e  $T_E$ . Contudo, a distribuição de  $T_E$  apresenta duas modas em diversas localizações do mapa (e.g. Figura 5.23), o que dificulta a obtenção de um ajuste.

No ajuste de  $H_S$  por uma distribuição Lognormal, a preocupação foi sobretudo a de eliminar a sua autocorrelação temporal através de sub-amostragem. Observámos que a autocorrelação praticamente desaparece com sub-amostras espaçadas de quatro dias. A função de autocorrelação (ACF) de uma dessas sub-amostras está apresentada no Anexo, Figura A.3, para os pontos selecionados na costa ocidental portuguesa.

## Capítulo 6.

# Avaliação do Potencial Energético

A quantificação da potência útil,  $P_W$ , de um Conversor de Energia das Ondas (WEC) é essencial para avaliar o seu desempenho. Naturalmente serão considerados mais eficientes os dispositivos em que  $P_W$  se aproxima de  $P_f$ , a potência disponível. Por outro lado, as regiões com potencial mais elevado de aproveitamento de energia serão aquelas onde a energia média a extrair num período de tempo, por exemplo anual, é a mais elevada.

Neste capítulo vamos analisar a potência útil,  $P_W$ , associada aos três WECs selecionados, a saber Pelamis, WaveDragon e Archimedes, e cujas matrizes de potência são exibidas na Figura 4.3. As características destes dispositivos estão descritas na Tabela 4.2.

Relembramos que as matrizes de potência disponíveis para os WECs em estudo e apresentadas no Capítulo 4 (ver Figura 4.3) nos fornecem valores nominais da potência útil para um conjunto discreto de pontos  $(H_S, T_E)$  previamente fixado. Neste estudo, empregamos uma abordagem de interpolação baseada em dados experimentais para estimar a potência útil,  $P_W$ , para cada WEC em particular, em função da altura significativa das ondas  $H_S$  e do seu período de energia  $T_E$ . A interpolação foi realizada utilizando a função `griddedInterpolant` do software MATLAB, que por sua vez recorre ao método 'makima', conhecido pela sua capacidade de proporcionar interpolações suaves e precisas em dados esparsos ou ruidosos. Os resultados foram processados para garantir que se mantinham dentro dos limites estabelecidos nas respectivas matrizes de potência de cada WEC.

Para cada WEC, apresentamos nas Figuras 6.1 a 6.3 uma descrição sumária da potência útil calculada para cada WEC, usando como medidas a assimetria, a curtose, o desvio padrão, a média e a mediana, máximos, mínimos e quantis 25 %, 75 %, 90 %, 95 %, 99 % e 99.9 %. O mínimo da máquina Pelamis foi constante e igual a 0 e o máximo da máquina WaveDragon foi

constante e igual a 5900 kW, logo estes mapas não foram representados para estas medidas.

É possível verificar que, em todas as máquinas, a região menos energética é a região algarvia/mediterrânica da Península Ibérica, com as zonas mais a norte e mais a oeste a serem as zonas mais energéticas. Também se verifica um aumento de potência útil à medida que nos afastamos da zona costeira, o que já era de certa forma esperado.

No caso da Archimedes, a assimetria varia entre 0 e 8, o que sugere que sua distribuição de potência útil pode ser mais assimétrica, com a possibilidade de apresentar valores extremos ou picos mais proeminentes em certas regiões. Por outro lado, tanto a Pelamis como a Wave-Dragon exibem uma faixa de assimetria mais restrita, entre 0 e 3.5, indicando distribuições de potência útil menos assimétricas e mais uniformes ou menos suscetíveis a variações extremas em comparação com a Archimedes.

Esta diferença nas medidas de assimetria entre os três tipos de WECs aponta para as suas características distintas na forma como captam a energia das ondas. A Archimedes, com uma assimetria mais alta, parece ter maior capacidade de explorar e captar picos de energia.

Com uma curtose que varia entre 10 e 100, a Archimedes mostra uma distribuição com picos mais altos e caudas mais pesadas em comparação com o Pelamis e a WaveDragon que com curtose mais baixa, podem ter distribuições de potência útil mais uniformes e menos propensas a variações extremas, proporcionando uma produção de energia mais estável ao longo do tempo e do espaço.

Existe uma diferença notória entre a Pelamis, cujos mapas apresentam resultados de  $P_W$  da ordem das dezenas, e a Archimedes e a WaveDragon, que apresentam resultados na ordem dos milhares. Isto deve-se aos diferentes tipos de dispositivos e à Potência por Unidade de Comprimento que caracteriza cada um dos dispositivos, sendo que a Pelamis tem apenas 750 kW por unidade comparando com os 2470 kW da AWS e os 7000 kW da WaveDragon.

Foi também calculada a contribuição de cada valor de  $H_S$  e  $T_E$  para a energia total, para a potência disponível total no mar,  $P_f$ , e para cada uma das duas máquinas, Pelamis e Wave-Dragon (ver Figuras 6.4 e 6.5). Este cálculo reveste-se da máxima importância se pretendermos colocar-nos no papel do investidor que terá de tomar decisões sobre localizações e terá de fazer escolhas sobre os dispositivos a instalar. Para este cálculo, torna-se necessário considerar

a largura associada a cada dispositivo, a fim de comparar a potência disponível em unidades kW/m com a potência útil em kW. Inicialmente, foi utilizada a largura presente na Tabela 4.2. No entanto, verificou-se que esse procedimento gerava erros de grande escala, sendo necessário calcular a chamada largura de captura  $C_W$ , que representa a extensão perpendicular à direção das ondas de onde a máquina extrai energia a cada instante (Rusu and Onea, 2016).

A largura de captura (*capture width*) é definida como:

$$C_W = \frac{P_u}{P_f}$$

onde:

- $P_u$  é a potência útil, obtida pelo Conversor de Energia de Ondas (WEC), medida em kW.
- $P_f$  é a potência das ondas por unidade de comprimento da crista, medida em kW/m.

A coerência desta definição é assegurada pelas unidades de medida da potência das ondas  $P_f$  em kW/m e da potência de saída dos WEC's em kW. Assegurando assim que a razão entre estas duas quantidades,  $C_W$ , é corretamente expressa em metros.

A largura de captura média será então a largura que iremos usar como largura do WEC para o cálculo das curvas que relacionam a energia produzida (acumulada) com a altura significativa da onda.

A Figura 6.4 permite verificar que, apesar de existir uma considerável diferença entre captação de energia e energia disponível, a Pelamis é o dispositivo que aproveita uma maior quantidade de potência disponível. Isto vê-se refletido em todas as localizações escolhidas e no aproveitamento de ambas as variáveis  $H_S$  e  $T_E$ . Não existe uma diferença considerável no aproveitamento entre localizações, com o aproveitamento nos diferentes casos a ficar na ordem dos 60 %.

Foram observados os histogramas para os três dispositivos estudados mas nenhum ajuste foi possível e essas figuras foram colocada nos anexos A.14, A.15 e A.16, respetivamente para o Pelamis A.14, o WaveDragon e o Archimedes. O histograma respeitante ao Archimedes é o que aparenta ser mais semelhante ao histograma da potência disponível,  $P_f$ .

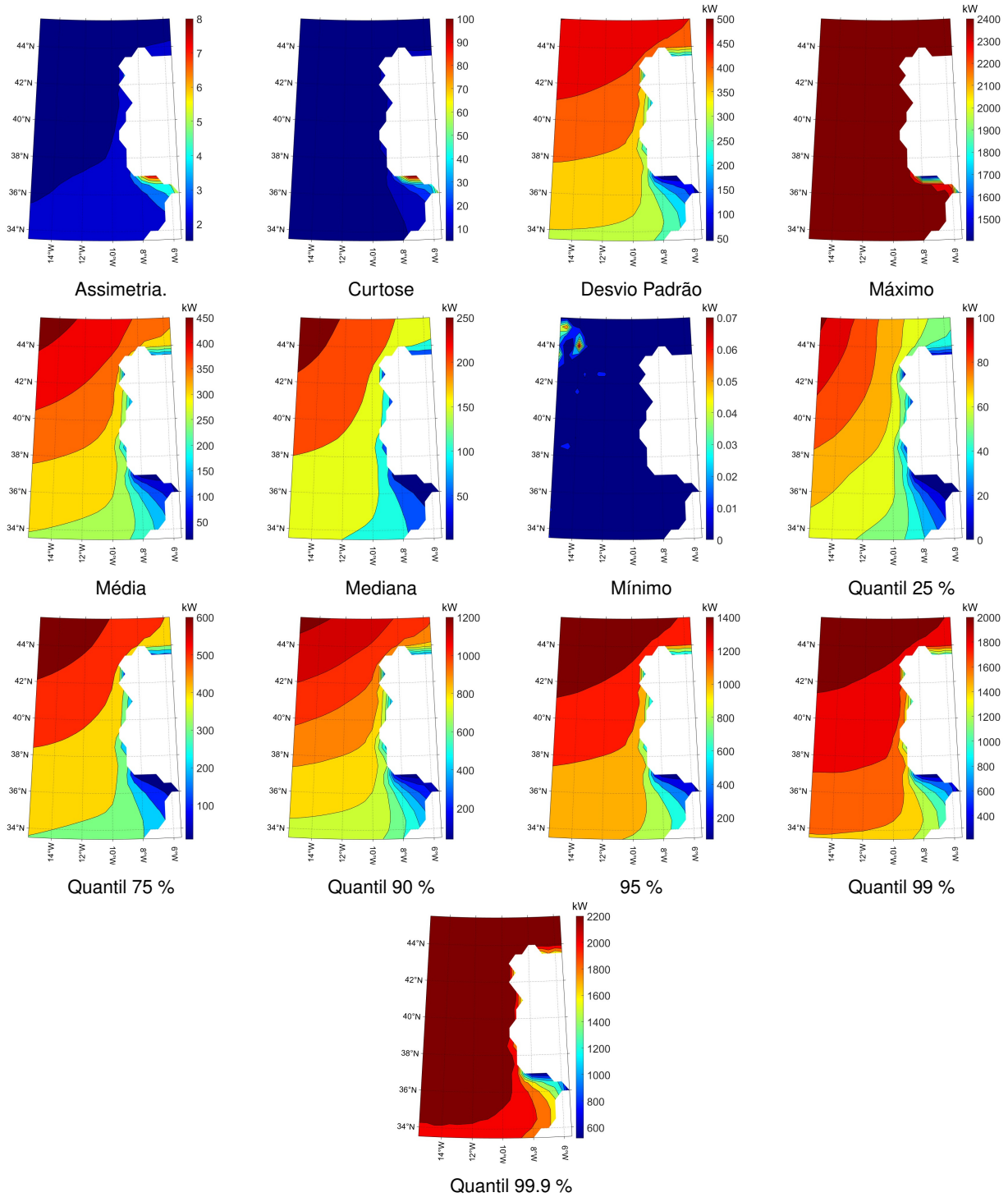


Figura 6.1: Mapas de valores de  $P_W$  para o WEC Archimedes.

Avaliação do Potencial Energético na Zona Costeira Portuguesa

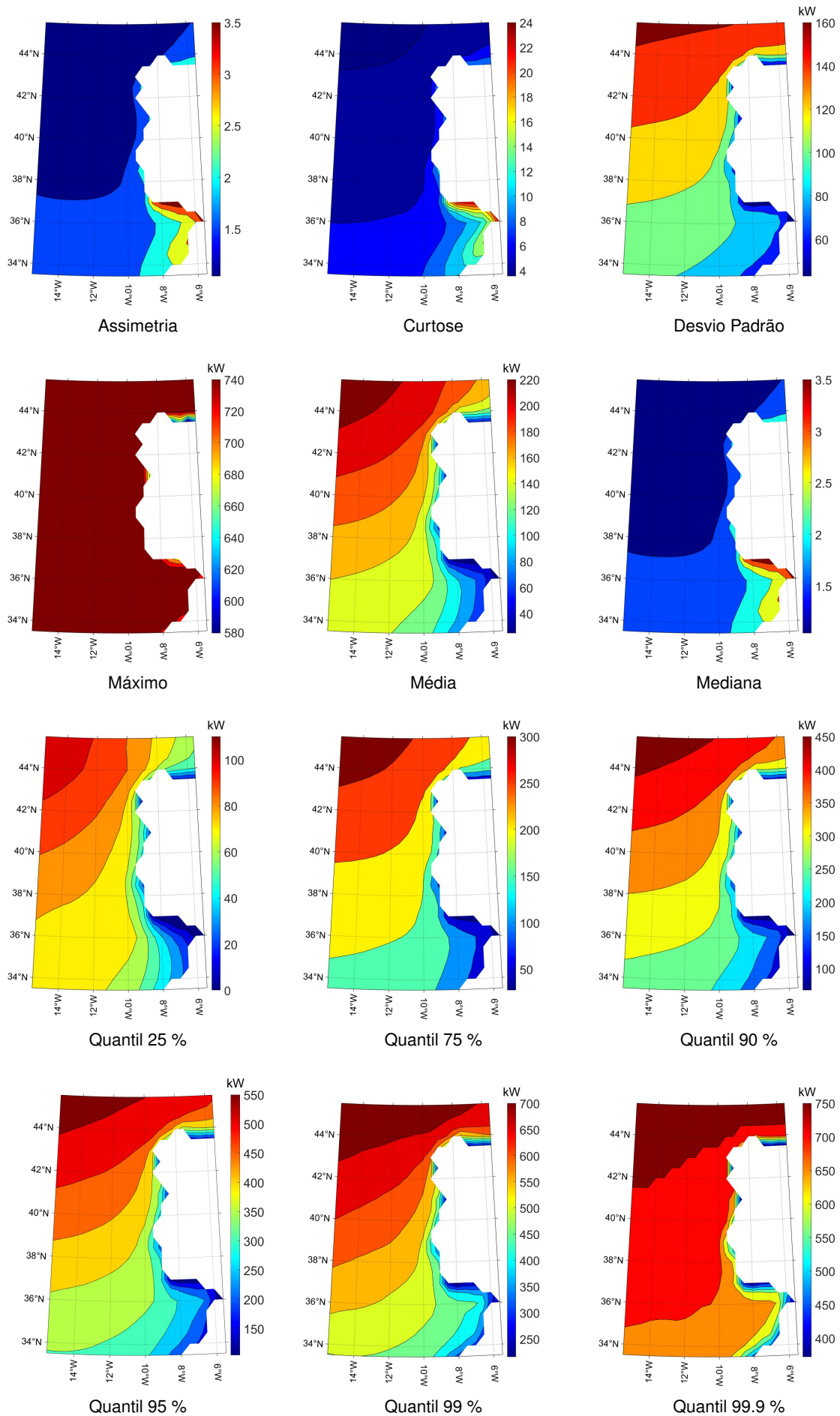


Figura 6.2: Mapas de valores de  $P_w$  para o WEC Pelamis.

Avaliação do Potencial Energético na Zona Costeira Portuguesa

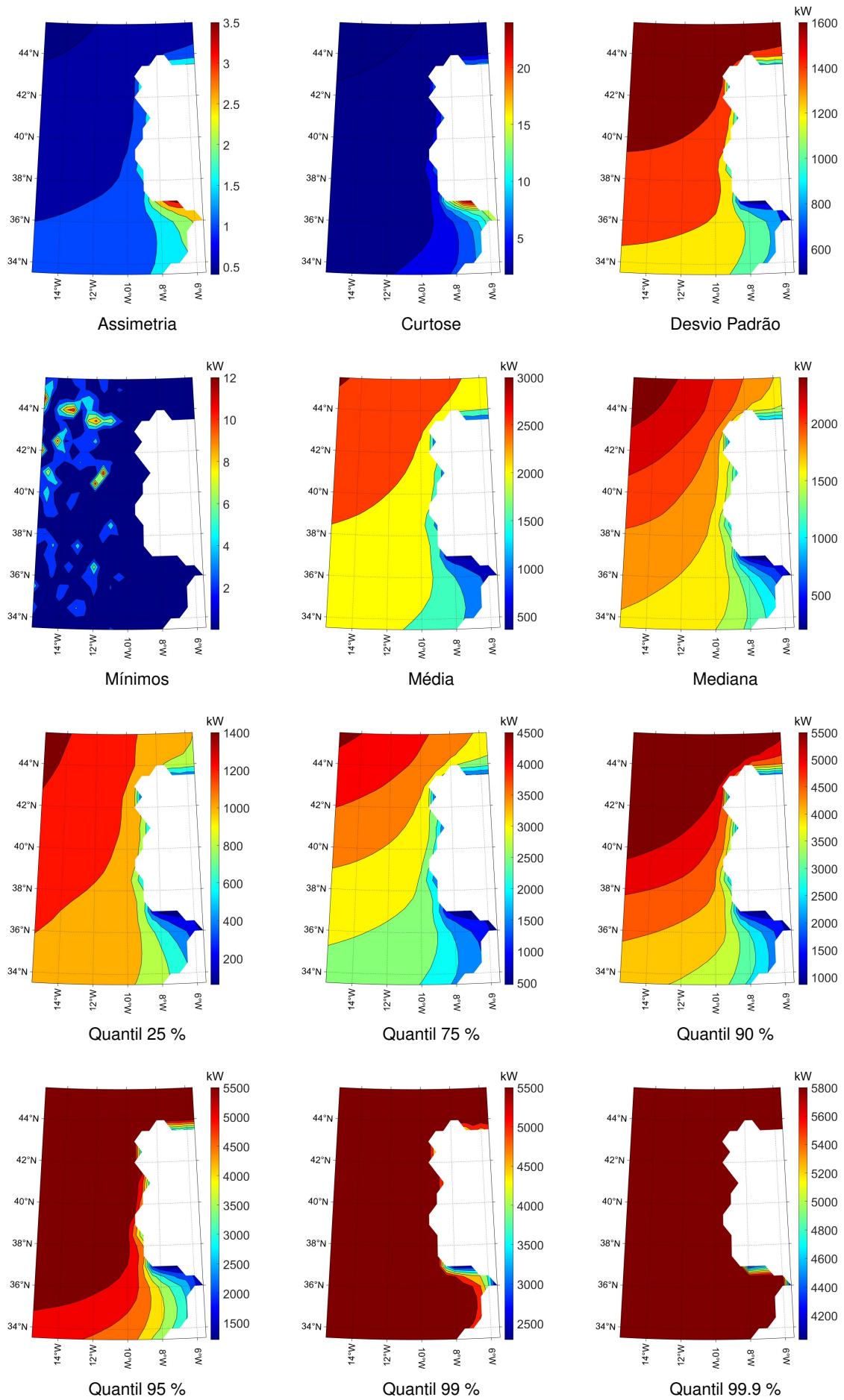


Figura 6.3: Mapas de valores de  $P_w$  para o WEC WaveDragon.

Avaliação do Potencial Energético na Zona Costeira Portuguesa

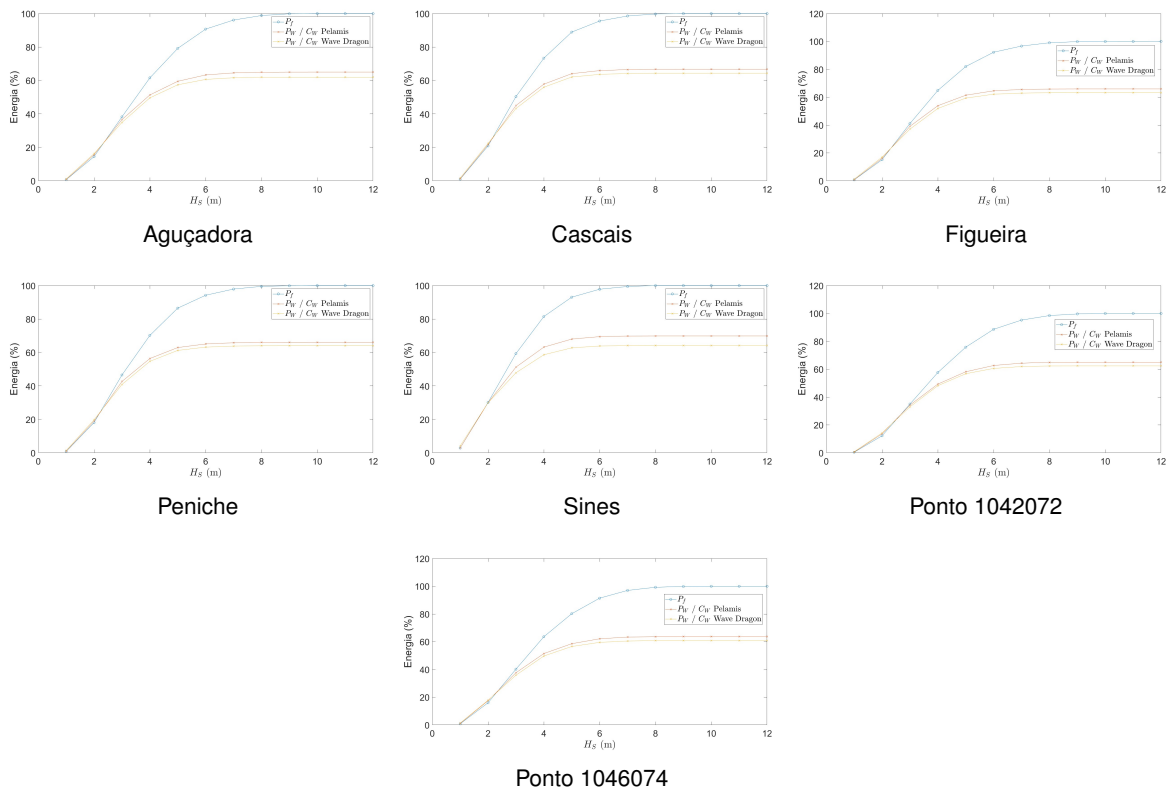


Figura 6.4: Percentagem de energia utilizada em função de  $H_S$ , para cada um dos pontos selecionados.

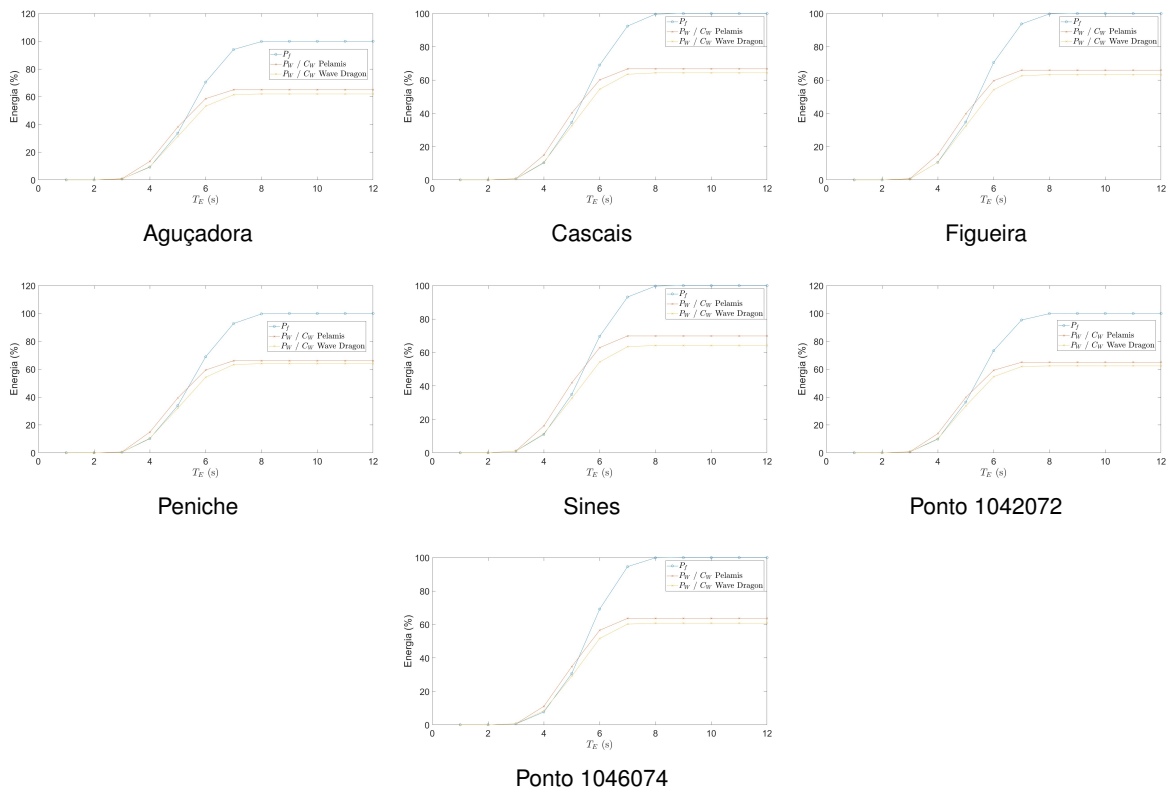


Figura 6.5: Percentagem de energia utilizada em função de  $T_E$ .



# Capítulo 7.

## Conclusão e Comentários Finais

A presente Dissertação teve como objetivo avaliar o potencial energético da energia das ondas na zona costeira portuguesa, utilizando para isso dados climatológicos das bases de dados ERA5 e IBIS. A análise realizada permitiu identificar as regiões mais promissoras para a implementação de tecnologias de conversão de energia das ondas.

Os resultados evidenciaram que ambas as variáveis  $H_S$  e  $T_E$  estão associadas a valores mais elevados em locais mais afastados da zona costeira, sendo que os seus valores mais baixos ocorrem na zona mediterrânica algarvia. Existe uma maior propensão a eventos extremos no que respeita à variável  $H_S$ , representativa da altura significativa das ondas, do que na variável  $T_E$ .

As correlações entre  $H_S$  e  $T_E$  mostraram-se significativas em algumas regiões, especialmente em áreas não costeiras, com a região algarvia mediterrânica apresentando o coeficiente de correlação mais baixo. Ao separar as variáveis em componentes de ondulação e vagas, constatou-se uma correlação mais elevada na componente de ondulação, indicando que a alta correlação geral é maioritariamente explicada pela componente de ondulação. Não parece haver uma correlação linear entre  $H_S$  e  $T_E$ , globalmente.

Analisando a potência disponível,  $P_f$ , concluímos que ela é superior em zonas não costeiras, como aliás seria de esperar, e em especial a noroeste. É possível observar um ligeiro aumento da potência das ondas ao longo das décadas, um fenómeno que é particularmente acentuado na região Norte. Julho é o mês menos energético e Janeiro é o mês mais energético.

Em relação aos pontos avaliados na costa ocidental portuguesa, a Aguçadora é a localização com maior potência disponível, mensalmente, enquanto que Sines é a localização com menor potência disponível, mensalmente. Peniche é o ponto mais estável ao longo do tempo, mais

especificamente ao longo de um ano padrão, enquanto que o Ponto 1046074, localizado na costa ocidental da Galiza, reflete uma maior instabilidade temporal, nomeadamente quando vista anualmente.

Analisando as anomalias climáticas anuais verificamos que existe uma tendência de aumento ao longo dos últimos 85 anos, particularmente acentuada a partir de 1980. No entanto, este não é evidente nos últimos 28 anos onde parece ter existido alguma estabilidade.

As bases de dados ERA5 e IBIS não parecem dissemelhantes, em particular nas ondas de período e altura significativa com maior frequência. Foi possível ajustar a variável  $H_S$  a uma distribuição teórica lognormal e a variável  $P_f$  a uma distribuição gaussiana inversa. No entanto, não foi possível encontrar um ajuste razoável para a variável  $T_E$ , que parece ser, pelo menos em alguns casos, bi-modal.

Na avaliação da potência útil, concluímos que a Pelamis parece exibir uma boa capacidade, superior à WaveDragon, para converter a potência disponível em potência útil. O dispositivo Archimedes aparenta ser o mais capaz de captar e explorar picos de energia.

Com base nos resultados obtidos, as seguintes recomendações são sugeridas para trabalhos futuros:

- Avaliação do dispositivo Archimedes: um estudo semelhante ao que é apresentado no Capítulo 6 desta Dissertação para os dispositivos Pelamis e WaveDragon deveria ser estendido ao dispositivo Archimedes e este deveria ser englobado na comparação dos WECs.
- Análise complementar da componente direcional: explorar os dados disponíveis sobre a componente direcional inerente à física e mecânica das ondas; essa análise permitiria a otimização da captação e transformação de energia das ondas em energia útil para determinados tipos de dispositivos WEC, mediante uma orientação adequada do WEC.
- Combinação de Energias Renováveis: explorar a integração da energia das ondas com outras fontes de energia renovável como a eólica, de modo a criar sistemas híbridos que aproveitem ao máximo os recursos naturais disponíveis na zona marítima.
- Estudos de Impacto Ambiental: realizar estudos detalhados sobre o impacto ambiental da instalação de dispositivos WEC, garantindo que o desenvolvimento desta tecnologia seja

sustentável.

- **Análise Económica:** avaliar a viabilidade económica dos projetos de energia das ondas, considerando custos de instalação, manutenção e integração com a rede elétrica, em especial para localizações geográficas a grande distância da zona costeira.



# Referências

- Abolhosseini, S., Heshmati, A., and Altmann, J. (2014). A review of renewable energy supply and energy efficiency technologies. Discussion Paper 8145, Institute for the Study of Labor (IZA), Bonn, Germany.
- Andersen, T. L. and Frigaard, P. (2011). *Lecture Notes for the Course in Water Wave Mechanics*, volume No. 24 of *DCE Lecture Notes*. Department of Civil Engineering, Aalborg University, Aalborg, Denmark. Publisher's PDF, also known as Version of record.
- Bento, P., Pombo, J., Mendes, R., Calado, M., and Mariano, S. (2021). Ocean wave energy forecasting using optimised deep learning neural networks. *Ocean Engineering*, 219.
- Clemente, D., Rodrigues, C., Esteves, R., Correia, J., Pereira, A., Ventura, J., Rosa-Santos, P., Taveira-Pinto, F., and Martins, P. (2022). A novel type of wave energy converter with five degrees of freedom and preliminary investigations on power-generating capacity. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10:1924.
- Clément, A., McCullen, P., Falcão, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., Lemonis, G., Lewis, T., Nielsen, K., Petroncini, S., Pontes, M., Schild, P., Sjöström, B.-O., Sørensen, H. C., and Thorpe, T. (2002). Wave energy in Europe: current status and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6:405–431.
- Communication-EU (2023). Delivering on the EU offshore renewable energy ambitions. Technical report, 2023-668, EUR-Lex - 52023DC0668 - EN - EUR-Lex (europa.eu).
- Cornett, A. (2009). A global wave energy resource assessment. *Sea Technology*, 50(4):59 – 64.
- Dialyna, E. and Tsoutsos, T. (2021). Wave energy in the mediterranean sea: Resource assessment, deployed wecs and prospects. *Energies*, 14(16).

- EMEC (2024). Wave devices. <https://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices>. The European Marine Energy Centre Ltd. Orkney, UK. Acedido: 2024-03-26.
- Fazeres-Ferradosa, T., Taveira-Pinto, F., Vanem, E., Reis, M. T., and Neves, L. d. (2018). Asymmetric copula-based distribution models for met-ocean data in offshore wind engineering applications. *Wind Engineering*, 42(4):304 – 334.
- Folks, J. L. and Chhikara, R. S. (1978). The inverse gaussian distribution and its statistical application—a review. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 40(3):263–289.
- Folley, M. (2017). The wave energy resource. In Pecher, A. and Kofoed, J. P., editors, *Handbook of Ocean Wave Energy*, chapter 3, pages 43–79. Springer Open, Switzerland.
- Guillou, N. and Chapalain, G. (2018). Annual and seasonal variabilities in the performances of wave energy converters. *Energy*.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., and Thépaut, J.-N. (2020). The era5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730):1999–2049.
- Iglesias, G., López, M., Carballo, R., Castro, A., Fraguera, J., and Frigaard, P. (2009). Wave energy potential in galicia (nw spain). *Renewable Energy*, 34:2323–2333.
- Jammalamadaka, S. R. and SenGupta, A. (2001). *Topics in Circular Statistics*. World Scientific.
- Johnson, R. and Wehrly, T. (1978). Some angular-linear distributions and related regression models. *J. Am. Stat. Assoc.*, 73:602–606.
- Lagoun, M., Benalia, A., and Benbouzid, M. (2010). Ocean wave converters: State of the art

and current status. In *2010 IEEE International Energy Conference*, pages 636–641, Dec 2010, Manama, Bahrain. Council on Wave Research, The Engineering Foundation.

Ley, C. and Verdebout, T. (2017). *Modern Directional Statistics*. CRC Press Taylor & Francis Group.

Lopes de Almeida, J. P. P. G. (2017). REEFS: An artificial reef for wave energy harnessing and shore protection—A new concept towards multipurpose sustainable solutions. *Renewable Energy*, 114:817–829.

Munk, W. H. (1951). Origin and generation of waves. In Johnson, J. W., editor, *Proceedings 1st International Conference on Coastal Engineering*, Example Conference Proceedings, pages 1–4, New York, NY. Council on Wave Research, The Engineering Foundation.

Patel, R., Kachhwaha, S. S., Seemanth, M., Nagababu, G., Srinivas, B. A., Surisetty, V. V. A. K., and Bhowmick, S. A. (2018). Performance evaluation of various wave energy converters along the western side of indian eez. In *Conference Paper*. Available on ResearchGate.

Rusu, E. (2014). Evaluation of the wave energy conversion efficiency in various coastal environments. *Energies*, 7:4002–4018. This paper was previously presented in the 1st International e-Conference on Energies, 2013, c015, doi:10.3390/ece-1-c015, available online: <http://www.sciforum.net/conference/ece-1/paper/2342>.

Rusu, E. and Onea, F. (2016). Estimation of the wave energy conversion efficiency in the atlantic ocean close to the european islands. *Renewable Energy*, 85:687–703. Received 27 October 2014; Received in revised form 2 July 2015; Accepted 14 July 2015; Available online 21 July 2015.

Silva, D., Martinho, P., and Guedes Soares, C. (2018). Wave energy distribution along the portuguese continental coast based on a thirty three years hindcast. *Renewable Energy*, 127:1064 – 1075.

Silva, D., Rusu, E., and Soares, C. G. (2013). Evaluation of various technologies for wave energy conversion in the portuguese nearshore. *Energies*, 6:1344–1364.

- Sinden, G. (2005). Variability of uk marine resources. Technical report, Environmental Change Institute, University of Oxford. Commissioned by The Carbon Trust.
- Soukissian, T. H. (2014). Probabilistic modeling of directional and linear characteristics of wind and sea states. *Ocean Engineering*, 91:91 – 110.
- Stefanakos, C., Tedeschi, E., and Brönnner, U. (2021). Offshore wind and wave energy resource assessment in the Norwegian waters based on ERA5 reanalysis. In *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, pages 651–658.
- Stuhlmeier, R. and Xu, D. (2018). Wec design based on refined mean annual energy production for the israeli mediterranean coast. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 144.
- Toledano, C., Amo-Baladrón, A., Aouf, L., Aznar, R., Sotillo, M. G., and Cailleau, S. (2023). Product user manual for atlantic iberia biscay ireland wave reanalysis product ibi multiyear wav 005 006. Technical Report 3, EU Copernicus Marine Service and Mercator Ocean International, Toulouse, France.
- Tweedie, M. C. K. (1957a). Statistical properties of inverse gaussian distributions i. *Annals of Mathematical Statistics*, 28(2):362–377.
- Tweedie, M. C. K. (1957b). Statistical properties of inverse gaussian distributions ii. *Annals of Mathematical Statistics*, 28(3):696–705.
- Vargas, S. A., Esteves, G. R. T., Maçaira, P. M., Bastos, B. Q., Oliveira, F. L. C., and Souza, R. C. (2019). Wind power generation: A review and a research agenda. *Journal of Cleaner Production*, 218:850–870.
- Zachmann, G., Holz, F., Roth, A., McWilliams, B., Sogalla, R., Meissner, F., and Kemfert, C. (2021). *Decarbonisation of Energy: Determining a robust mix of energy carriers for a carbon-neutral EU*. European Parliament, Luxembourg.
- Zeng, X., Wang, Q., Kang, Y., and Yu, F. (2022). A novel type of wave energy converter with five degrees of freedom and preliminary investigations on power-generating capacity. *Energies*, 15:3069.

# **Capítulo A.**

## **Anexos**

### **A.1 Caracterização do clima de agitação marítima**

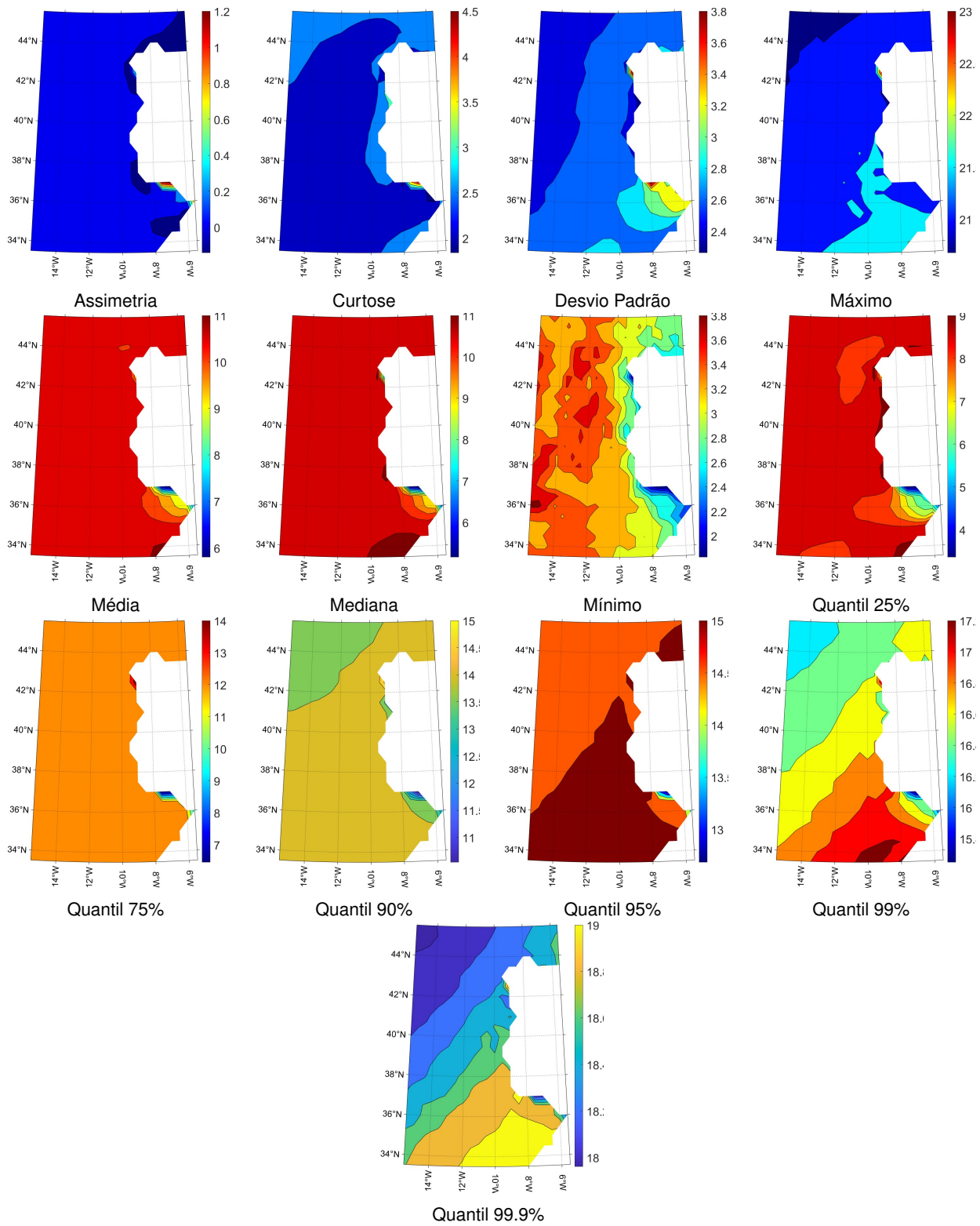


Figura A.1: Mapas de valores  $T_p$ .

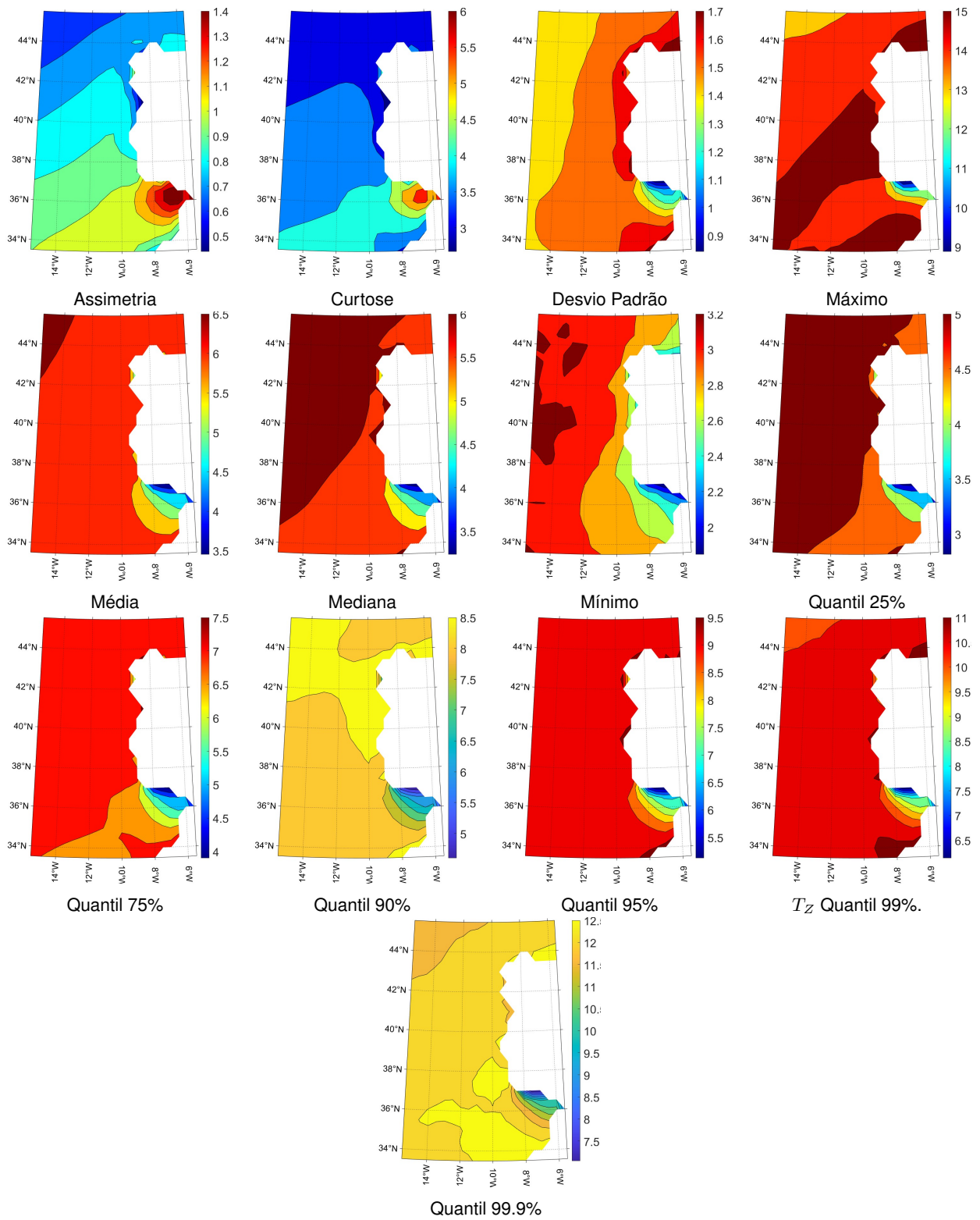


Figura A.2: Mapas de valores  $T_z$ .

## A.2 Estudo da potência útil

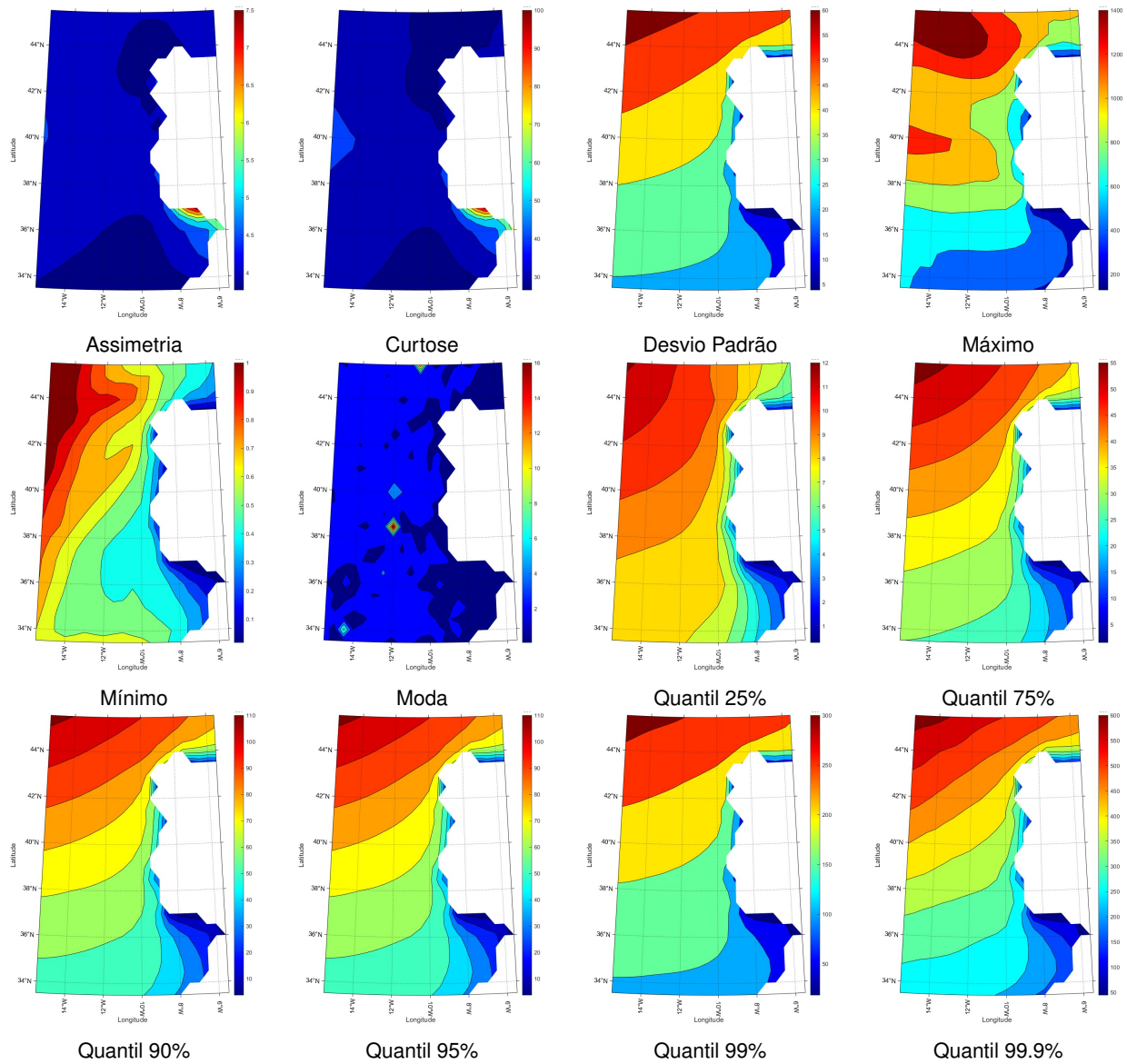


Figura A.3: Mapa de valores  $P_f$  total.

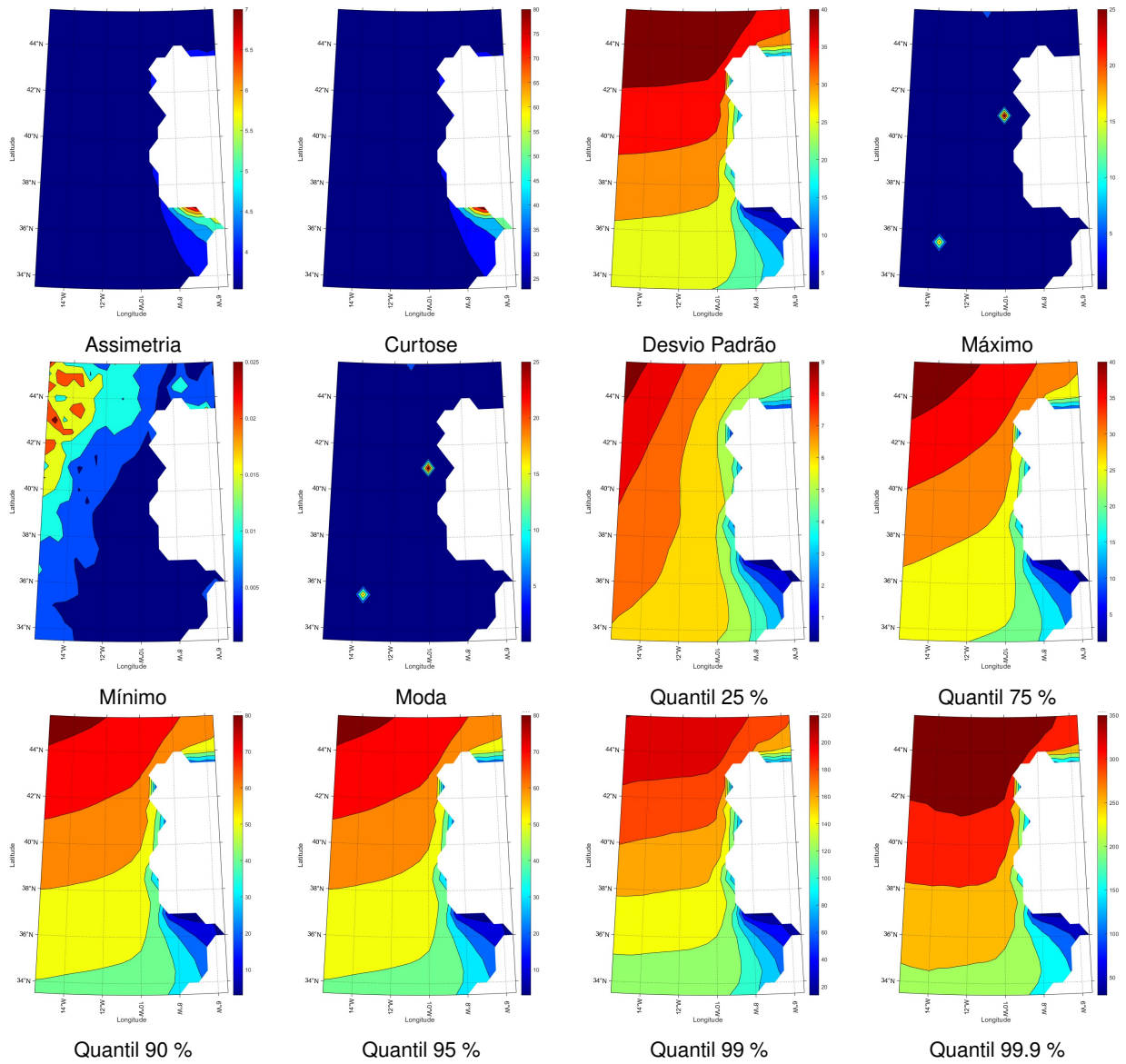


Figura A.4: Mapas de valores de  $P_f$  restrita a ondulação.

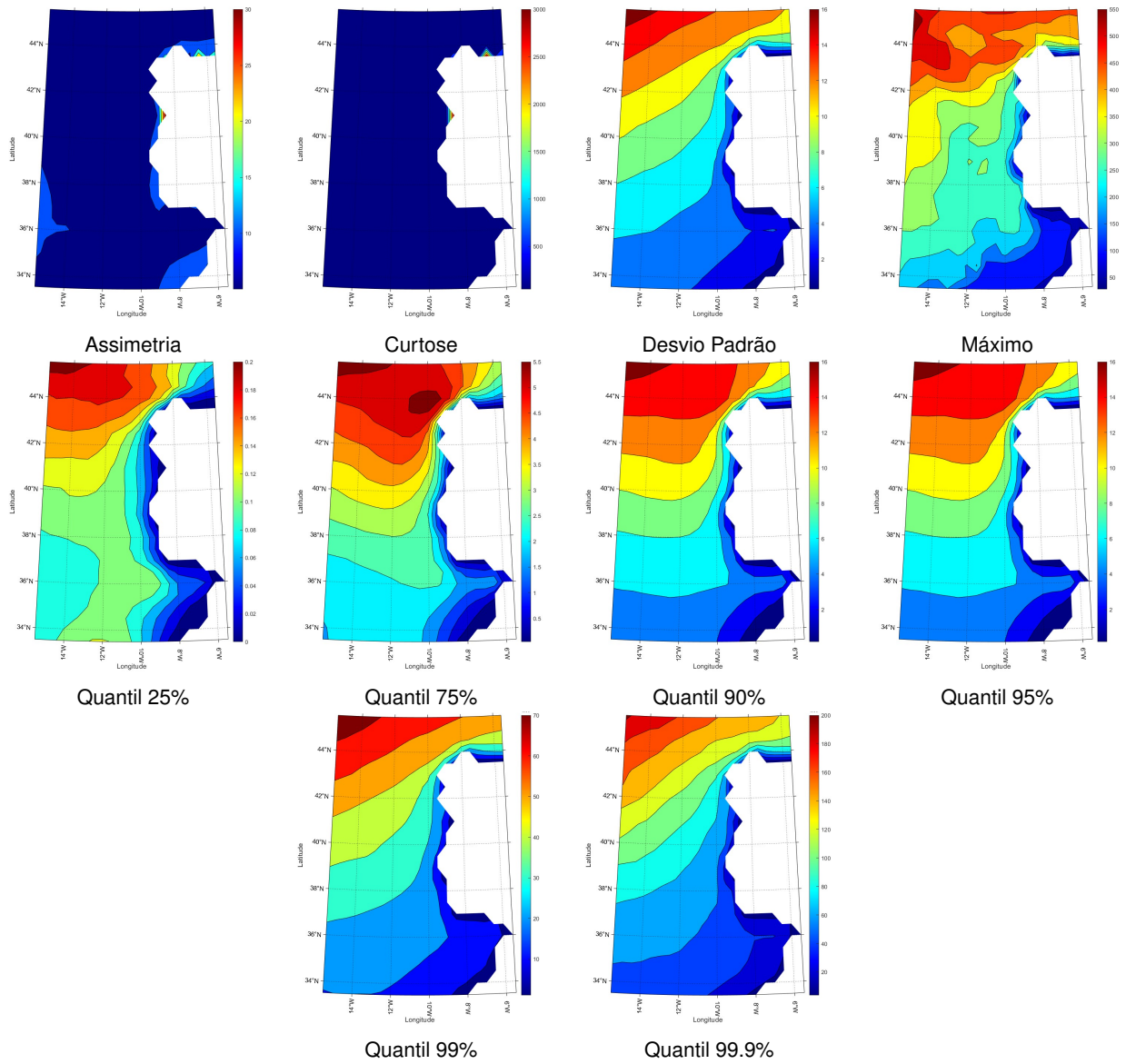
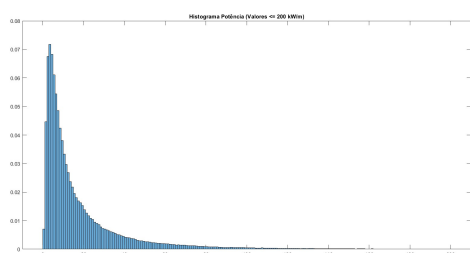
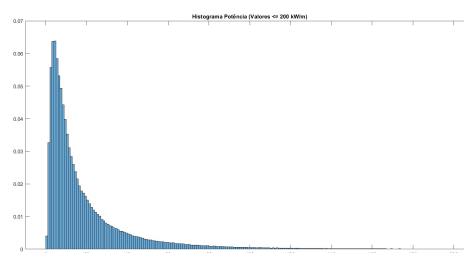


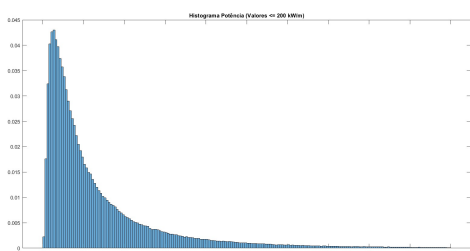
Figura A.5: Mapas de valores de  $P_f$  restrita a vagas



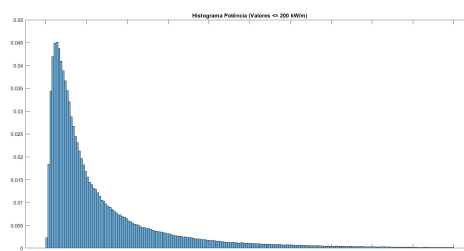
Sines



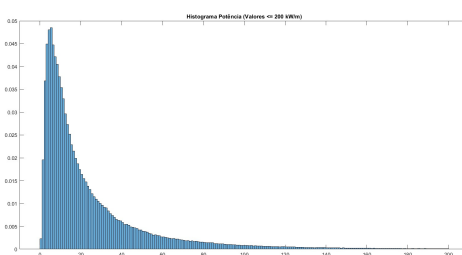
Cascais



Figueira da Foz



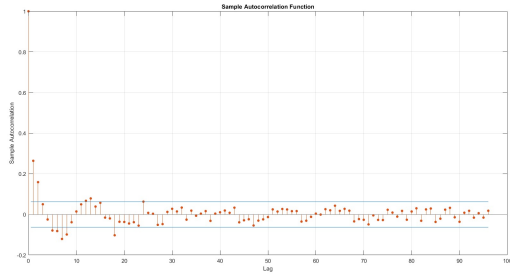
Aguçadora



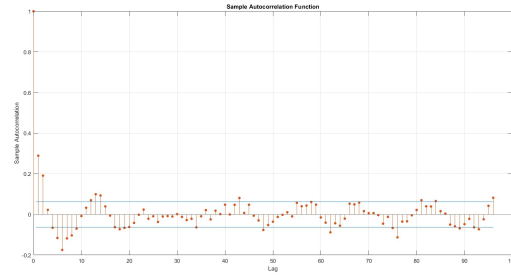
Peniche

**Figura A.6:** Histogramas de  $P_f$ .

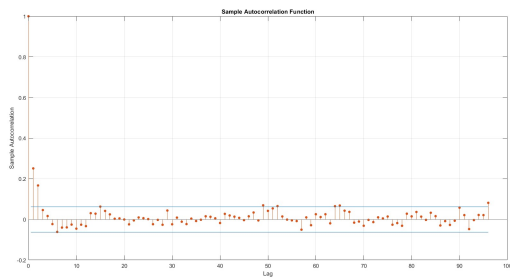
### A.3 Funções de Autocorrelação



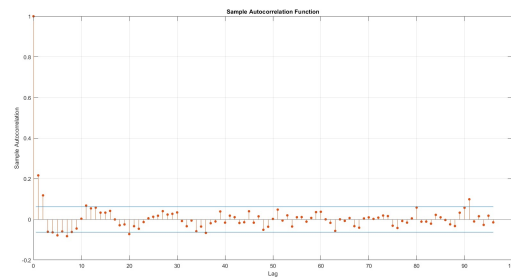
Aguçadora.



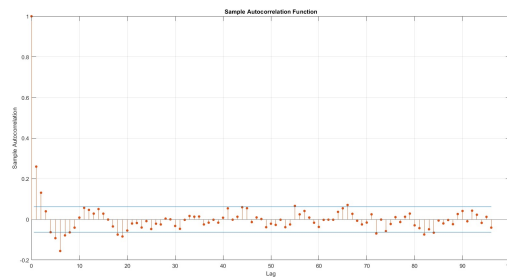
Cascais



Figueira da Foz

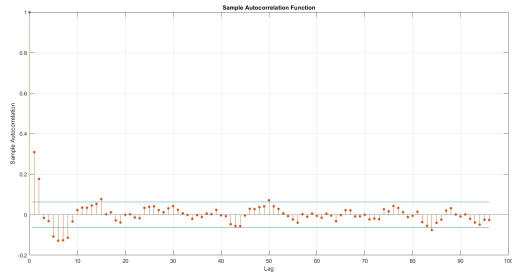


Peniche

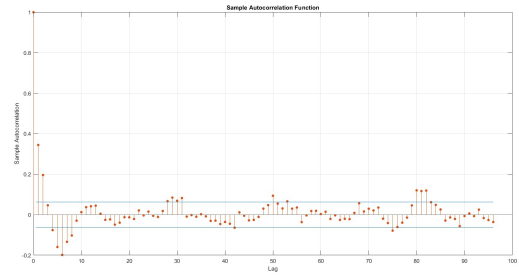


Sines

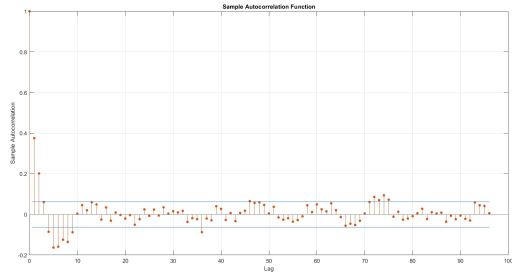
Figura A.7: ACF de  $H_S$ .



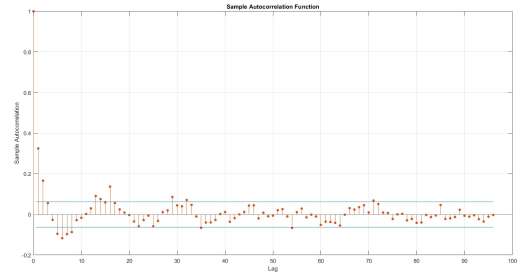
Aguçadora



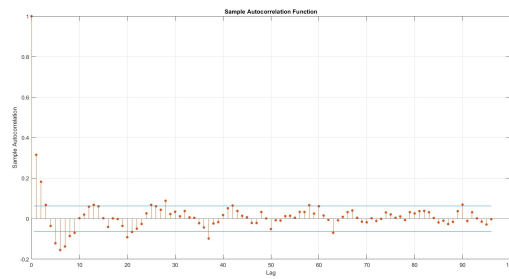
Cascais



Figueira



Peniche



Sines

Figura A.8: ACF de  $T_E$ .

## A.4 Gráficos 3D e gráficos de dispersão

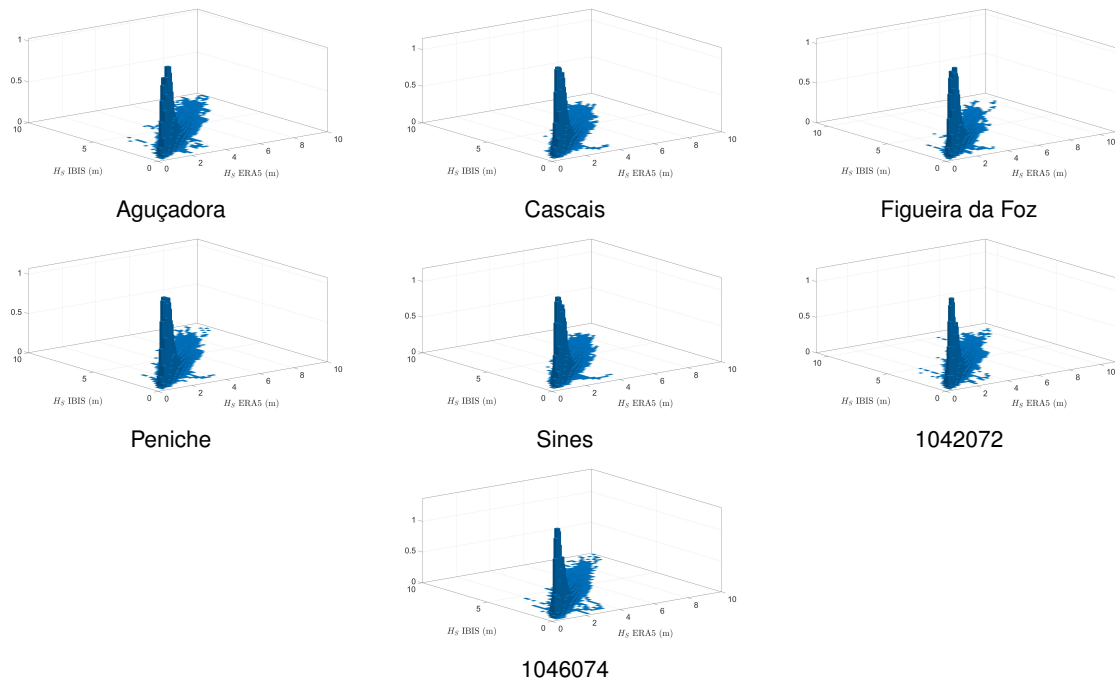


Figura A.9: Gráfico de dispersão 3D de  $H_S$  ERA5 e  $H_S$  IBIS.

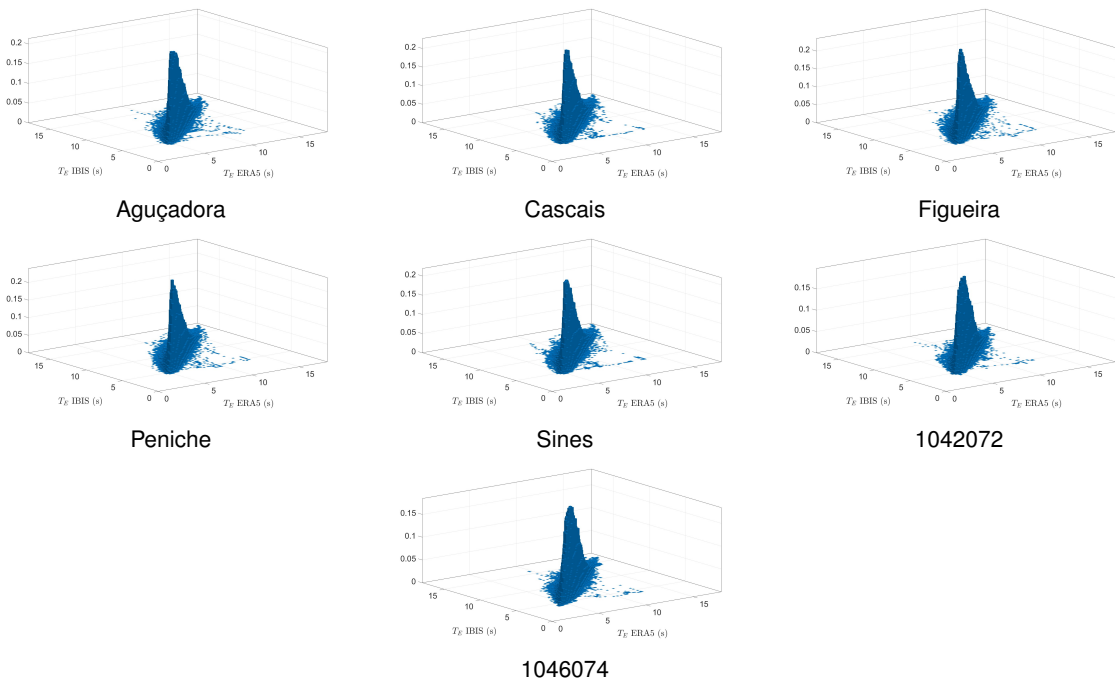


Figura A.10: Gráfico de dispersão 3D de  $T_E$  ERA5 e  $T_E$  IBIS.

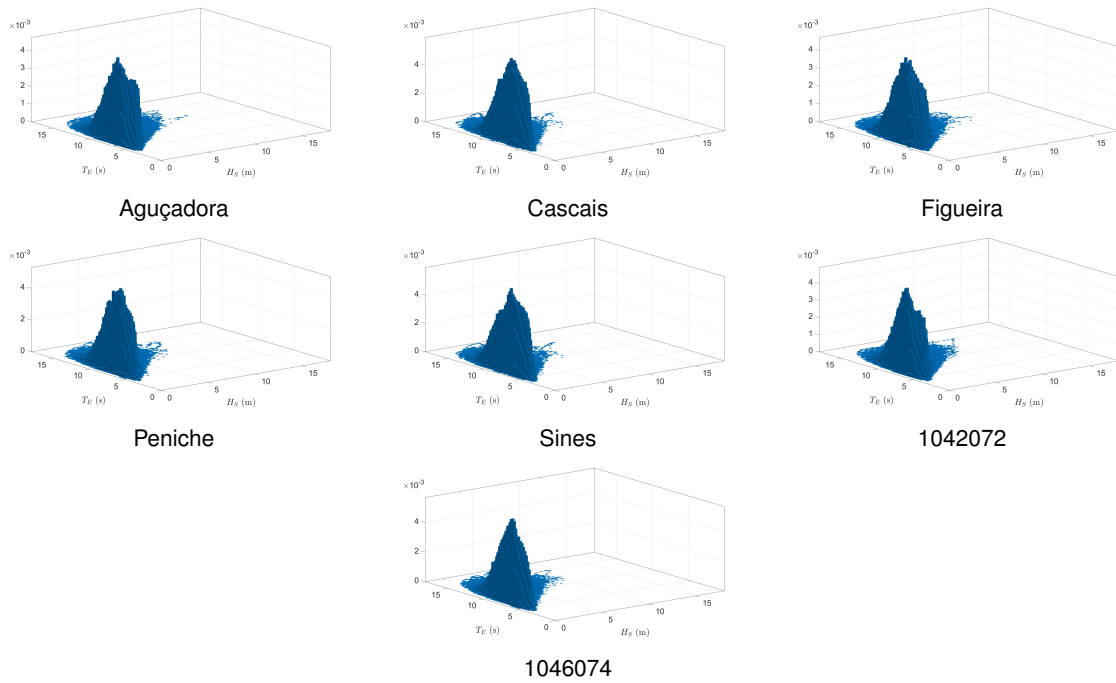


Figura A.11: Gráfico de dispersão 3D  $H_S T_E$ .

## A.5 Histogramas de $H_S$ e de $T_E$

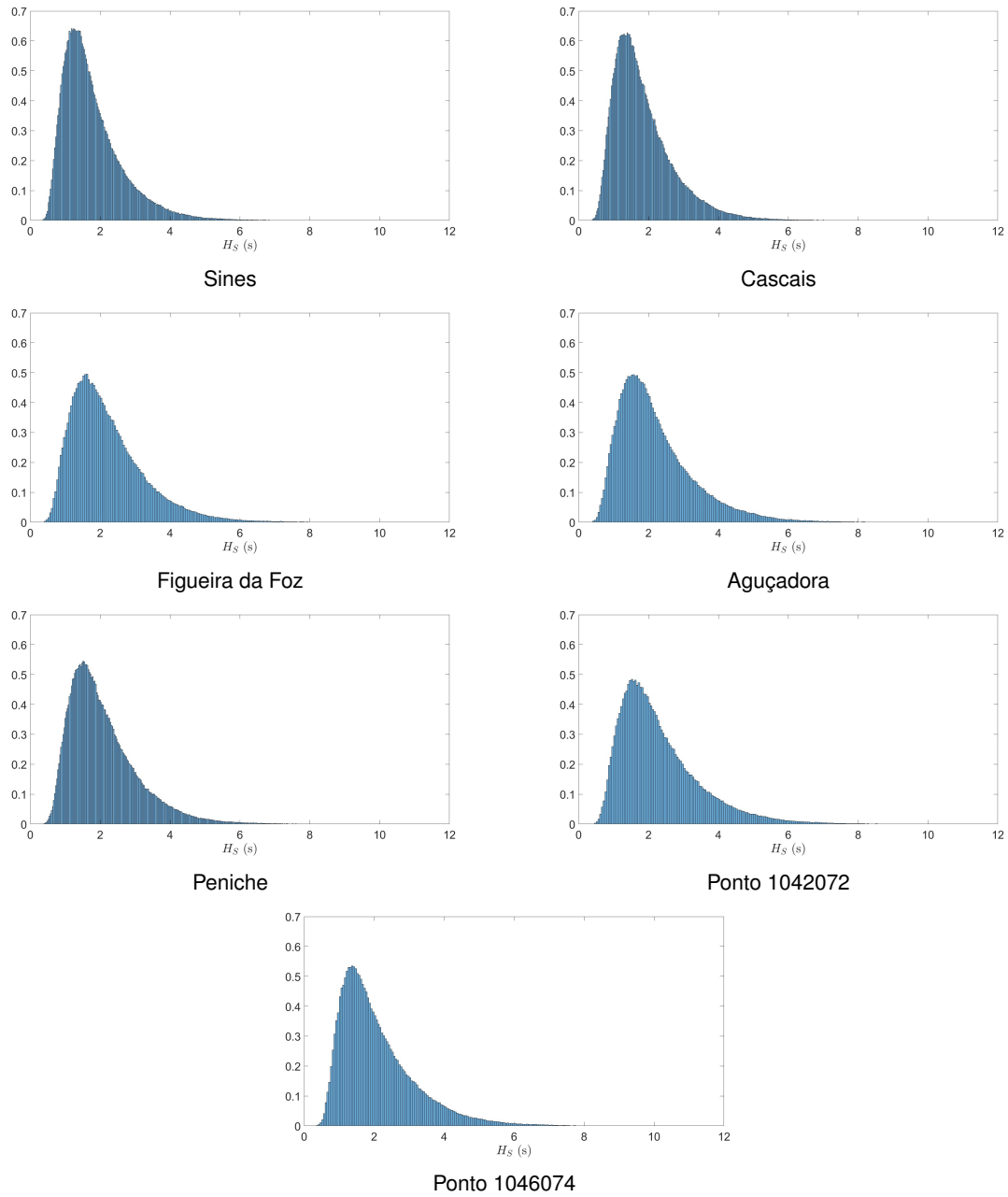


Figura A.12: Histogramas de  $H_S$ .

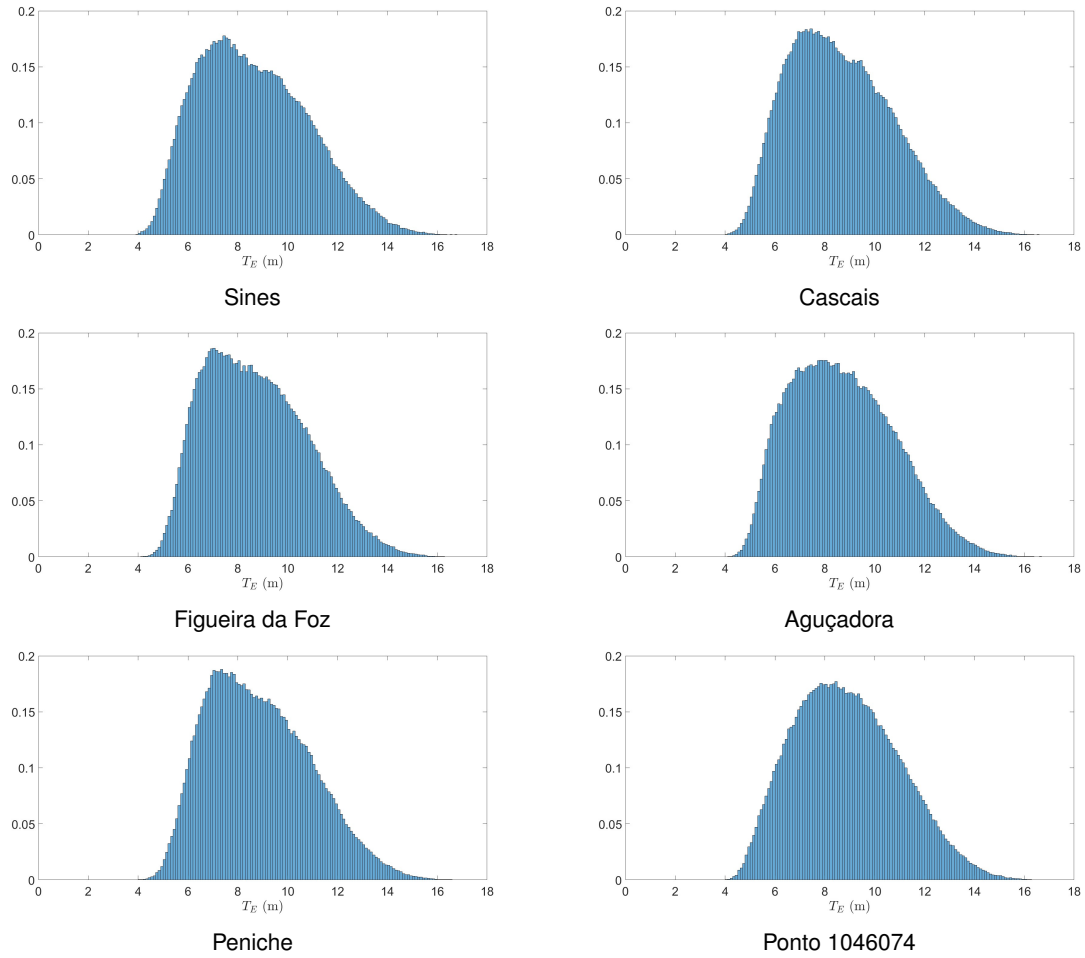
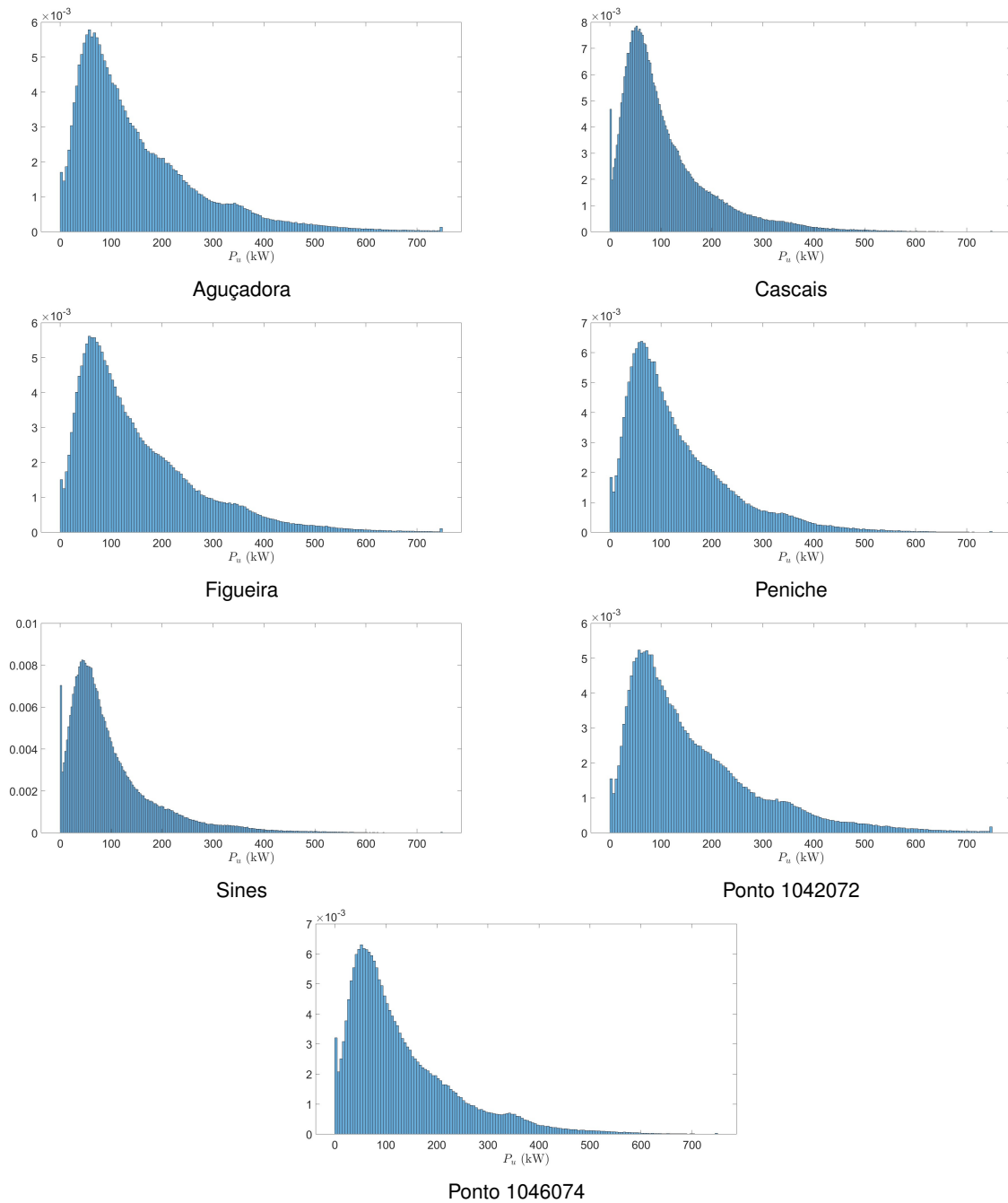
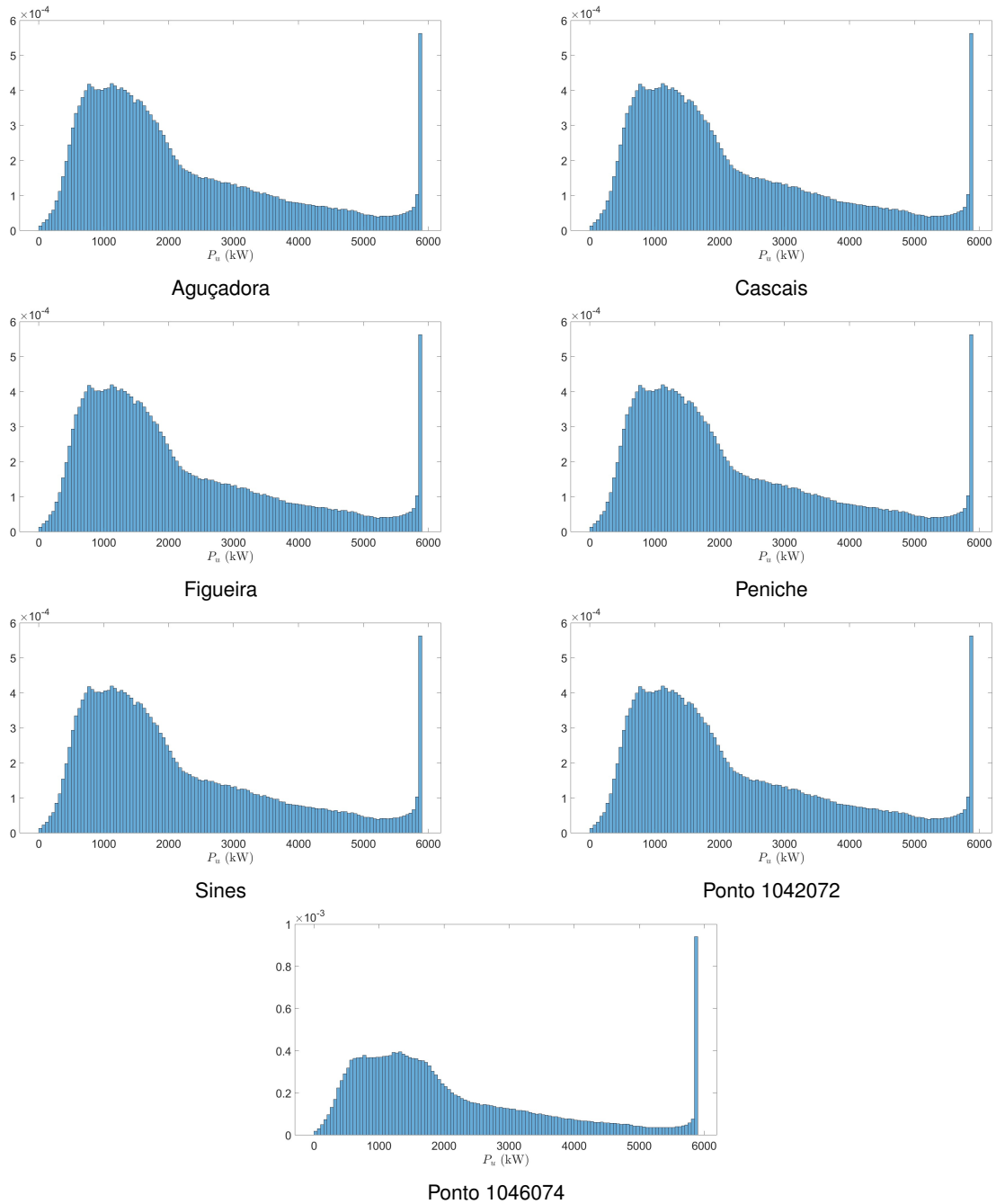


Figura A.13: Histogramas de  $T_E$ .

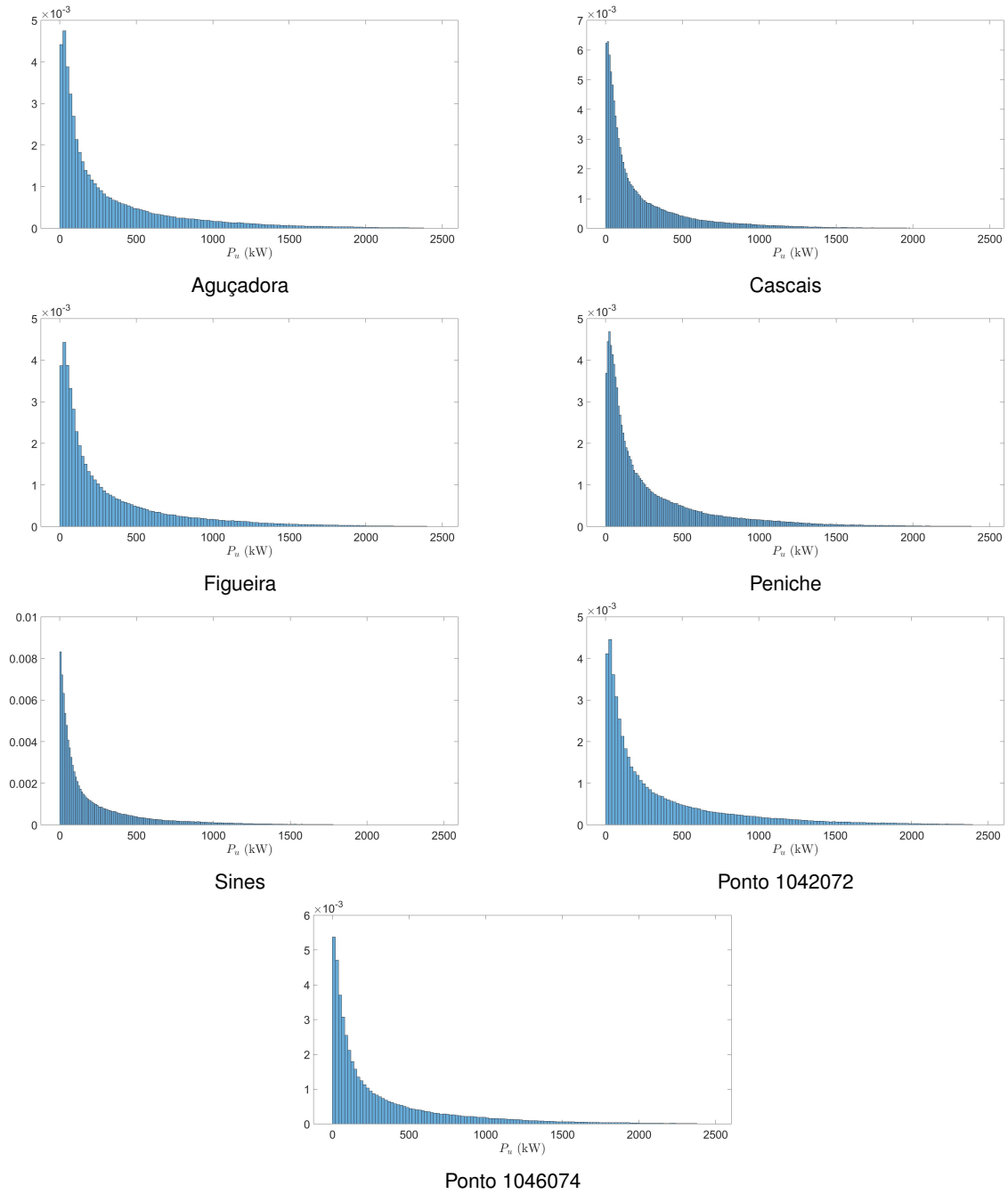
## A.6 Histogramas da Potência Útil $P_u$



**Figura A.14:** Histograma da variável  $P_f$  no dispositivo Pelanis para diferentes localizações.



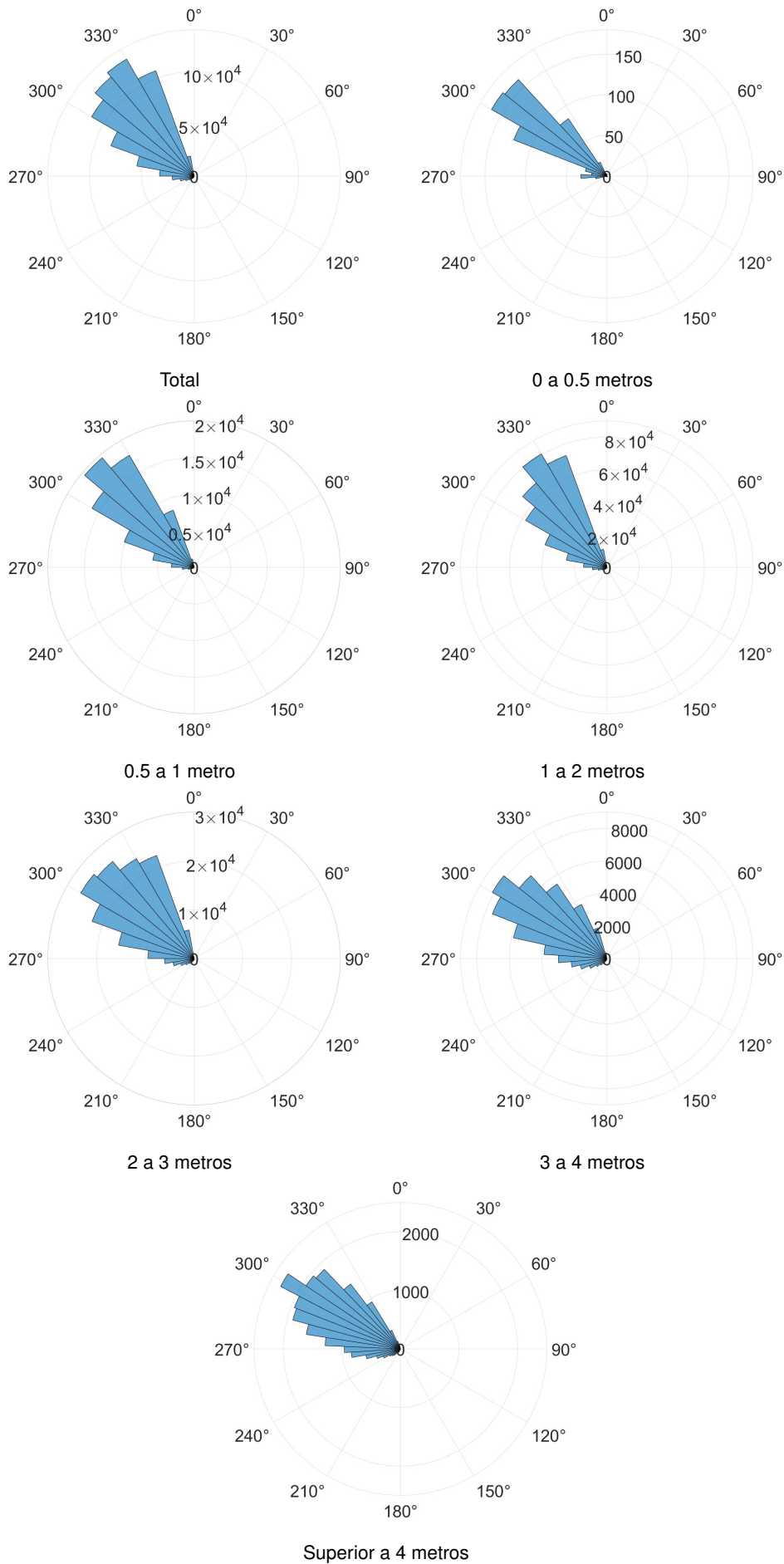
**Figura A.15:** Histograma da variável  $P_f$  no dispositivo DragonWave para diferentes localizações.



**Figura A.16:** Histograma da variável  $P_f$  no dispositivo Archimedes para diferentes localizações.

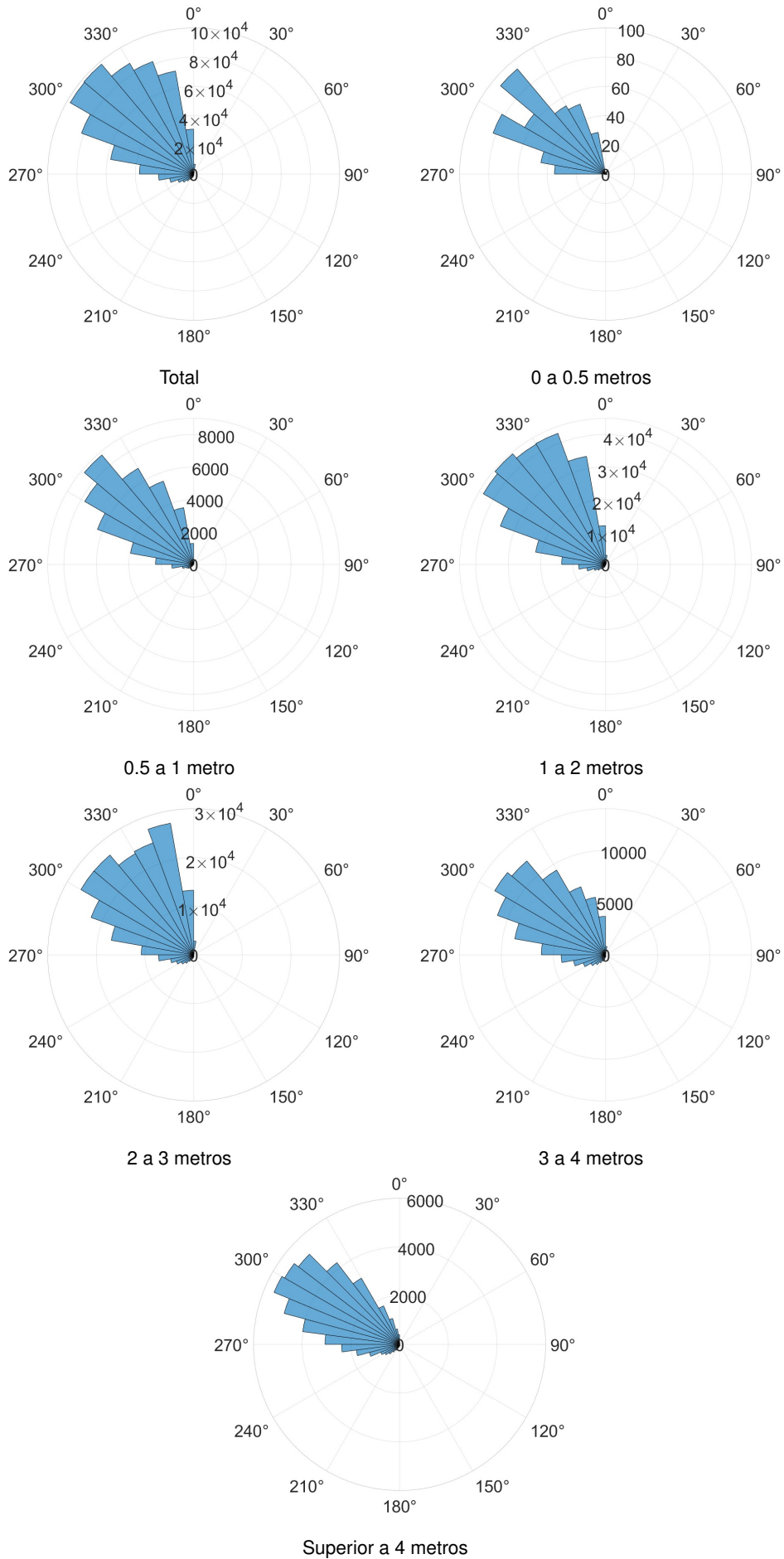
## **A.7 Rosas dos Ventos**

Avaliação do Potencial Energético na Zona Costeira Portuguesa



**Figura A.17:** Rosas dos ventos das direções de propagação das ondas, em função de  $H_s$ , em Cascais.

Avaliação do Potencial Energético na Zona Costeira Portuguesa



**Figura A.18:** Rosas dos ventos das direções de propagação das ondas, em função de  $H_s$ , em Figueira da Foz.

Avaliação do Potencial Energético na Zona Costeira Portuguesa

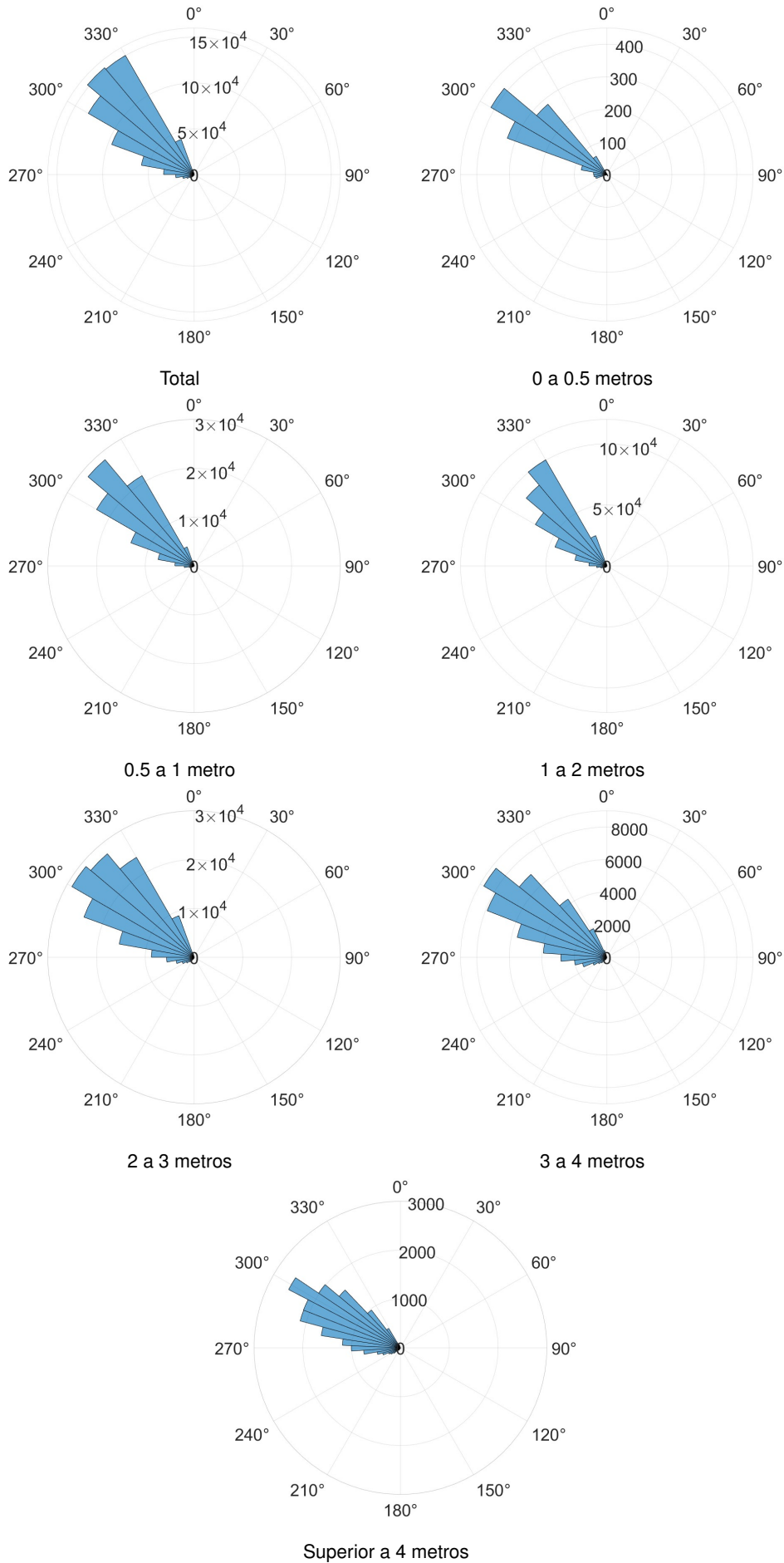
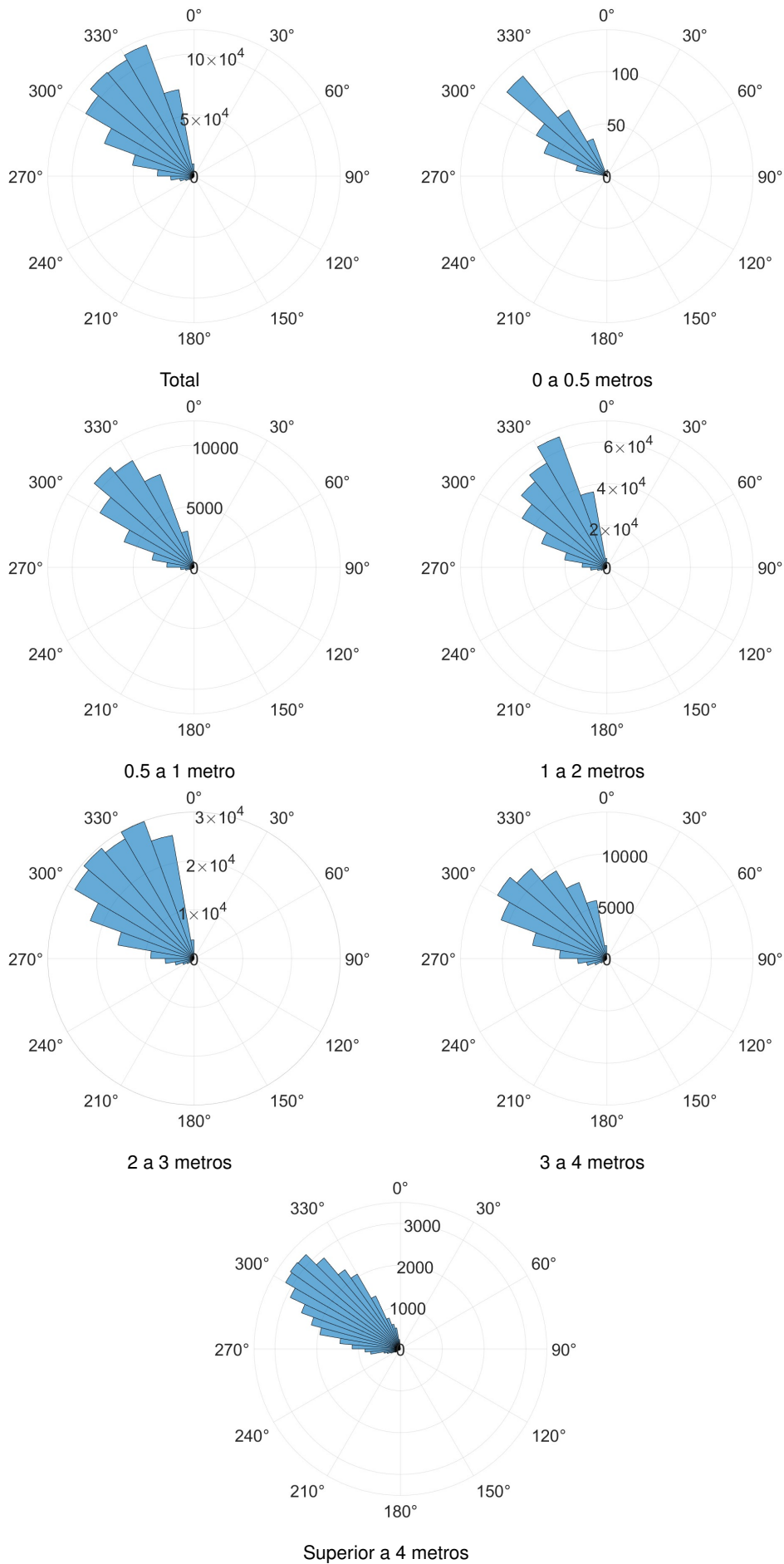


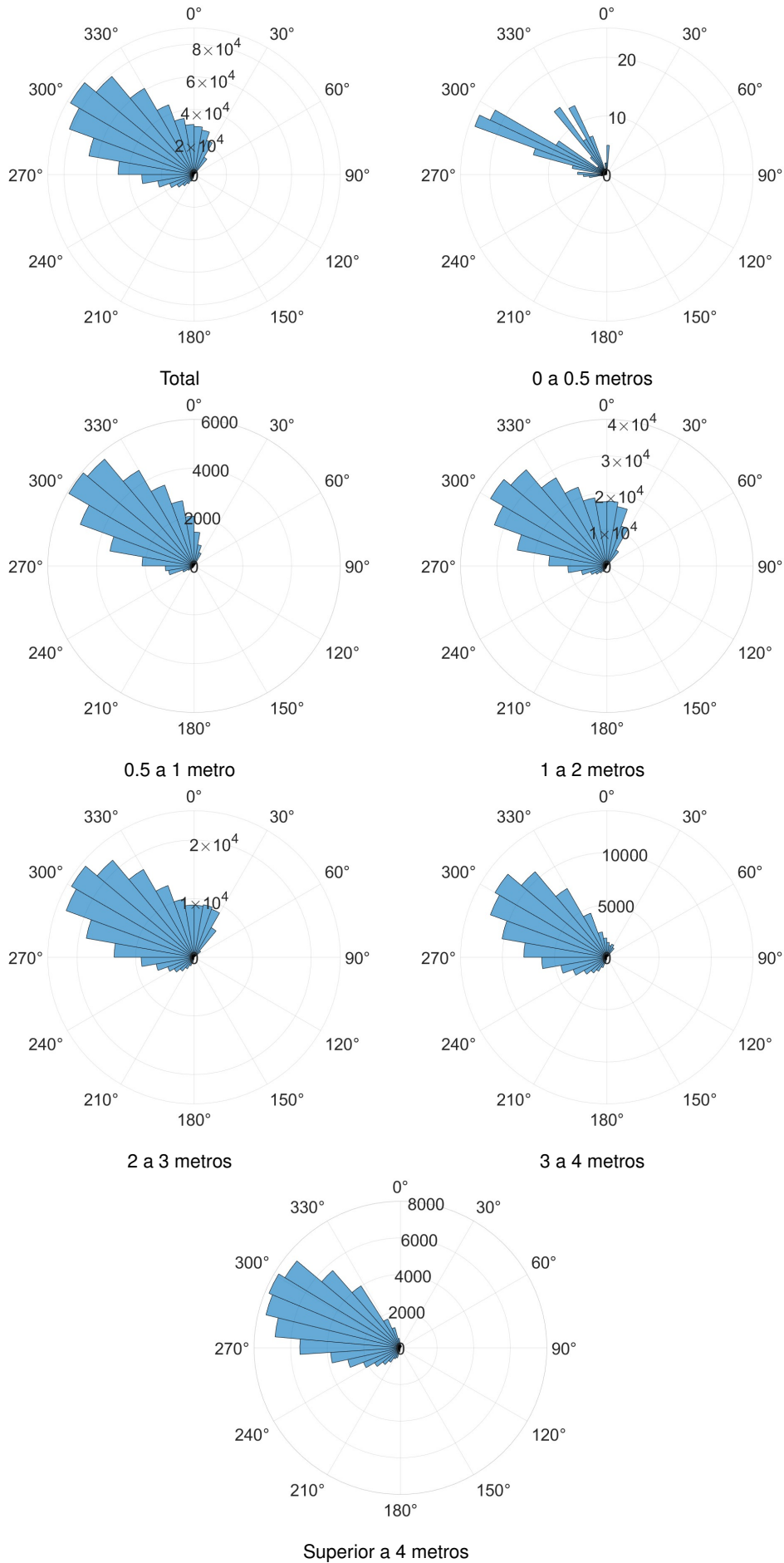
Figura A.19: Rosas dos ventos das direções de propagação das ondas, em função de  $H_s$ , em Sines.

Avaliação do Potencial Energético na Zona Costeira Portuguesa



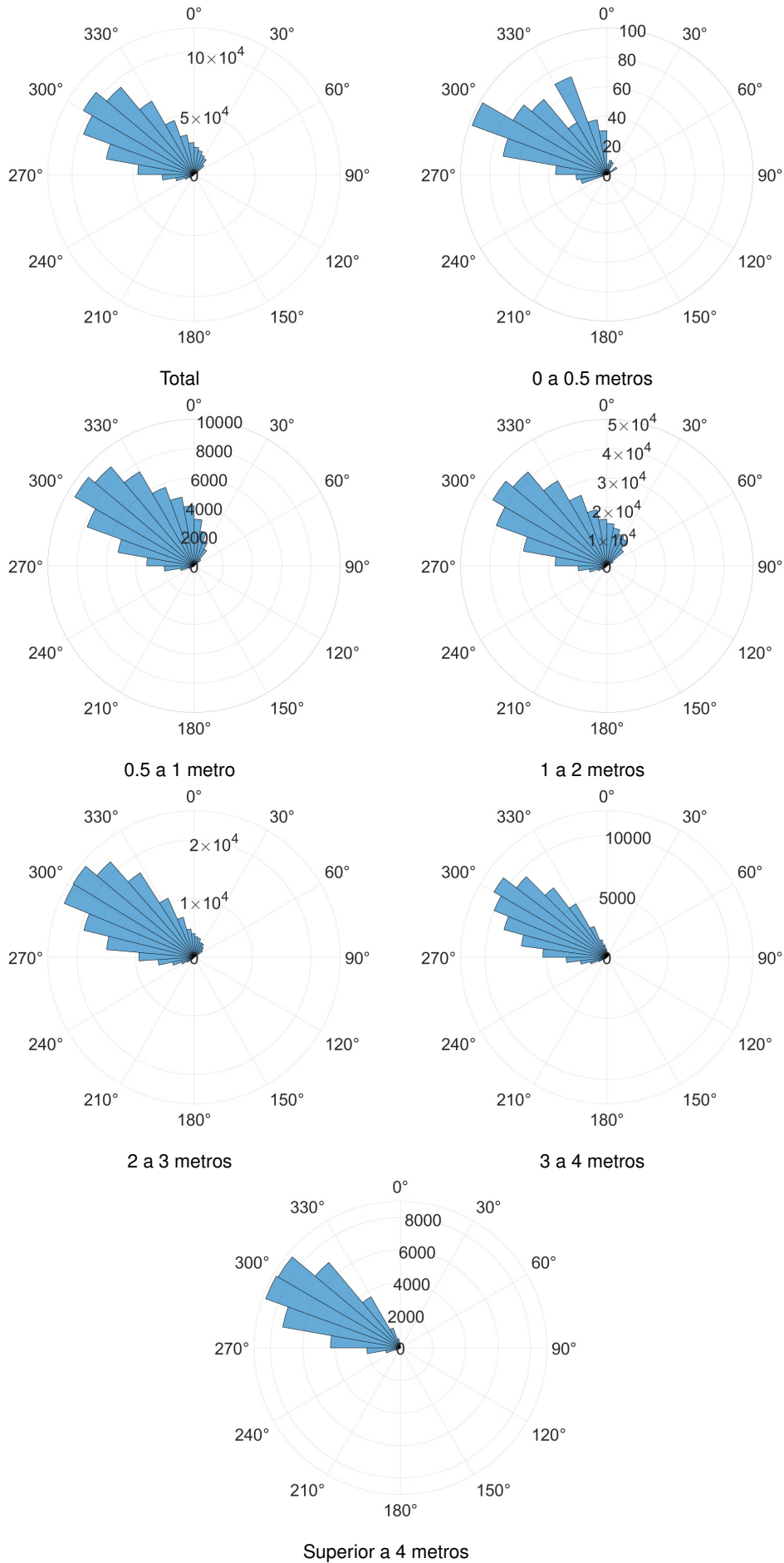
**Figura A.20:** Rosas dos ventos das direções de propagação das ondas, em função de  $H_s$ , em Peniche.

Avaliação do Potencial Energético na Zona Costeira Portuguesa



**Figura A.21:** Rosas dos ventos das direções de propagação das ondas, em função de  $H_s$ , no Ponto 1042072.

Avaliação do Potencial Energético na Zona Costeira Portuguesa



**Figura A.22:** Rosas dos ventos das direções de propagação das ondas, em função de  $H_s$ , no Ponto 1046074.