

**FÁBIO RICARDO DA SILVA MADEIRA**

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ONDAS  
NO ARQUIPÉLAGO DOS AÇORES**



**UNIVERSIDADE DO ALGARVE**  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
2015

**FÁBIO RICARDO DA SILVA MADEIRA**

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ONDAS  
NO ARQUIPÉLAGO DOS AÇORES**

**Mestrado em Energias Renováveis e Gestão de Energia**

**Trabalho efetuado sob a orientação de:**  
Professor Doutor José Manuel Quintela de Brito Jacob  
Doutora Conceição Juana E. M. Fortes



**UNIVERSIDADE DO ALGARVE**  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
2015

## Declaração de autoria de trabalho

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

---

Fábio Madeira  
(Setembro 2015)

© Fábio Madeira

A Universidade do Algarve tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicitar este trabalho através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de o divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

## **Resumo**

Ao longo dos anos a dependência da utilização dos combustíveis fósseis tem crescido de forma significativa, o que faz com que seja necessário a procura e o estudo de novas fontes de energia. Nesse sentido, a exploração e extração da energia proveniente das ondas do mar ganha importância, e, em particular no Arquipélago dos Açores cujo clima de agitação marítima é muito severo.

Foi então sob esta premissa que o presente estudo se realizou, com o objetivo de avaliar os padrões de energia das ondas em todo o Arquipélago. A análise da agitação marítima foi o primeiro passo a tomar, depois de um sistema de previsão de ondas com base em modelos de ondas espectrais, nomeadamente WAM e SWAN, ter sido implementado e validado com os dados de três boias ondógrafas operadas pela Universidade dos Açores no ambiente costeiro do Arquipélago.

Ao utilizar-se os modelos espectrais acima descritos foi possível avaliar a distribuição espacial da energia das ondas, tendo em conta os diferentes padrões de energia para os regimes de Verão e Inverno. Foi também possível observar que as zonas costeiras Norte-Oeste apresentam uma disponibilidade energética elevada. Este processo teve então lugar à criação de mapas de distribuição espacial e diagramas de isolinhas que permitissem uma avaliação mais precisa dos locais propícios à extração de energia.

Os resultados mostraram que o Arquipélago dos Açores possui uma vasta quantidade considerável de recurso de energia das ondas e potenciais estruturas marítimas para a implementação de dispositivos de extração costeiros.

**Palavras-chave:** SWAN, Energia das Ondas, Agitação Marítima, Estruturas Marítimas, Açores

## **Abstract**

Over the years, reliance on the use of fossil fuels has increased significantly, which makes necessary the demand and studies for new sources of energy. Accordingly, the exploration and extraction of energy from sea waves becomes important and, in particular, in the Azores Archipelago whose sea waves climate is very severe.

Then it was under this assumption that this study was conducted in order to evaluate the energy patterns of waves across de Archipelago. The analysis of wave propagation was the first step to take after a wave forecasting system based on spectral wave models, including WAM and SWAN, have been implemented and validated with data from wave rider buoys operated by the University of the Azores in the coastal environment of the Archipelago.

By using spectral models described above was possible to evaluate the spatial distribution of wave energy, taking into account the different energy patterns for the summer and winter regimes. It was also possible to see that the North-West coastal areas have high energy availability. Then this process took place to the creation of spatial distribution maps and contour diagrams that would allow a more accurate assessment of the sites conducive to energy extraction.

The results showed that Azores has a wide considerable amount of wave energy resource and potential marine structures to implementation of coastal extraction devices.

**Key-words:** SWAN, Wave Energy, Wave Climate, Marine Structures, Azores

## **Agradecimentos**

A realização desta Dissertação de Mestrado só foi possível graças à colaboração e contributo de várias pessoas às quais gostaria de exprimir algumas palavras de agradecimento e profundo reconhecimento.

Quero agradecer ao André Matos pelo convívio durante estes 6 meses e pelos momentos de diversão e entreajuda ao longo deste trabalho.

À Engenheira Juana e ao Doutor Eric pela disponibilidade em ajudar sempre que foi necessário, por todo o conhecimento extra que adquiri ao longo do estágio e pela boa disposição de ambos, o que contribuiu para o bom ambiente de trabalho.

Ao Professor José Jacob por ter dado a conhecer a oportunidade de efetuar o estudo no LNEC e pelas palavras de motivação e encorajamento ao longo do estágio.

À Engenheira Liliana Pinheiro pela ajuda na obtenção da batimetria e pela disponibilidade em ajudar sempre que foi preciso.

Ao Engenheiro Pedro Poseiro pela ajuda indispensável prestada ao longo do estágio, pelos bons conselhos e pela boa disposição contagiante.

Aos meus colegas do LNEC João Dias, Diogo Neves, Jorge Silva, Ricardo Bento, João Sengo, Valentim Costa e Inês Lourenço pelos bons momentos passados.

Ao meu grande amigo Nuno Simões do IPMA por todo o conhecimento que me transmitiu sobre ArcGIS e com quem me diverti muito.

À minha namorada Ana Nascimento pela ajuda indispensável na construção gráfica dos resultados e pelas palavras de motivação e encorajamento.

Ao meu Irmão Guilherme, Avó Rita, “mana” Filipa e Tia Miló por todo o apoio e ajuda que me transmitiram.

À minha Prima Catarina que foi uma fonte de inspiração, motivação e força ao longo dos anos.

Por fim, um enorme agradecimento aos meus pais pelo esforço, não só no período de estágio no LNEC, mas também em todo o meu percurso académico, pois sem eles não teria sido possível chegar aqui.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$B_r$  – Parâmetro utilizado na expressão da rebentação parcial  $S_{diss,wc}(\sigma, \theta)$ ;

$c_{g,x}$  – Velocidade de propagação na direção  $x$ ;

$c_{g,y}$  – Velocidade de propagação na direção  $y$ ;

$c_\theta$  – Velocidade no espaço espectral direcional;

$c_\sigma$  – Velocidade de propagação no domínio da frequência relativa intrínseca;

$H_{max}$  – Altura de onda máxima para a qual não se dá rebentação.

$H_s$  – Altura significativa estimada no domínio do tempo;

$S_{diss,bfr}(\sigma, \theta)$  – Dissipação de energia por atrito do fundo;

$S_{diss,surf}(\sigma, \theta)$  – Dissipação de energia por rebentação induzida pelo fundo;

$S_{diss,wc}(\sigma, \theta)$  – Dissipação de energia por rebentação parcial;

$S_{diss}(\sigma, \theta)$  – Dissipação de energia – termo sumidouro de dissipação genérico;

$S_{in}(\sigma, \theta)$  – Geração devido à ação do vento;

$S_{nl}(\sigma, \theta)$  – Efeitos da interação não linear entre ondas;

$C$  – Celeridade de onda;

$C_g$  – Celeridade grupo de onda;

$d$  – Profundidade relativa ao nível de repouso;

$E$  – Energia de onda;

$g$  – Aceleração da gravidade;

$H$  – Altura de onda;

$L$  – Comprimento de onda;

$S(\sigma, \theta)$  – Termos fonte e sumidouro na equação de balanço de ação espectral;

$T$  – Período de onda;

$Tp$  – Período de pico;

$Tz$  – Período médio;

$t$  – Tempo;

$\theta$  – Direção de onda;

$\theta m$  – Direção média;

$\theta p$  – Direção de pico;

$\sigma$  – Frequência de onda intrínseca; coeficiente de assimetria;

$N(\vec{x}, t, \sigma, \theta)$  – Densidade de Ação de onda;

$\rho$  – Densidade da água do mar;

## **ABREVIATURAS, SIGLAS E UNIDADES**

AWS – Archimedes Wave Swing

CAO – Coluna de Água Oscilante

CLIMAAT – Clima e Meteorologia dos Arquipélagos Atlânticos

DITOWEC – Desenvolvimento de uma Ferramenta Integrada para Modelação Numérica de Conversores de Energia das Ondas de tipo Coluna de Água Oscilante integrados em Quebra-mar Verticais

ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

EDA – Eletricidade dos Açores

EDP – Energias De Portugal

ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos

GW – Gigawatt

IH – Instituto Hidrográfico

kWh – Quilowatt-hora

kW/m – Quilowatt por cada metro de frente de onda

IST – Instituto Superior Técnico

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

INETI – Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

ME – Mean error ou valor médio do erro

SWAN – Simulating Waves Nearshore

R – Coeficiente de correlação de Pearson

RMSE – Root mean square error ou valor médio do erro quadrático

SOPRO – Sistema Operacional de Previsão da Ondulação em portos

SWAN – Simulating Waves Nearshore

TW – Terawatt

WAMDI – Wave Model Development and Implementation

WWIII – WAVEWATCH III

## ÍNDICE

<b>RESUMO.....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>IV</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>VI</b>
<b>ABREVIATURAS, SIGLAS E UNIDADES .....</b>	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>X</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>XII</b>
<b>ÍNDICES DE TABELAS .....</b>	<b>XVII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL .....	1
1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA .....	4
1.3. ESTRUTURA DO RELATÓRIO FINAL .....	6
<b>2. DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS .....</b>	<b>8</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	8
2.2. CASO DE PORTUGAL .....	15
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>20</b>
3.1. SWAN.....	20
3.1.1. Descrição do Modelo.....	20
3.1.2. Equação do Balanço de Ação .....	21
3.1.3. Procedimentos de Pré e Pós-processamento.....	22
3.2. POTENCIAL ENERGÉTICO .....	23
<b>4. CASO DE ESTUDO.....</b>	<b>26</b>
4.1. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO .....	26
4.2. DADOS DISPONÍVEIS .....	27
4.2.1. Batimetrias e Ventos.....	27
4.2.2. Dados de Boia Ondógrafo .....	30
4.2.3. Dados de Agitação Marítima do WAM.....	31
4.2.4. Dados de Maré e Nível do mar .....	32
4.3. CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO DO MODELO SWAN .....	33
4.3.1. Domínio de Cálculo.....	33
4.3.2. Características das Simulações.....	35
<b>5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....</b>	<b>37</b>
5.1. INTRODUÇÃO .....	37
5.2. ANÁLISE DO DESEMPENHO DO MODELO SWAN .....	38
5.3. CARATERIZAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA .....	40

5.3.1.	Grupo Ocidental .....	40
5.3.1.1.	Altura significativa .....	40
5.3.1.2.	Período de pico .....	43
5.3.1.3.	Direção de onda .....	45
5.3.2.	Grupo Central .....	47
5.3.2.1.	Altura significativa .....	47
5.3.2.2.	Período de pico .....	49
5.3.2.3.	Direção de onda .....	51
5.3.3.	Grupo Oriental .....	53
5.3.3.1.	Altura significativa .....	53
5.3.3.2.	Período de pico .....	55
5.3.3.3.	Direção de onda .....	57
5.4.	AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ENERGÉTICA .....	59
5.4.1.	Grupo Ocidental .....	59
5.4.2.	Grupo Central .....	63
5.4.3.	Grupo Oriental .....	68
5.4.4.	Estruturas Marítimas .....	72
5.4.4.1.	Porto Cachorro - Pico .....	72
5.4.4.2.	Ponta Delgada .....	80
<b>6.</b>	<b>POTENCIAL ENERGÉTICO .....</b>	<b>90</b>
6.1.	COMPARAÇÃO DO POTENCIAL ENTRE OS GRUPOS.....	90
6.2.	AVALIAÇÃO DAS ZONAS DE MAIOR POTENCIAL ENERGÉTICO.....	92
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>95</b>
<b>8.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>97</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>100</b>	
ANEXO 1.....	101	
ANEXO 2.....	102	
ANEXO 3.....	105	
ANEXO 4.....	108	
ANEXO 5.....	111	
ANEXO 6.....	114	

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.1.</b> DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO MÉDIO DE ENERGIA DAS ONDAS NO MUNDO EM kW/M. (CRUZ E SARMENTO, 2004). .....	2
<b>FIGURA 2.1.</b> DIAGRAMA DOS DIFERENTES DISPOSITIVOS DE EXTRAÇÃO DE ENERGIA. ADAPTADO DE (CALDEIRA, 2014). .....	8
<b>FIGURA 2.2.</b> DIAGRAMA DOS DIFERENTES DISPOSITIVOS DE EXTRAÇÃO DE ENERGIA.....	9
<b>FIGURA 2.3.</b> SISTEMA COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE: CENTRAL LIMPET (ESQUERDA) E CENTRAL DO PICO (DIREITA). ADAPTADO DE (MARTINS, 2009 E FALCÃO, 2007). ...	10
<b>FIGURA 2.4.</b> CENTRAL MUTRIKU (PAÍS BASCO). ADAPTADO DE (TORRE-ENCISO, 2009). .....	11
<b>FIGURA 2.5.</b> SISTEMA DE COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE DA ENERGETECH. ADAPTADO DE (CRUZ E SARMENTO, 2004). .....	11
<b>FIGURA 2.6.</b> CENTRAL DO CEARÁ (BRASIL). ADAPTADO DE ( <a href="http://www.bluebird-electric.net/wave_power_energy_generation.htm">HTTP://WWW.BLUEBIRD-ELECTRIC.NET/WAVE_POWER_ENERGY_GENERATION.HTM</a> , 2012). .....	12
<b>FIGURA 2.7.</b> SISTEMA CONVERSOR OSCILANTE DA ONDA, WAVEROLLER A – ESQUEMA REPRESENTATIVO; B – WAVEROLLER. ....	13
<b>FIGURA 2.8.</b> SISTEMA ATENUADOR, PELAMIS. A – ESQUEMA REPRESENTATIVO; B – PELAMIS. ADAPTADO DE (MARTINS, 2010). .....	13
<b>FIGURA 2.9.</b> SISTEMA DE DIFERENÇA DE PRESSÃO SUBMERSA, AWS. A – ESQUEMA REPRESENTATIVO; B – IMAGEM VIRTUAL. ADAPTADO DE (MARTINS, 2010). .....	14
<b>FIGURA 2.10.</b> SISTEMA DE GALGAMENTO, WAVE DRAGON. ADAPTADO DE (MARTINS, 2010). .....	15
<b>FIGURA 2.11.</b> ARQUIPÉLAGO DOS AÇORES (ESQUERDA) E LOCALIZAÇÃO DA CENTRAL PILOTO CAO EM PORTO CACHORRO – ILHA DO PICO (DIREITA). ADAPTADO DE (BRITO E MELO, 2000). .....	16
<b>FIGURA 2.12.</b> CENTRAL PILOTO CAO EM PORTO CACHORRO – ILHA DO PICO: ZONA TRASEIRA (ESQUERDA) E ZONA FRONTAL (DIREITA) ADAPTADO DE (BRITO E MELO, 2000). .....	17
<b>FIGURA 2.13.</b> ESQUEMA DA CENTRAL PILOTO EM PORTO CACHORRO: EXTERIOR (ESQUERDA) E INTERIOR (DIREITA). ESQUERDA: 1 – ONDA INCIDENTE; 2 – COLUNA DE ÁGUA; 3 – CÂMARA PNEUMÁTICA; 4 – VÁLVULA DE ALÍVIO; 5 – VÁLVULA DE ISOLAMENTO; 6 – VÁLVULA DE MANOBRA; 7 – TURBINA WELLS; 8 – GERADOR ASSÍNCRONO; DIREITA: 1 – CONDUÇÃO DA TURBINA; 2 – TURBINA COM ESTADORES; 3 – GERADOR ELÉTRICO; 4 – PÁS DIRETRIZES. ADAPTADO DE (NEUMANN, 2011). .....	17
<b>FIGURA 2.14.</b> CENTRAL AWS, AO LARGO DA PÓVOA DO VARZIM. ADAPTADO DE (BRITO E MELO, 2010) .....	18
<b>FIGURA 2.15.</b> WAVEROLLER EM PENICHE. ADAPTADO DE (BRITO E MELO, 2010). .....	19
<b>FIGURA 2.16.</b> SISTEMA ATENUADOR, PELAMIS, EM AGUÇADORA. ADAPTADO DE (BRITO E MELO, 2010). .....	19
<b>FIGURA 3.1.</b> ILUSTRAÇÃO DAS VÁRIAS GRELHAS DE ENTRADA NO SWAN. ....	20
<b>FIGURA 3.2.</b> LIMITES DE TRANSIÇÃO ENTRE ÁGUAS PROFUNDAS E ÁGUAS SUPERFICIAIS. ADAPTADO DE (PEREIRA, 2008). .....	23

<b>FIGURA 4.1.</b> LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO.....	26
<b>FIGURA 4.2.</b> BATIMÉTRICA DOS 500, 1000 E 2000 M DO ARQUIPÉLAGO DOS AÇORES. ADAPTADO DE SURFER 9.0.....	27
<b>FIGURA 4.3.</b> REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DOS PONTOS DE CÁLCULO, EM CONJUNTO COM A BATIMETRIA, NO GRUPO OCIDENTAL. ....	27
<b>FIGURA 4.4.</b> REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DOS PONTOS DE CÁLCULO, EM CONJUNTO COM A BATIMETRIA, DO GRUPO CENTRAL.....	28
<b>FIGURA 4.5.</b> REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DOS PONTOS DE CÁLCULO, EM CONJUNTO COM A BATIMETRIA, NO GRUPO ORIENTAL.....	28
<b>FIGURA 4.6.</b> REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DOS PONTOS DE CÁLCULO, EM CONJUNTO COM A BATIMETRIA, AO LARGO DE PORTO CACHORRO (PICO).....	29
<b>FIGURA 4.7.</b> REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DOS PONTOS DE CÁLCULO AO LARGO DE PONTA DELGADA.....	30
<b>FIGURA 4.8.</b> REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DOS PONTOS UTILIZADOS NO WAM. ....	31
<b>FIGURA 4.9.</b> DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DOS PARÂMETROS DE ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA, PERÍODO MÉDIO E DIREÇÃO MÉDIA, AO LONGO DOS 10 ANOS, PARA O PONTO 14 (FIGURA 4.4) DO GRUPO CENTRAL.....	32
<b>FIGURA 4.10.</b> LOCALIZAÇÃO DAS MALHAS DE ESTUDO PARA OS GRUPOS OCIDENTAL, CENTRAL E ORIENTAL.....	34
<b>FIGURA 4.11.</b> LOCALIZAÇÃO DAS MALHAS DE ESTUDO PARA O PICO. ....	34
<b>FIGURA 4.12.</b> LOCALIZAÇÃO DAS MALHAS DE ESTUDO PARA PONTA DELGADA. ....	35
<b>FIGURA 5.1.</b> COMPARAÇÃO, DA ALTURA SIGNIFICATIVA E PERÍODO DE PICO, ENTRE OS VALORES MEDIDOS E SIMULADOS. A) DADOS PARA Hs ENTRE 6 A 16 DE FEVEREIRO DE 2013. B) DADOS PARA Tp ENTRE 6 A 16 DE FEVEREIRO DE 2013.....	38
<b>FIGURA 5.2.</b> COMPARAÇÃO, DA ALTURA SIGNIFICATIVA E PERÍODO DE PICO, ENTRE OS VALORES MEDIDOS E SIMULADOS. A) DADOS PARA Hs ENTRE 9 A 12 DE JANEIRO DE 2013. B) DADOS PARA Tp ENTRE 9 A 12 DE JANEIRO DE 2013. ....	39
<b>FIGURA 5.3.</b> COMPARAÇÃO, DA ALTURA SIGNIFICATIVA E PERÍODO DE PICO, ENTRE OS VALORES REAIS E SIMULADOS. A) DADOS PARA Hs ENTRE 1 A 4 DE OUTUBRO DE 2013. B) DADOS PARA Tp ENTRE 1 A 4 DE OUTUBRO DE 2013. ....	39
<b>FIGURA 5.4.</b> DISTRIBUIÇÃO DA DIREÇÃO DE PICO DAS ONDAS EM FUNÇÃO DA ALTURA SIGNIFICATIVA. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. C) TOTAL.....	41
<b>FIGURA 5.5.</b> FREQUÊNCIA RELATIVA DA ALTURA SIGNIFICATIVA. A) 2005. B) 2007. C) 2009. D) 2012. E) 2014.....	42
<b>FIGURA 5.6.</b> FREQUÊNCIA RELATIVA DA ALTURA SIGNIFICATIVA. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. C) TOTAL.....	43
<b>FIGURA 5.7.</b> FREQUÊNCIA RELATIVA DO PERÍODO DE PICO. A) 2005. B) 2007. C) 2009. D) 2012. E) 2014.....	44
<b>FIGURA 5.8.</b> FREQUÊNCIA RELATIVA DA ALTURA SIGNIFICATIVA. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. C) TOTAL.....	45
<b>FIGURA 5.9.</b> DISTRIBUIÇÃO DA DIREÇÃO DE PICO DAS ONDAS. A) 2005. B) 2007. C) 2009. D) 2012. E) 2014.....	46
<b>FIGURA 5.10.</b> DISTRIBUIÇÃO DA DIREÇÃO DE PICO DAS ONDAS. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. C) TOTAL.....	46

<b>FIGURA 5.11.</b> DISTRIBUIÇÃO DA DIREÇÃO DE PICO DAS ONDAS EM FUNÇÃO DA ALTURA SIGNIFICATIVA. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. C) TOTAL .....	47
<b>FIGURA 5.12.</b> FREQUÊNCIA RELATIVA DA ALTURA SIGNIFICATIVA. A) 2005. B) 2007. C) 2009. D) 2012. E) 2014 .....	48
<b>FIGURA 5.13.</b> FREQUÊNCIA RELATIVA DA ALTURA SIGNIFICATIVA. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. C) TOTAL .....	49
<b>FIGURA 5.14.</b> FREQUÊNCIA RELATIVA DO PERÍODO DE PICO. A) 2005. B) 2007. C) 2009. D) 2012. E) 2014 .....	50
<b>FIGURA 5.15.</b> FREQUÊNCIA RELATIVA DO PERÍODO DE PICO. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. C) TOTAL .....	51
<b>FIGURA 5.16.</b> DISTRIBUIÇÃO DA DIREÇÃO DE PICO DAS ONDAS. A) 2005. B) 2007. C) 2009. D) 2012. E) 2014 .....	52
<b>FIGURA 5.17.</b> DISTRIBUIÇÃO DA DIREÇÃO DE PICO DAS ONDAS. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. C) TOTAL .....	53
<b>FIGURA 5.18.</b> DISTRIBUIÇÃO DA DIREÇÃO DE PICO DAS ONDAS EM FUNÇÃO DA ALTURA SIGNIFICATIVA. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. C) TOTAL .....	53
<b>FIGURA 5.19.</b> FREQUÊNCIA RELATIVA DA ALTURA SIGNIFICATIVA. A) 2005. B) 2007. C) 2009. D) 2012. E) 2014 .....	54
<b>FIGURA 5.20.</b> FREQUÊNCIA RELATIVA DA ALTURA SIGNIFICATIVA. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. C) TOTAL .....	55
<b>FIGURA 5.21.</b> FREQUÊNCIA RELATIVA DO PERÍODO DE PICO. A) 2005. B) 2007. C) 2009. D) 2012. E) 2014 .....	56
<b>FIGURA 5.22.</b> FREQUÊNCIA RELATIVA DO PERÍODO DE PICO. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. C) TOTAL .....	57
<b>FIGURA 5.23.</b> DISTRIBUIÇÃO DA DIREÇÃO DE PICO DAS ONDAS. A) 2005. B) 2007. C) 2009. D) 2012. E) 2014 .....	58
<b>FIGURA 5.24.</b> DISTRIBUIÇÃO DA DIREÇÃO DE PICO DAS ONDAS. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. C) TOTAL .....	59
<b>FIGURA 5.25.</b> DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DOS PARÂMETROS DE ALTURA SIGNIFICATIVA DE ONDA, PERÍODO DE ONDA E POTÊNCIA .....	59
<b>FIGURA 5.26.</b> FREQUÊNCIA RELATIVA DA POTÊNCIA. A) MESES DE VERÃO B) MESES DE INVERNO C) TOTAL .....	60
<b>FIGURA 5.27.</b> REGIME MÉDIO MENSAL DA POTÊNCIA EM CORVO (A) E FLORES (B) (GRUPO OCIDENTAL) (2005-2014) .....	61
<b>FIGURA 5.28.</b> DISTRIBUIÇÃO DA DIREÇÃO DE PICO DAS ONDAS EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. C) TOTAL .....	62
<b>FIGURA 5.29.</b> DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL MÉDIA DA POTÊNCIA EM CONJUNTO COM A DIREÇÃO DE PICO NO GRUPO OCIDENTAL. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. C) TOTAL .....	63
<b>FIGURA 5.30.</b> DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DOS PARÂMETROS DE ALTURA SIGNIFICATIVA DE ONDA, PERÍODO DE ONDA E POTÊNCIA. ....	63
<b>FIGURA 5.31.</b> FREQUÊNCIA RELATIVA DA POTÊNCIA. A) MESES DE VERÃO B) MESES DE INVERNO C) TOTAL .....	64

<b>FIGURA 5.32.</b> REGIME MÉDIO MENSAL DA POTÊNCIA NO CONJUNTO FAIAL/PICO (2005-2014).....	65
<b>FIGURA 5.33.</b> REGIME MÉDIO MENSAL DA POTÊNCIA NO CONJUNTO S.JORGE/GRACIOSA (2005-2014).....	65
<b>FIGURA 5.34.</b> REGIME MÉDIO MENSAL DA POTÊNCIA NA ILHA TERCEIRA (2005-2014). .	65
<b>FIGURA 5.35.</b> DISTRIBUIÇÃO DA DIREÇÃO DE PICO DAS ONDAS EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. C) TOTAL .....	66
<b>FIGURA 5.36.</b> DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL MÉDIA DA POTÊNCIA EM CONJUNTO COM A DIREÇÃO DE PICO NO GRUPO OCIDENTAL. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. C)TOTAL .....	67
<b>FIGURA 5.37.</b> DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DOS PARÂMETROS DE ALTURA SIGNIFICATIVA DE ONDA, PERÍODO DE PICO E POTÊNCIA. ....	68
<b>FIGURA 5.38.</b> FREQUÊNCIA RELATIVA DA POTÊNCIA. A) MESES DE VERÃO B) MESES DE INVERNO C) TOTAL .....	69
<b>FIGURA 5.39.</b> REGIME MÉDIO MENSAL DA POTÊNCIA EM SÃO MIGUEL, GRUPO ORIENTAL (2005-2014).....	69
<b>FIGURA 5.40.</b> REGIME MÉDIO MENSAL DA POTÊNCIA EM SANTA MARIA, GRUPO ORIENTAL (2005-2014).....	70
<b>FIGURA 5.41.</b> DISTRIBUIÇÃO DA DIREÇÃO DE PICO DAS ONDAS EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. C) TOTAL .....	71
<b>FIGURA 5.42.</b> DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL MÉDIA DA POTÊNCIA EM CONJUNTO COM A DIREÇÃO DE PICO NO GRUPO ORIENTAL. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. C) TOTAL .....	72
<b>FIGURA 5.43.</b> DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DA ALTURA SIGNIFICATIVA, PERÍODO DE PICO E POTÊNCIA PARA O PONTO 1 DO PICO (10 METROS PROFUNDIDADE). ....	73
<b>FIGURA 5.44.</b> FREQUÊNCIA RELATIVA DA POTÊNCIA PARA OS REGIMES DE VERÃO E INVERNO. A) PROFUNDIDADE A 10 METROS. B) PROFUNDIDADE A 30 METROS. C) PROFUNDIDADE A 50 METROS. ....	74
<b>FIGURA 5.45.</b> REGIME MÉDIO MENSAL DA POTÊNCIA. A) PROFUNDIDADE A 10 METROS. B) PROFUNDIDADE A 30 METROS. C) PROFUNDIDADE A 50 METROS.....	75
<b>FIGURA 5.46.</b> DISTRIBUIÇÃO DA DIREÇÃO DE PICO DAS ONDAS EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA (VERÃO À ESQUERDA; INVERNO À DIREITA). A) PROFUNDIDADES A 50 METROS. B) PROFUNDIDADES A 30 METROS. C) PROFUNDIDADES A 10 METROS. ....	76
<b>FIGURA 5.47.</b> DIAGRAMA DE ISOLINHAS DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA ALTURA SIGNIFICATIVA E PERÍODO DE PICO PARA PROFUNDIDADES A 50 METROS. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO .....	77
<b>FIGURA 5.48.</b> DIAGRAMAS DE ISOLINHAS DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA ALTURA SIGNIFICATIVA E PERÍODO DE PICO PARA PROFUNDIDADES A 30 METROS. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. ....	78
<b>FIGURA 5.49.</b> DIAGRAMAS DE ISOLINHAS DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA ALTURA SIGNIFICATIVA E PERÍODO DE PICO PARA PROFUNDIDADES A 10 METROS. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO .....	79
<b>FIGURA 5.50.</b> DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL MÉDIA DA POTÊNCIA EM CONJUNTO COM A DIREÇÃO DE PICO NO PICO. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. ....	80

<b>FIGURA 5.51.</b> DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DA ALTURA SIGNIFICATIVA, PERÍODO DE PICO E POTÊNCIA PARA O PONTO 1 DE PONTA DELGADA (PROFUNDIDADES A 5 METROS)....	81
<b>FIGURA 5.52.</b> FREQUÊNCIA RELATIVA DA POTÊNCIA PARA OS REGIMES DE VERÃO E INVERNO. A) PROFUNDIDADES A 5 METROS. B) PROFUNDIDADES A 25 METROS. C) PROFUNDIDADES A 50 METROS. D) PROFUNDIDADES A 75 METROS. ....	82
<b>FIGURA 5.53.</b> REGIME MÉDIO MENSAL DA POTÊNCIA. A) PROFUNDIDADES A 5 METROS. B) PROFUNDIDADES A 25 METROS. C) PROFUNDIDADES A 50 METROS. D) PROFUNDIDADES A 75 METROS. ....	83
<b>FIGURA 5.54.</b> DISTRIBUIÇÃO DA DIREÇÃO DE PICO DAS ONDAS EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA. A) PROFUNDIDADES A 5 METROS. B) PROFUNDIDADES A 25 METROS. C) PROFUNDIDADES A 50 METROS. D) PROFUNDIDADES A 75 METROS. ....	85
<b>FIGURA 5.55.</b> DIAGRAMAS DE ISOLINHAS DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA ALTURA SIGNIFICATIVA E PERÍODO DE PICO PARA PROFUNDIDADES A 5 METROS. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. ....	86
<b>FIGURA 5.56.</b> DIAGRAMAS DE ISOLINHAS DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA ALTURA SIGNIFICATIVA E PERÍODO DE PICO PARA PROFUNDIDADES A 25 METROS. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. ....	87
<b>FIGURA 5.57.</b> DIAGRAMA DE ISOLINHAS DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA ALTURA SIGNIFICATIVA E PERÍODO DE PICO PARA PROFUNDIDADES A 50 METROS. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. ....	87
<b>FIGURA 5.58.</b> DIAGRAMA DE ISOLINHAS DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA ALTURA SIGNIFICATIVA E PERÍODO DE PICO PARA PROFUNDIDADES A 75 METROS. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. ....	88
<b>FIGURA 5.59.</b> DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL MÉDIA DA POTÊNCIA EM CONJUNTO COM A DIREÇÃO DE PICO EM PONTA DELGADA. A) MESES DE VERÃO. B) MESES DE INVERNO. ....	89
<b>FIGURA 6.1.</b> DISPONIBILIDADE ENERGÉTICA (MW/M) AO LONGO DOS DEZ ANOS PARA O GRUPO OCIDENTAL. ....	91
<b>FIGURA 6.2.</b> DISPONIBILIDADE ENERGÉTICA (MW/M) AO LONGO DOS 10 ANOS PARA O GRUPO CENTRAL.....	91
<b>FIGURA 6.3.</b> DISPONIBILIDADE ENERGÉTICA (MW/M) AO LONGO DOS 10 ANOS PARA O GRUPO ORIENTAL. ....	91
<b>FIGURA 6.4.</b> DISPONIBILIDADE ENERGÉTICA (GW/M) AO LONGO DOS 10 ANOS PARA O ARQUIPÉLAGO DOS AÇORES.....	92
<b>FIGURA 6.5.</b> MAPA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA POTÊNCIA PARA O ARQUIPÉLAGO DOS AÇORES.....	93

## ÍNDICES DE TABELAS

<b>TABELA 2.1.</b> VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS DISPOSITIVOS COSTEIROS.....	10
<b>TABELA 2.2.</b> VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS SISTEMAS DE 2ª E 3ª GERAÇÃO.....	15
<b>TABELA 4.1.</b> COORDENADAS DAS MALHAS UTILIZADAS NO MODELO SWAN. ....	33
<b>TABELA 6.1.</b> TOTAL DO RECURSO ENERGÉTICO AO FIM DE 10 ANOS.....	92
<b>TABELA 6.2.</b> LOCALIZAÇÃO DE POTENCIAIS ZONAS DE INTERESSE ENERGÉTICO. ....	94

## **1. Introdução**

### **1.1. Enquadramento Geral**

Atualmente, os desafios impostos pela necessidade de implementar políticas que assegurem um desenvolvimento sustentável são particularmente pertinentes no que diz respeito à energia, visto que, cada vez mais é necessário encontrar nas energias renováveis uma alternativa que seja fiável às formas convencionais de produção de energia elétrica, responsáveis por causar sérios danos ao meio ambiente. As obrigações legais impostas pelas diretivas comunitárias e pelo protocolo de Quioto reforçam esta necessidade.

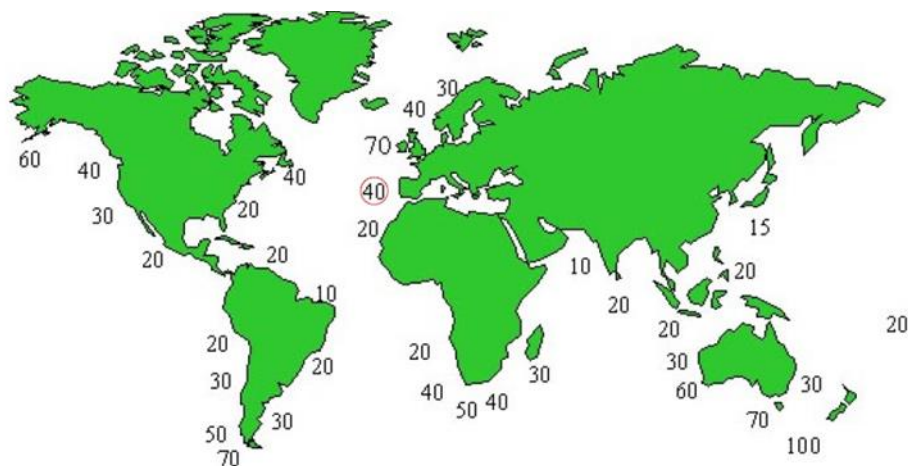
O desenvolvimento de tecnologias capazes de gerar eletricidade a partir de fontes de energia renovável é uma meta a atingir na atual sociedade. Das principais energias destacam-se: a eólica, solar e hidroelétrica. No entanto, nenhuma destas energias constitui uma solução única para fazer face à procura energética mundial, uma vez que estas possuem baixa densidade energética e são dependentes de recursos naturais. Assim sendo, a produção de energia renovável está sujeita à variabilidade do recurso, o que faz com seja urgente procurar outras alternativas (André, 2010).

Os oceanos, contendo o maior de todos os recursos naturais, albergam um potencial energético enorme, que pode contribuir de forma significativa para as necessidades crescentes de energia a um nível global (Cruz e Sarmiento, 2004). Note-se que a energia das ondas é um recurso ainda pouco utilizado face à energia do vento ou ainda a energia solar ou hidroelétrica.

A energia das ondas apresenta-se assim como particularmente atrativa para ilhas ou países com grandes faixas costeiras (Portugal é um exemplo), pelo que, após o choque petrolífero de 1973, países que satisfazem as condições geográficas necessárias e partilham as necessidades de importação de energia elegeram a energia das ondas como tema fundamental para investigação e desenvolvimento no âmbito de programas de carácter governamental. Como exemplos, refira-se os casos do Reino Unido, Noruega, Dinamarca, Suécia e Portugal, na Europa, os Estados Unidos da América na América do Norte e a China, Índia e Japão na Ásia.

O recurso global atribuído à energia das ondas ronda os 2 TW, sendo assim equiparável à potência elétrica média anual consumida mundialmente (Cruz e Sarmiento, 2004). Na Figura 1.1 apresenta-se o recurso energético das ondas para várias zonas do

globo, sendo o potencial energético de cada zona representado em kW por metro de frente de onda. Estes valores representam o fluxo médio anual de energia que atravessa cada metro de frente de onda e são variáveis, podendo atingir, em estados de tempestade, 1 MW/m. O recurso energético das ondas na Europa representa cerca de 16% do mundial, contabilizando assim 320 GW (Cruz e Sarmiento, 2004).



**Figura 1.1.** Distribuição do fluxo médio de energia das ondas no mundo em kW/m. (Cruz e Sarmiento, 2004).

A produção potencial de energia elétrica na costa portuguesa Atlântica é estimada admitindo um recurso de 30 kW por km de costa e que uma percentagem média de 15% da energia incidente pode ser convertida em energia. Tendo em conta os 335 km de costa para instalação de potenciais parques *offshore* e a necessidade de ter corredores para a navegação associada às pescas de cerca de 20% deste valor, resulta um potencial de utilização de mais do que 250 km da costa. O potencial de produção de energia elétrica associado a esta extensão sobre os 50 m de profundidade é de 10 TWh por ano, o que representa cerca de 20% do consumo de energia elétrica estimado pela ERSE (Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos) para 2010 (Wave Energy Centre, 2004).

Portugal é caracterizado por um fluxo médio anual de energia das ondas na ordem dos 30 kW/m a 40 kW/m em águas com profundidade igual ou superior a 50 m. O maior potencial de energia das ondas é encontrado no noroeste da costa portuguesa e no arquipélago dos Açores. Estima-se que o recurso total da energia das ondas em Portugal tenha um valor médio de aproximadamente 21 GW, distribuídos entre 15 GW para o continente e 6 GW para as Regiões Autónomas, o que faz da costa portuguesa uma das mais apetecíveis a nível mundial para a exploração energética.

O arquipélago dos Açores apresenta condições particularmente favoráveis para aproveitamento do recurso energético das ondas do Atlântico, pelo que entre 1986 e 1987 foram efetuados alguns estudos das potencialidades energéticas em algumas ilhas deste arquipélago de modo a identificar o (s) local (is) com maior potencial de ser implementado um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas. Estes mesmos estudos marcaram o início da aposta nas energias renováveis marinhas nos Açores, nomeadamente em Setembro de 1986 onde a EDA (Empresa de Eletricidade dos Açores) promoveu uma visita de prospeção às ilhas e a 30 de Setembro do mesmo ano com uma visita a Porto Cachorro - na costa Noroeste da ilha do Pico - contando com o apoio do INETI (Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação), IST (Instituto Superior Técnico) e da Universidade Heriot-Watt, Edimburgo (Escócia). Em 1987, através da EDA, IST, INETI e IH (Instituto Hidrográfico), foram efetuadas medições de ondas, levantamentos hidrográficos, levantamentos batimétricos e estudos preliminares para uma central CAO (Coluna de Água Oscilante) em Porto Cachorro, à qual entrou em funcionamento em 1999 (Falcão, 2005).

A implementação de sistemas de extração de energia nesta ilha de pequena dimensão (14850 habitantes) tem como vantagem o facto de estes sistemas poderem contribuir para a autonomia energética das comunidades locais em lugares onde o preço da energia convencional pode ser elevado. Além disso, estas zonas costeiras têm muitas vezes a particularidade de serem caracterizadas por elevados gradientes batimétricos, de modo que a transição de águas profundas para águas pouco profundas torna-se muito forte e, como consequência, as ondas propagam-se perto da costa sem se verificar a dissipação de energia (Rusu, 2012).

Após os primeiros passos no que diz respeito à iniciativa da inserção de tecnologia de aproveitamento da energia das ondas no Arquipélago dos Açores, a avaliação destas potencialidades energéticas já foi estudada por vários autores. Em Falcão (1987) procurou-se, principalmente, viabilizar estudos que permitissem a introdução de um dispositivo do tipo CAO em Porto Cachorro. Mais tarde em Mollison et al. (1992), efetuou-se um estudo para cinco ilhas das nove que compõem o arquipélago dos Açores: Faial, Pico, Terceira, São Miguel e Santa Maria. Este estudo teve como principal objetivo o levantamento de informação costeira com uma agitação marítima favorável, especialmente com vista à identificação de pequenas zonas adequadas à instalação de protótipos. Estes locais foram também escolhidos com o critério de serem zonas com potencial valor energético e estudados com ajuda de fotografias aéreas, conhecimento

local, gráficos e cartas geológicas. Ainda na década de 90, Portugal lidera a criação de atlas europeu de energia das ondas tal como se pode verificar em Pontes et al. (1996). Este atlas permitiu a caracterização não só da agitação marítima, mas também do potencial energético das ondas na Europa, providenciando assim uma base de dados que, no caso dos Açores, veio a tornar-se uma “ferramenta” útil para um melhor conhecimento do recurso energético da região.

Em Simões et al. (2010) efetuou-se um estudo do potencial energético em redor de todo o arquipélago mas, no entanto, o mesmo estudo reduziu-se apenas a dados relativos ao Verão e Inverno de 2008. Mais recentemente em Rusu et al. (2012) estudou-se o arquipélago dos Açores com recurso ao SWAN, onde se apresentaram resultados do potencial energético especificamente para a ilha de S. Jorge, Graciosa, Terceira, S. Miguel e Santa Maria, mas apenas para um intervalo de três meses de dados.

## **1.2. Objetivos e Metodologia**

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de energia das ondas ao redor das ilhas do Arquipélago dos Açores. Mais ainda, para as zonas de maior potencial energético e nas quais existam estruturas marítimas (por exemplo quebra-mares) pretende-se caracterizar, em maior detalhe, esse potencial energético. Note-se que a existência de estruturas marítimas potencia a inclusão de dispositivos de energia das ondas, se devidamente adaptadas.

Para esse efeito, é necessário primeiramente efetuar a caracterização da agitação marítima em redor de cada uma das 9 ilhas do Arquipélago dos Açores. Esta caracterização é efetuada recorrendo ao modelo espectral de geração e propagação de ondas em zonas costeiras, SWAN, (Booij et al., 1999, SWAN team, 2006). O modelo SWAN é um modelo não linear espectral, à escala regional, baseado na equação para a conservação da ação da onda, que permite a geração de ondas por vento e efetua a sua propagação considerando vários fenómenos intervenientes na propagação de ondas – refração, rebentação, difração (de forma aproximada), geração de harmónicas (interação não linear entre ondas) – sendo considerado adequado para grandes áreas costeiras (Sampaio, 2008).

Para facilitar os cálculos com o modelo SWAN e a análise dos resultados, decidiu-se dividir a zona de estudo, o Arquipélago dos Açores, em três zonas de cálculo: Grupo Oriental, Central e Ocidental. Assim, para cada uma das zonas, os cálculos com o modelo SWAN são efetuados para o período de tempo entre 2005 a 2014 (10 anos), sendo as condições de forçamento (ventos, ondas e nível de maré) do modelo SWAN fornecidas

pelo modelo numérico WAM (WAMDI Group, 1988). Os resultados do modelo SWAN, em termos de altura de onda significativa,  $H_s$ , período de pico,  $T_p$ , período médio,  $T_z$ , e direção média associada ao período de pico,  $\theta_p$ , foram obtidos para, pelo menos, 4 pontos em redor de cada uma das ilhas da zona em estudo, perfazendo um total de 45 pontos para o Arquipélago.

Com base nos resultados da agitação marítima do modelo SWAN, nesses pontos efetua-se a caracterização de regimes de agitação – de Verão, de Inverno e total dos dez anos. Efetua-se também o cálculo do potencial energético e constroem-se os mapas do potencial energético.

De forma mais detalhada, a metodologia seguida no presente trabalho foi:

- Divisão da zona de estudo, o Arquipélago dos Açores, em três zonas de cálculo: Grupo Ocidental que inclui as ilhas Flores e Corvo, Grupo Central, que engloba Terceira, Pico, Faial, Graciosa e São Jorge, e Grupo Oriental que engloba as ilhas de S. Miguel e Santa Maria.
- Utilização dos dados de agitação marítima para o período de 2005 a 2014, fornecidos pelo modelo WAM (WAMDI Group, 1988), dos campos de vento fornecidos pelo ECMWF (European Centre Medium-Range Weather Forecast), da batimetria fornecida pelo Instituto Hidrográfico e dos níveis de maré fornecidos pelo modelo Xtide (Flatter, 1998), para o período de 2005 a 2014, como condições de forçamento do modelo SWAN;
- Definição das malhas de cálculo do modelo SWAN e dos pontos em redor de cada uma das ilhas para obtenção dos resultados do modelo;
- Realização dos cálculos com o modelo SWAN, para o período de 10 anos;
- Obtenção dos valores da agitação marítima, em termos de altura significativa, período de pico e direção média de pico em cada um dos pontos pré-definidos em redor de cada ilha do Arquipélago;
- Caracterização do regime de agitação marítima (total, Inverno e Verão), com base nos valores obtidos anteriormente.
- Cálculo do potencial energético com base nos dados do SWAN e avaliação dos locais de maior potencial. É de salientar que para os locais de maior potencial energético e que contenham estruturas marítimas, é efetuada uma nova aplicação do modelo SWAN (quebra-mares do Porto Cachorro e de Ponta Delgada) com

uma malha de resolução mais fina para obtenção de resultados nesses locais específicos;

- Construção de mapas para avaliação das regiões de maior potencial de energia das ondas.

### **1.3. Estrutura do Relatório Final**

O presente estudo encontra-se estruturado em oito capítulos. No primeiro capítulo é efetuada uma breve exposição introdutória do tema de estudo, dos seus objetivos e da estrutura do relatório final. No segundo capítulo são caracterizados os dispositivos de conversão de energia das ondas, onde se apresentam os mais variados sistemas para várias profundidades, quer para a região portuguesa quer para outros locais internacionais. Também é dado ênfase aos pontos fortes e fracos de cada dispositivo, de modo que se possa ter uma noção da sua aplicação e funcionamento em zonas de maior interesse energético.

No terceiro capítulo descreve-se pormenorizadamente a metodologia empregue para a avaliação do potencial energético, que passa principalmente pela introdução e explicação dos modelos espectrais de onda utilizados, pela explicação do balanço de equação do balanço de ação e, por fim, pelas equações matemáticas utilizados para o cálculo da potência de onda.

No quarto capítulo são descritas as diferentes áreas de estudo e os respetivos pontos de cálculo. Segue a análise dos dados utilizados, incluindo informação sobre a agitação marítima fornecida pelo modelo WAM e sobre o nível do mar fornecido pelas boias ondógrafas. A modelação da agitação marítima pelo modelo SWAN é descrita, apresentando-se o domínio de cálculo, as condições de aplicação adotadas e os resultados obtidos. Por fim faz-se uma validação do modelo com base na comparação dos dados reais fornecidos pelas boias ondógrafos com os resultados obtidos no SWAN.

No quinto capítulo são apresentados os resultados do potencial energético sob a forma de gráficos, que têm como finalidade, ajudar a interpretar e perceber os padrões de energia ocorrentes em torno de cada uma das ilhas do Arquipélago dos Açores mas também em locais específicos, como o Porto Cachorro (central do Pico) ou o Porto de Ponta Delgada.

No sexto capítulo é feita a comparação do potencial energético entre o Grupo Ocidental, Central e Oriental, a avaliação dessa distribuição de energia das ondas pelo

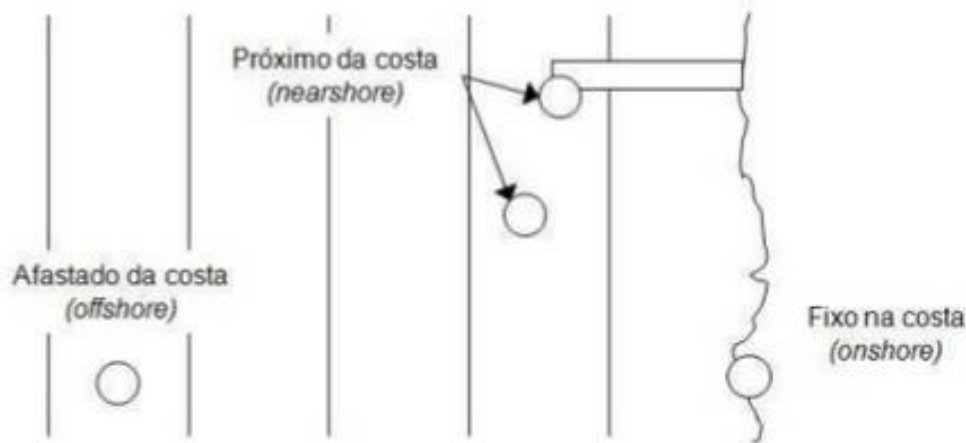
Arquipélago dos Açores e a localização de potenciais zonas de interesse onde, no futuro, se possa proceder à instalação de sistemas de aproveitamento da energia das ondas.

No sétimo capítulo são apresentadas as conclusões e recomendações para o presente estudo. Por fim, o estudo termina com o capítulo 8 onde são apresentadas as referências bibliográficas.

## 2. Dispositivos de Conversão de Energia das Ondas

### 2.1. Introdução

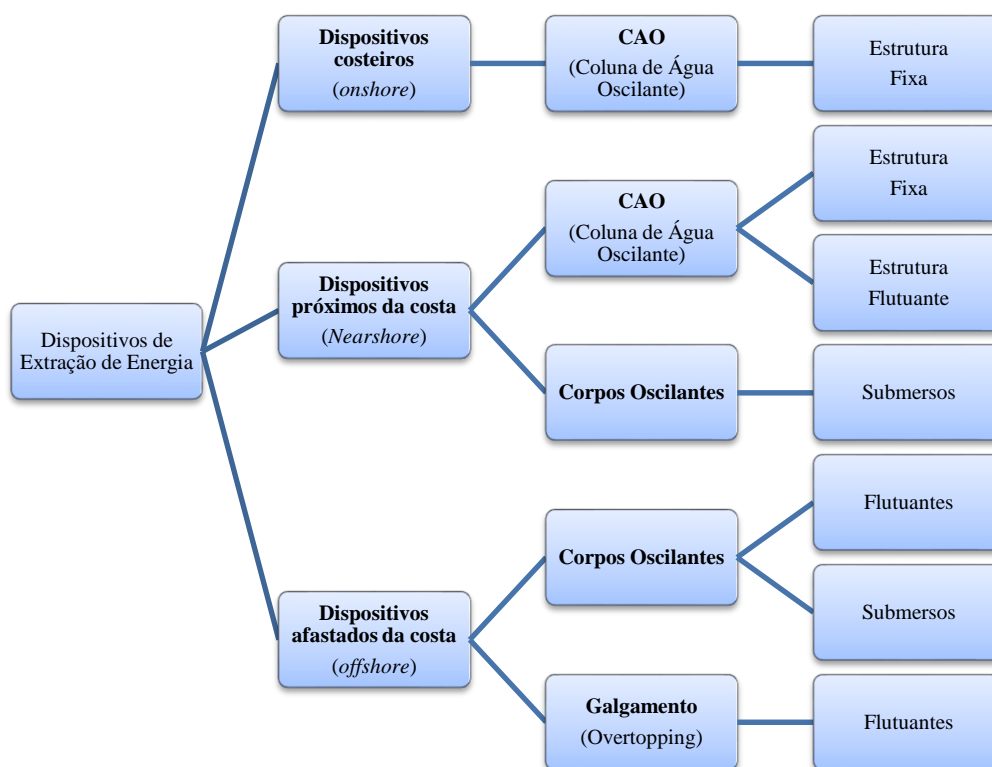
Ao longo de várias décadas, têm sido desenvolvidos diversos dispositivos de aproveitamento da energia das ondas do mar. Atualmente, devido a razões financeiras, de falta de conhecimento ou rentabilidade, esses dispositivos encontram-se em diferentes níveis de desenvolvimento. Estes dispositivos podem ser classificados em função do seu local de instalação. Deste modo, pode-se especificar 3 tipos de dispositivos: os dispositivos instalados sobre a costa (“*onshore*”), os dispositivos situados perto da costa ou em quebra-mares (“*nearshore*”), e os dispositivos instalados ao largo (“*offshore*”) (Figura 2.1) (WavEC, 2004).



**Figura 2.1.** Diagrama dos diferentes dispositivos de extração de energia. Adaptado de (Caldeira, 2014).

Esta classificação considera dois elementos importantes na classificação de um dispositivo. Primeiro, tem em conta a facilidade de instalação / acesso ao dispositivo, e segundo, considera as diferentes fases energéticas que uma onda possui desde a sua formação em alto mar, até à sua extinção na costa (Caldeira, 2014).

Para além da localização, outro critério importante para a classificação de dispositivos passa pelo princípio de funcionamento dos mesmos. Existem três concepções básicas de dispositivos utilizadas no aproveitamento da energia das ondas: Coluna de água oscilante (CAO), corpos oscilantes e dispositivos de galgamento, tal como se pode observar na Figura 2.2.



**Figura 2.2.** Diagrama dos diferentes dispositivos de extração de energia.

Em relação aos dispositivos costeiros destaca-se o sistema CAO (Coluna de Água Oscilante) que é, de todos os dispositivos de extração de energia das ondas do mar desenvolvidos até à atualidade, o mais investigado e o que apresenta melhores valores de rentabilidade numa relação potência/custo (WavEC, 2004). A experiência adquirida com o desenvolvimento e construção desta tecnologia, considerada de “1ª geração”, serviu de “rampa de lançamento” ao desenvolvimento das tecnologias de “2ª e 3ª geração” (Martins, 2009). Este sistema pode ser dividido em dois tipos: estrutura fixa e estrutura flutuante. Atualmente, dentro do sistema de estrutura fixa, existem duas centrais piloto deste tipo: a central LIMPET (500 kW) na Escócia e a central do Pico (400 kW) nos Açores (Figura 2.3).



**Figura 2.3.** Sistema coluna de água oscilante: Central LIMPET (esquerda) e Central do Pico (direita). Adaptado de (Martins, 2009 e Falcão, 2007).

Tal como em todas as tecnologias existem pontos fortes e pontos fracos. Na Tabela 2.1 é possível observar-se as vantagens e desvantagens dos dispositivos costeiros.

**Tabela 2.1.** Vantagens e desvantagens dos dispositivos costeiros.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Requerem uma tecnologia mais simples	Impactos ambientais (principalmente visuais)
Acesso de manutenção facilitada	Recurso energético é mais reduzido em relação ao largo, devido à dissipação da energia das ondas
Não apresentam condicionantes relacionados com o transporte de energia através de cabos elétricos submersos	Implementação do dispositivo apresenta limitações associadas a requisitos de profundidade de água e boa exposição
Não necessitam de sistemas de amarração	

Em relação aos dispositivos “*nearshore*” destacam-se os sistemas: CAO e Galgamento (“*overtopping*”). O conceito “*nearshore*” ou “próximo da costa” deve ser interpretado em termos da profundidade evidenciada em zonas mais ou menos afastadas da costa. Desta forma, os dispositivos do tipo CAO instalados em quebra-mares podem ser englobados nesta categoria, dado que um quebra-mar ou um molhe não constitui uma linha de costa natural. A incorporação de dispositivos nestas estruturas tem vantagens adicionais, pois elas já existem em muitos casos e uma estrutura adicional pode até reforçar o seu objetivo inicial (por exemplo proteção costeira) (Cruz e Sarmiento, 2004).

A central Mutriku (300 kW) (Figura 2.4), para além de ter sido o primeiro dispositivo de Coluna de Água Oscilante com um sistema de múltiplas turbinas a ser implementado num quebra-mar vertical, foi também o primeiro projeto comercial do mundo (Torre-Enciso, 2009).



**Figura 2.4.** Central Mutriku (País Basco). Adaptado de (Torre-Enciso, 2009).

Outros dispositivos de CAO em estruturas fixas têm sido instalados um pouco por todo o mundo, por exemplo: na Noruega (em Tofteshallen, 1985), no Japão (em Sakata, 1990) e na Índia (em Vizhinjam, em 1990) (Caldeira, 2014).

Outro dispositivo de Coluna de Água Oscilante conhecido na atualidade, do tipo estrutura flutuante, é a central Energetech, uma empresa australiana. Esta central conta com uma parede parabólica (Figura 2.5) que visa concentrar a energia proveniente das ondas. Em 2004 encontrava-se em fase de projeto, estando a sua instalação prevista para Port Kembla (80 Km a sul de Sydney) e conta com uma potência instalada de 300 kW. Ainda nesse ano, esta tecnologia ganhou um concurso (juntamente com o Pelamis, da Ocean Power Delivery) da British Columbia (BC) Hydro para o fornecimento de 4 MW de eletricidade a uma cidade canadiana (Cruz e Sarmiento, 2004).



**Figura 2.5.** Sistema de Coluna de Água Oscilante da Energetech. Adaptado de (Cruz e Sarmiento, 2004).

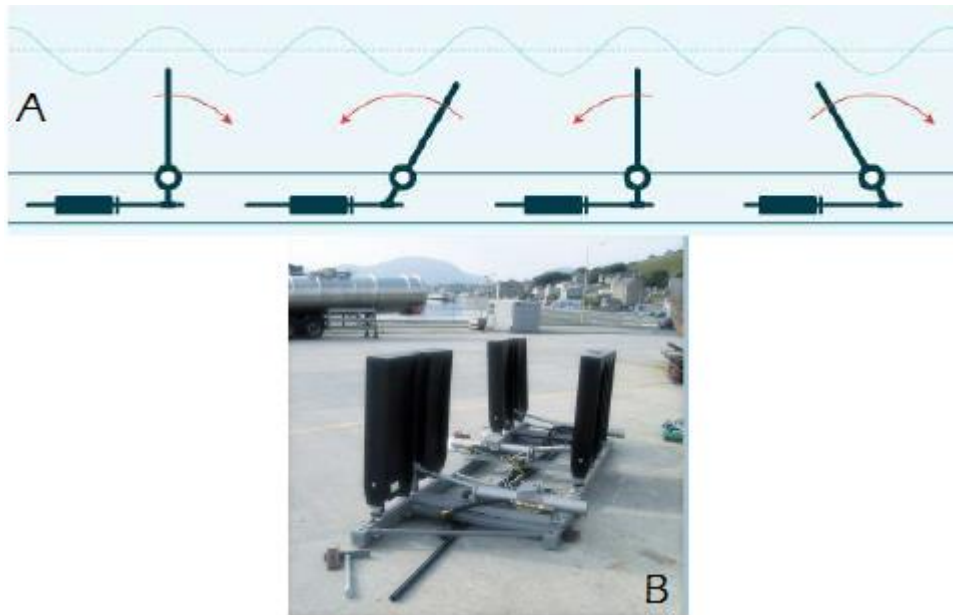
Ainda dentro da gama de dispositivos implementados em quebra-mares, em 2012 no Ceará (Brasil) foi financiado um projeto piloto (Figura 2.6) que viria a servir para analisar a sua viabilidade. Este dispositivo é constituído por dois braços mecânicos que suportam grandes boias numa das extremidades e efetuam um movimento ascendente e descendente com o movimento das ondas. Assim, o dispositivo que se encontra no interior

da central à beira-mar é acionado. A água doce é pressurizada para criar energia elétrica de forma parecida com a que é utilizada nas hidroelétricas. A diferença é que, ao invés de existir uma queda de água para girar turbinas, é esta água doce, pressurizada pelo movimento das ondas do mar, que oferece o movimento necessário para gerar energia. Este sistema de extração implementado num quebra-mar contém uma potência instalada de 50 kW. No entanto, atualmente, esta central encontra-se inativa, tendo em vista o retomar de operações em 2017 (Bluebird Marine Systems, 2014).



**Figura 2.6.** Central do Ceará (Brasil). Adaptado de (Bluebird Marine Systems, 2014).

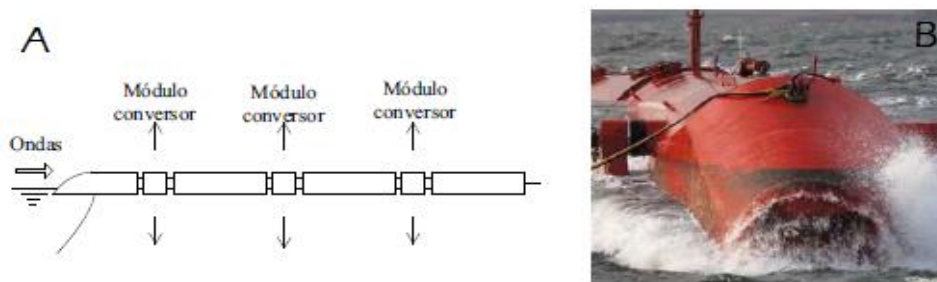
O sistema de Corpos Oscilantes também faz parte do tipo de dispositivos “*nearshore*”, como é o caso do Wave Roller (Figura 2.7). O dispositivo Wave Roller constitui uma placa ancorada ao fundo do mar através da sua parte inferior e é implementado perto da costa, a profundidades que rondam os 10-25 m. Nestas zonas com o aproximar da onda à costa, a intensidade de movimento das partículas de água intensifica-se, e assim, o Wave Roller pode aproveitar esse recurso energético. O movimento da placa, para a frente e para trás, resultante do movimento gerado pela onda, produz energia cinética que é absorvida por uma bomba pistão. Esta energia pode ser convertida em eletricidade através de um sistema hidráulico, constituído pela combinação motor/gerador (Martins, 2009).



**Figura 2.7.** Sistema conversor oscilante da onda, WaveRoller A – Esquema representativo; B – WaveRoller.

A última classe de sistemas de conversão de energia das ondas refere-se aos dispositivos “*offshore*”. É a tecnologia mais recente, daí estes dispositivos serem por vezes mencionados como sistemas de “3ª geração”, e aquela que mais permite beneficiar dos regimes de ondas mais energéticos, característicos de zonas de elevada profundidade. Estes dispositivos para conseguirem extrair o máximo de energia possível precisam de estar à (ou perto da) superfície, requerendo desta forma sistemas de amarração (flexíveis ou rígidos) e cabos submarinos para a transferência para terra da energia elétrica produzida. Os custos e as perdas associados a esta transferência são suplantados por uma maior geração de energia, aumentando desta forma a relação Energia Produzida/Custos Associados (Cruz e Sarmiento, 2004). Dentro da classe “*offshore*” inserem-se os dispositivos de Corpos Oscilantes e de Galgamento. Os dispositivos de Corpos Oscilantes podem dividir-se em dois sistemas: Flutuantes e Submersos.

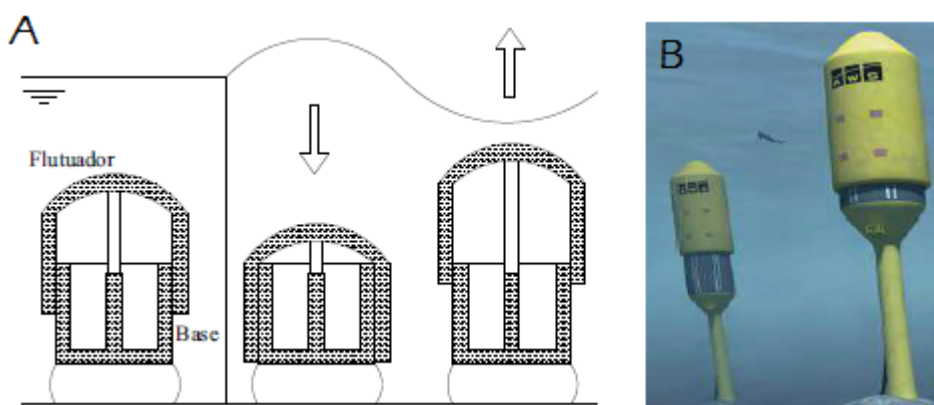
No sistema de dispositivos flutuantes pode-se mencionar o Pelamis (Figura 2.8).



**Figura 2.8.** Sistema atenuador, Pelamis. A – Esquema representativo; B – Pelamis. Adaptado de (Martins, 2010).

O Pelamis é uma estrutura semi-submersa, composta por secções cilíndricas, unidas por juntas articuladas onde se encontra um módulo de conversão de energia. Os movimentos induzidos pelas ondas são absorvidos por cilindros hidráulicos, que pressionam óleo. Dada a natureza do recurso (elevada disponibilidade energética), existem uns acumuladores que suavizam o circuito, até ao acionamento dos geradores elétricos que produzem a eletricidade. A energia convertida em cada uma das juntas é transferida à rede elétrica através de um único cabo, podendo vários dispositivos partilhar a mesma ligação.

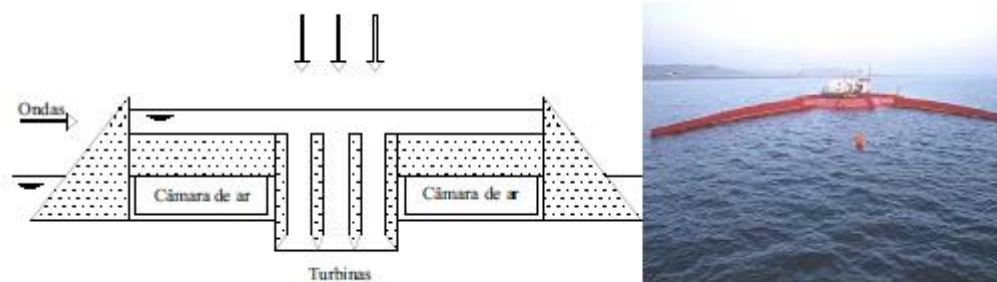
Outro dispositivo que se pode mencionar dentro do sistema de Corpos Oscilantes é o AWS (Archimedes Wave Swing) (Figura 2.9). Este dispositivo é um flutuador situado abaixo da superfície do mar, ancorado ao leito com um caule flexível e é implementado em profundidades que rondam os 40-80 m.



**Figura 2.9.** Sistema de diferença de pressão submersa, AWS. A – Esquema representativo; B – Imagem Virtual. Adaptado de (Martins, 2010).

Devido ao movimento do mar, o AWS expande e contrai em resposta às mudanças de pressão provocadas pela passagem das ondas. Este dispositivo é o único conversor de energia das ondas que trabalha alterando o seu volume. Um trabalho pioneiro foi iniciado no final dos anos oitenta. A gama de valores de potência produzida varia sensivelmente entre 1-2 MW (Martins, 2009).

Por fim, é apresentado o dispositivo Wave Dragon (Figura 2.10), que se insere nos sistemas de Galgamento. Com uma potência nominal que pode ir dos 4 aos 11 MW (consoante o clima de ondas) o Wave Dragon foi o primeiro dispositivo afastado da costa, em Junho de 2003, a fornecer energia numa rede elétrica, em Nissum Bredning, Dinamarca, através do teste de uma central piloto construída à escala de 1:4,5 (potência instalada de 20 kW).



**Figura 2.10.** Sistema de galgamento, Wave Dragon. Adaptado de (Martins, 2010).

O sistema consiste basicamente em dois refletores que focam as ondas incidentes para uma rampa, um reservatório que armazena a água que entretanto galgou a rampa e ainda num determinado número de turbinas de baixa queda, através das quais a energia elétrica é produzida. O Wave Dragon pode ser comparado a uma mini-hídrica flutuante, pois o seu princípio de funcionamento é em tudo semelhante ao de um aproveitamento hidroelétrico convencional (Cruz e Sarmiento, 2004).

Em suma, no que diz respeito aos dispositivos próximos da costa e “*offshore*” (ou dispositivos de “2ª e 3ª geração”), muitos deles continuam em fase de testes ou em desenvolvimento do seu potencial tecnológico. No entanto, apresentam algumas barreiras (Tabela 2.2) que atrasam a sua passagem para a fase de comercialização.

**Tabela 2.2.** Vantagens e desvantagens dos sistemas de 2ª e 3ª geração.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Recurso energético elevado	Dificuldades na manutenção
	Dificuldades no transporte da energia extraída para terra
	Dificuldades na ancoragem ao fundo do mar
	Necessidade de maior investimento

## 2.2. Caso de Portugal

A problemática associada à energia das ondas é particularmente pertinente no caso português. Portugal possui uma longa costa onde se desenvolvem ondas com elevado nível energético. Além disso apresenta uma forte dependência energética relativamente a outros países, o que impulsiona ainda mais a vontade de investir em energia renováveis que possam garantir um futuro promissor e sustentável.

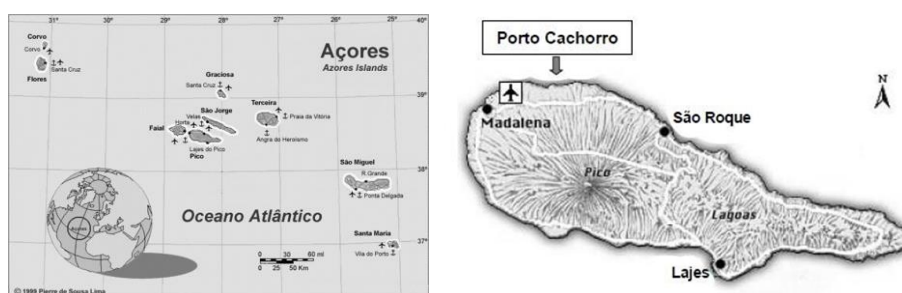
Assim, Portugal foi um dos países pioneiros a estudar este tema e tem ainda uma contribuição ativa no panorama internacional, facto que não deve ser encarado com

estranheza e que se encontra diretamente relacionado com as características energéticas das ondas da costa portuguesa (Cruz e Sarmiento, 2004).

A investigação em Portugal sobre a energia das ondas teve início em 1978 no Instituto Superior Técnico (IST), mais tarde (1983) com o apoio do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI) (Falcão, 2000).

No que toca à implementação de tecnologias de conversão da energias das ondas, o esforço conjunto do IST, INETI, entre outras entidades, tais como a EDP, EDA e a EFACEC, resultaram na construção da central piloto europeia (1999) da Ilha do Pico, Açores (Wave Energy Centre, 2004).

Em 1991, a Comissão Europeia (programa JOULE) iniciou uma série de ações preliminares de Energia das Ondas R&D. Uma dessas ações foi o estudo de uma Central Piloto Europeia (1992-1993), realizada por uma equipa internacional. O estudo identificou vários locais adequados para instalação de uma central piloto do tipo “*onshore*” em águas costeiras europeias. Um dos locais escolhidos foi Porto Cachorro da ilha do Pico, Açores (Figura 2.11). O local foi escolhido, principalmente devido à grande disponibilidade energética junto à costa norte do Pico, exposta à agitação marítima dominante com orientação de 330°N e que, em adição, oferece na linha de costa formações rochosas que proporcionam uma natural concentração de energia. Em 1993 e 1995, foram assinados contratos com a Comissão Europeia (programa Joule) para os estudos base, de conceção e construção de uma central piloto na ilha do Pico. A construção civil foi concluída no Verão de 1998 e os testes começaram em Agosto de 1999 (Falcão, 2000).



**Figura 2.11.** Arquipélago dos Açores (esquerda) e localização da central piloto CAO em Porto Cachorro – Ilha do Pico (direita). Adaptado de (Brito e Melo, 2000).

A central piloto europeia situada em Porto Cachorro, na ilha do Pico (Figura 2.11), é um dispositivo CAO (“*onshore*”) (Figura 2.12) com capacidade de 400 kW (Pontes, 2006). Este dispositivo é constituído por uma estrutura oca, em betão, formando uma câmara pneumática sobre uma superfície livre interior, que comunica com a atmosfera,

através de uma conduta contendo uma turbina de ar acoplada a um gerador elétrico, e com o mar exterior através de uma abertura submersa existente na parede frontal da câmara.



**Figura 2.12.** Central piloto CAO em Porto Cachorro – Ilha do Pico: zona traseira (esquerda) e zona frontal (direita)  
Adaptado de (Brito e Melo, 2000)

As ondas propagam-se para dentro da câmara através da abertura submersa, fazendo oscilar verticalmente a água no seu interior, e, conseqüentemente, um fluxo de ar em sentidos alternados através da conduta que liga à atmosfera, aciona a turbina de ar e o gerador elétrico que lhe está acoplado (Figura 2.13).



**Figura 2.13.** Esquema da central piloto em Porto Cachorro: exterior (esquerda) e interior (direita). Esquerda: 1 – Onda incidente; 2 – Coluna de água; 3 – Câmara pneumática; 4 – Válvula de alívio; 5 – Válvula de isolamento; 6 – Válvula de manobra; 7 – Turbina wells; 8 – Gerador assíncrono; Direita: 1 – Conduta da turbina; 2 – Turbina com estatores; 3 – Gerador elétrico; 4 – Pás diretrizes. Adaptado de (Neumann, 2011).

Para evitar sobrecargas na turbina e eventos de perda, existe uma válvula de alívio cuja posição pode ser variada entre 0% e 100% abertura, conforme o estado do mar. O gerador ligado à turbina transforma a força rotativa em energia elétrica, que é enviada para a rede local da EDA através do conversor e dois transformadores colocados nos contentores a 100 m da central.

Depois de ter ficado sem utilização durante um período de vários anos após o seu primeiro arranque em 1999, a central piloto europeia CAO sobre a ilha do Pico foi reativada em 2005. A central piloto é operada pelo Centro da Energia das Ondas - WavEC – a partir de 2004 (Brito e Melo et al., 2007).

Durante o ano de 2010, as dificuldades técnicas de menor importância atrasaram toda a operação da central, mas aos poucos a implementação de um controle remoto da central foi concluída. Depois de testes bem-sucedidos com a operação autônoma da central no período de Setembro a Dezembro de 2010, a produção total anual de 45 MWh foi alcançada em 1450 horas de operação.

Desde então, outros dispositivos têm sido implementados ao longo da costa portuguesa. Em 2004 foram realizados os primeiros testes do sistema AWS (“*offshore*”) (Figura 2.14), ao largo da Póvoa do Varzim, Portugal.



**Figura 2.14.** Central AWS, ao largo da Póvoa do Varzim. Adaptado de (Brito e Melo, 2010)

No entanto, esta central piloto com uma potência nominal de 2 MW, diâmetro de 9.5 m e altura de 30-40 m ficou coberta de água neste mesmo local (Martins, 2009), levando a que os responsáveis pelo projeto, após duas tentativas falhadas, desenvolvessem uma estrutura de suporte do dispositivo que permitisse o correto funcionamento do dispositivo (Cruz e Sarmiento, 2004).

Em 2007, em Peniche foi instalado um primeiro exemplar de um dispositivo de aproveitamento das ondas, o WaveRoller (“*nearshore*”) (Figura 2.15). Após o sucesso da primeira instalação foi instalado no mesmo local, em 2008, outro dispositivo WaveRoller.



**Figura 2.15.** WaveRoller em Peniche. Adaptado de (Brito e Melo, 2010).

Cada um destes dispositivos contém uma potência de cerca de 10-13 kW e dimensões de 3x5 m<sup>2</sup> (Martins, 2009).

Em 2008 foi instalado, ao largo da Póvoa do Varzim (Portugal), o primeiro parque comercial Pelamis (“*offshore*”) (Figura 2.16) do mundo (três dispositivos de 150 m cada um), com capacidade de fornecimento de 2.25 MW (suficiente para cerca de 450 casas) (Martins, 2009).



**Figura 2.16.** Sistema atenuador, Pelamis, em Aguçadora. Adaptado de (Brito e Melo, 2010).

Contudo, atualmente em Portugal, o único dispositivo de conversão de energia das ondas em funcionamento é precisamente o sistema CAO (“*onshore*”) situado na ilha do Pico, Açores.

### 3. Metodologia

#### 3.1. SWAN

##### 3.1.1. Descrição do Modelo

O modelo SWAN (Booji et al., 1999) é um modelo não linear espectral, à escala regional, baseado na equação para a conservação da ação da onda, que permite a geração de ondas por vento e efetua a sua propagação das onda em zonas costeiras considerando vários fenómenos intervenientes na propagação de ondas – refração, rebentação, difração (de forma aproximada), geração de harmónicas (interação não linear entre ondas) – sendo considerado adequado para grandes áreas costeiras (Sampaio, 2008).

Para o funcionamento deste modelo é necessária a definição de uma grelha computacional associada a uma grelha batimétrica (Figura 3.1) e de um conjunto de parâmetros intrínsecos ao modelo SWAN e às formulações que se pretende considerar em cada uma das aplicações numéricas.

Associadas a estas grelhas e parâmetros definem-se ainda as condições de fronteira que poderão resultar do acoplamento com modelos de águas profundas tais como o WAM (WAMDI Group, 1988) ou o WaveWatch III (Tolman, 1999) que operam a uma escala oceânica. É ainda considerada a hipótese de implementação de um sistema de malhas encaixadas, no qual as malhas exteriores, de menor resolução, servem de condição de fronteira para as malhas interiores. Desta forma, é possível obter melhores resultados na malha interior, poupando também tempo de computação, em comparação com uma corrida de apenas uma malha de alta resolução em todo o domínio.

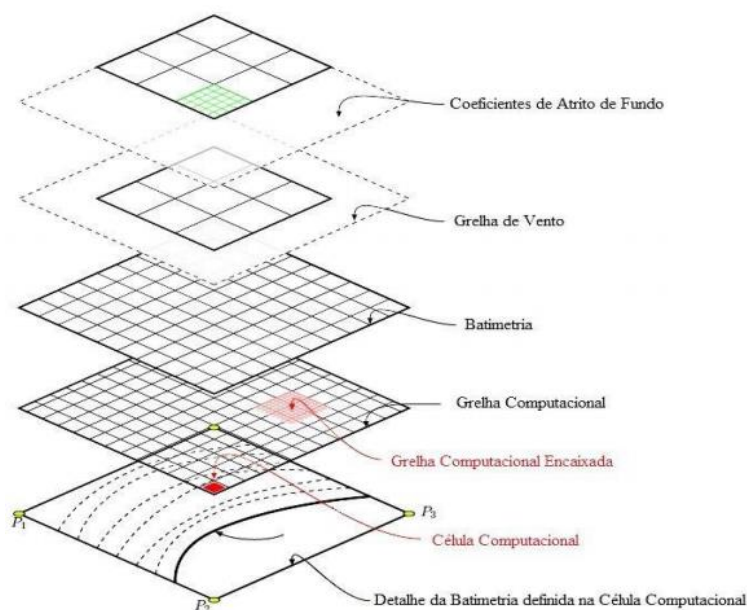


Figura 3.1. Ilustração das várias grelhas de entrada no SWAN.

Os dados necessários para a execução do SWAN são o arquivo da malha e os parâmetros de cálculo do modelo. Estes estão relacionados com as condições de fronteira, a definição do domínio geográfico, espectral e temporal, caso se introduza o sistema não-estacionário, os fenômenos físicos a introduzir e o tipo de saída de dados que se encontram descritos corretamente no manual do SWAN (Booij et al., 1999). De entre os vários resultados obtidos pelo SWAN, destacam-se a altura significativa, os períodos de pico e médio, as direções de pico e média, e o espalhamento direcional.

### 3.1.2. Equação do Balanço de Ação

As ondas são computadas através da evolução do espectro de densidade de ação no plano bidimensional, representada pela Equação do Balanço da densidade da ação Espectral:

$$\frac{\partial N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial c_{\theta} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial \theta} + \frac{\partial c_{\sigma} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial \sigma} = \frac{S(\sigma, \theta; x, y, t)}{\sigma} \quad \text{Equação 3.1}$$

Nesta equação utiliza-se a densidade de ação  $N(\vec{x}, t, \sigma, \theta)$  no espaço  $\vec{x}$  e no tempo  $t$ , em vez da densidade espectral de energia  $E$ , já que esta última não se conserva ao longo da propagação de energia entre ondas e correntes. A densidade de ação da onda é dada por

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad \text{Equação 3.2}$$

onde  $\sigma$  é a frequência relativa (intrínseca) e  $\theta$  a direção de onda.

Relativamente à equação (3.1), o 1º termo do lado esquerdo da equação representa a taxa local de variação da ação da densidade no tempo. O segundo e terceiro termos representam a propagação da densidade de ação no espaço geográfico (em que  $c_x$  e  $c_y$  são a velocidade de propagação em  $x$  e  $y$  respetivamente). O quarto termo diz respeito à variação da frequência relativa (angular) devido a variações nas profundidades e nas correntes (com  $c_{\sigma}$  a corresponder à velocidade de propagação no domínio da frequência relativa  $\sigma$ ). O quinto termo representa a refração, induzida pela variação da profundidade e pelo efeito das correntes, com  $c_{\theta}$  a corresponder à velocidade no espaço espectral  $\theta$  (direção de onda).

Do lado direito da equação,  $S$  é o termo inicial no que diz respeito à densidade de energia que representa os efeitos de geração (pelo vento  $S_{in}$ ), dissipação (por rebentação

$S_{ds,w}$ ; atrito de fundo  $S_{ds,b}$  e rebentação da onda induzida pela profundidade  $S_{ds,br}$ ) e interações não lineares entre ondas (quadrupletos  $S_{nl4}$  e tríades  $S_{nl3}$ ):

$$S = S_{in} + S_{ds,w} + S_{nl} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad \text{Equação 3.3}$$

A equação 3.1 é implementada no SWAN com um esquema de diferenças finitas em cinco dimensões: tempo, espaço geográfico (direções x e y) e espaço espectral (frequência e direção). Modelos espectrais como o WAM e o WaveWatch III consideram, de forma geral, problemas não-estacionários em escalas oceânicas, enquanto no SWAN a propagação é, geralmente, efetuada desde zonas de águas profundas até próximo da zona de rebentação.

A solução em modo estacionário, com a eliminação do primeiro termo do lado esquerdo na equação 3.1, é alcançada através de uma série de iterações. Cada passo de propagação para cada ponto da grelha é computado dividindo o espaço direcional em 4 quadrantes. A propagação dessas componentes é denominada *sweep* (variação de 1 a 4), onde a rotação de 90° aplicada a cada quadrante torna possível determinar a propagação da energia em todas as direções.

A computação é terminada indicando convergência quando entre iterações sucessivas o valor da altura significativa varia menos de 10% em pelo menos 90% dos pontos de grelha. Enquanto esse valor não é atingido, o modelo continua a repetir as suas iterações até que um número máximo, previamente estipulado, seja alcançado podendo ocorrer ou não a convergência nos resultados.

### 3.1.3. Procedimentos de Pré e Pós-processamento

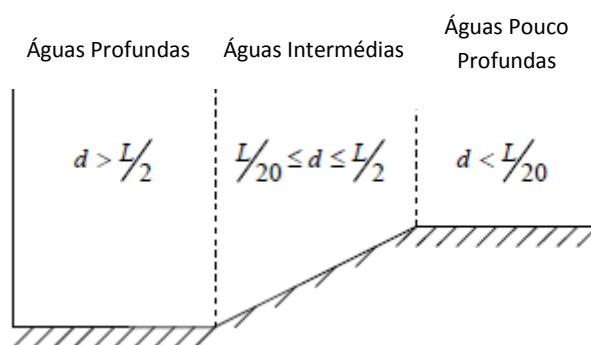
O modelo SWAN não possui qualquer interface gráfica grátis ao dispor dos seus utilizadores para o pré- e pós-processamento, pelo que é essencial a organização e sistematização eficaz de construção dos ficheiros de entrada do SWAN assim como do pós-processamento dos ficheiros de saída, principalmente quando tal envolve cálculos de longas séries temporais.

A realização manual destes ficheiros de entrada do modelo, bem como o processamento posterior dos ficheiros de saída, irá corresponder a um trabalho extremamente demorado e repetitivo. Tal aspeto é contornado através da geração destes ficheiros de entrada com o pacote de *software* SOPRO (Pinheiro et al., 2007). Este corresponde a um programa de interface gráfica criado especificamente para o modelo SWAN (e outros) e desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Através

desta interface gráfica é possível a entrada da batimetria, definição das grelhas de cálculo computacional, introdução do campo de ventos e agitação ao largo, sendo que permite ainda a definição dos pontos onde se pretende obter os parâmetros das ondas calculadas, em resumo de todos os ficheiros de entrada do modelo. Por outro lado também permite o pós-processamento automático dos resultados do SWAN.

### 3.2. Potencial Energético

Para o cálculo da potência, é importante definir em primeiro lugar em que condições se efetua a propagação de ondas, i.e. se em grandes, intermédias ou pequenas profundidades. Tal permitirá calcular a celeridade da onda ou a celeridade de grupo, um dos parâmetros necessários ao cálculo da potência de energia. Admitindo a teoria linear, na Figura 3.2 é possível observar-se os limites de transição para as diferentes profundidades.



**Figura 3.2.** Limites de transição entre águas profundas e águas superficiais. Adaptado de (Pereira, 2008).

Ainda tendo em conta a teoria linear, é permitido chegar a um conjunto de equações para os seguintes parâmetros na situação de águas profundas, intermédia e pequena profundidade.

As expressões obtidas para águas profundas são:

- Comprimento de onda ( $L$ ):

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad \text{Equação 3.4}$$

- Celeridade de onda ( $C$ ):

$$C = \frac{gT}{2\pi} \quad \text{Equação 3.5}$$

- Celeridade de grupo ( $C_g$ ):

$$C_g = \frac{1}{2} C \quad \text{Equação 3.6}$$

Para águas intermédias ou zonas de transição, as expressões obtidas são:

- Comprimento de onda ( $L$ ):

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} * \tanh\left(\frac{2\pi d}{L_0}\right) \quad \text{Equação 3.7}$$

- Celeridade de onda ( $C$ ):

$$C = \frac{gT}{2\pi} * \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad \text{Equação 3.8}$$

- Celeridade de grupo ( $C_g$ ):

$$C_g = \frac{1}{2} * \left(1 + \frac{\frac{4\pi d}{L}}{\sinh\frac{4\pi d}{L}}\right) * C \quad \text{Equação 3.9}$$

No que diz respeito a águas pouco profundas, utilizaram-se as equações para os seguintes parâmetros:

- Comprimento de onda ( $L$ ):

$$L = T\sqrt{gd} \quad \text{Equação 3.10}$$

- Celeridade de onda ( $C$ ):

$$C = \sqrt{gd} \quad \text{Equação 3.11}$$

- Celeridade de grupo ( $C_g$ ):

$$C_g = C \quad \text{Equação 3.12}$$

Em águas profundas, as ondas propagam-se mais rapidamente que em águas de baixa profundidade. Esta afirmação pode ser justificada pela equação 3.7, onde observa-se que as ondas de maior  $T$  propagam-se com maior celeridade. Quer isto dizer que, quando um grupo de ondas está a viajar para fora da sua zona de geração, as ondas de maior período vão viajar mais rapidamente que as ondas de período mais curto, o que origina a separação do grupo de ondas baseada no  $T$  destas.

Outro dos parâmetros utilizados para o cálculo do potencial é a energia da onda ( $E$ ), ou seja, a energia transportada por unidade de superfície por uma onda ao propagar-se é:

$$E = \frac{1}{8} * \rho g H^2 \quad \text{Equação 3.13}$$

Tendo em conta as equações 3.9 e 3.13, pode-se então proceder ao cálculo final da potência:

$$P = E * C_g \quad \text{Equação 3.14}$$

## 4. Caso de Estudo

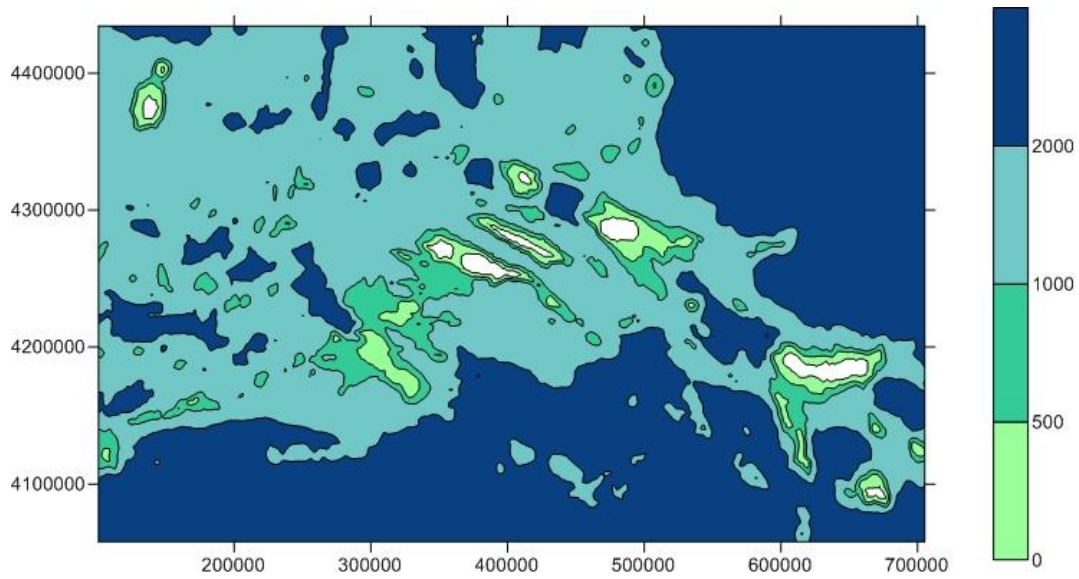
### 4.1. Enquadramento Geográfico

O arquipélago dos Açores encontra-se situado no Atlântico Norte, a cerca de 1500 km de Portugal e 3750 km da América do Norte. É composto por nove ilhas dispersas ao longo de 600 km de oceano que se distribuem naturalmente por três grupos distintos: O Grupo Ocidental, composto pelas Flores e Corvo; o Grupo Central onde se incluem o Faial, Pico, São Jorge, Graciosa e Terceira; e o Grupo Oriental, com Santa Maria e São Miguel (Figura 4.1).



Figura 4.1. Localização das áreas de estudo.

As ilhas, que ocupam uma área global de 2333 km<sup>2</sup>, emergem da denominada *Plateau* dos Açores, uma extensa elevação submarina de forma aproximadamente triangular, definida pela curva batimétrica dos 2000 metros, conforme se pode observar na Figura 4.2 na zona coberta a verde. As profundidades registadas na plataforma não variam regularmente, ocorrendo, ao invés, alternâncias de elevações e depressões, grandes escarpas retilíneas, vertentes curvas, vales profundos, entre outros. As áreas emersas representam uma extensão muito reduzida relativamente à área total da plataforma (estimada em cerca de 400 000 km<sup>2</sup>).

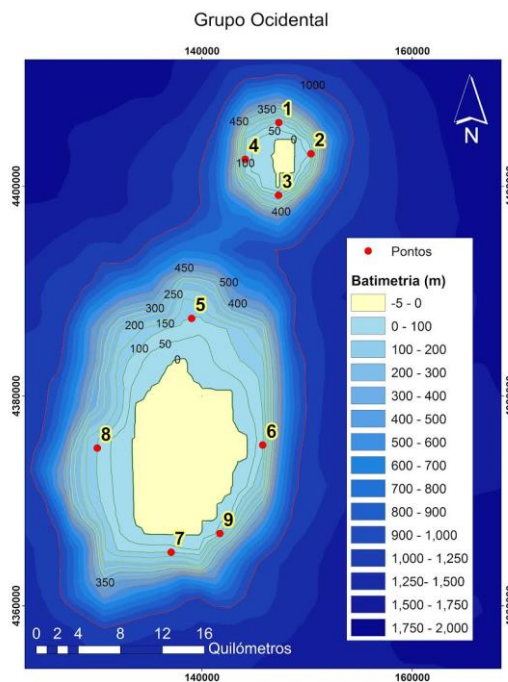


**Figura 4.2.** Batimétrica dos 500, 1000 e 2000 m do Arquipélago dos Açores. Adaptado de Surfer 9.0.

## 4.2. Dados Disponíveis

### 4.2.1. Batimetrias e Ventos

A batimetria do arquipélago dos Açores, nomeadamente para os grupos Ocidental, Central e Oriental, foi obtida com base na informação fornecida pelo Instituto Hidrográfico da Marinha Portuguesa e foi ilustrada com o auxílio do *software* comercial ArcGIS 10.2 (Figura 4.3, Figura 4.4 e Figura 4.5). Os pontos de cálculo podem também ser observados abaixo.



**Figura 4.3.** Representação espacial dos pontos de cálculo, em conjunto com a batimetria, no Grupo Ocidental.

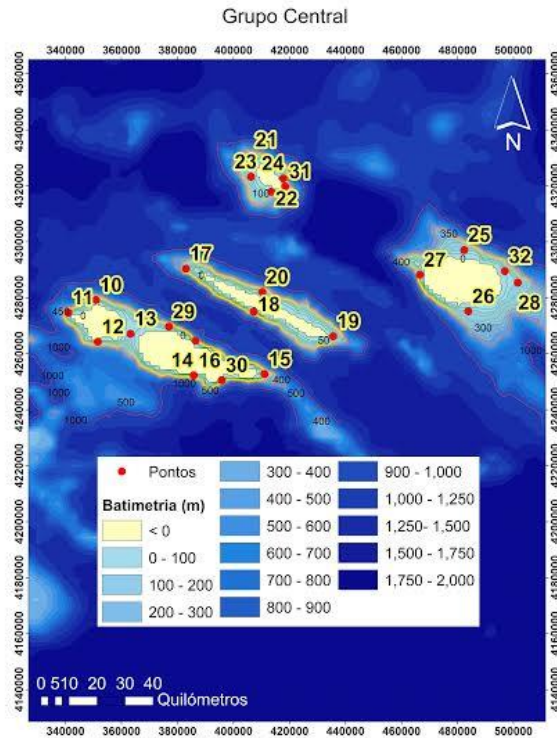


Figura 4.4. Representação espacial dos pontos de cálculo, em conjunto com a batimetria, do Grupo Central.

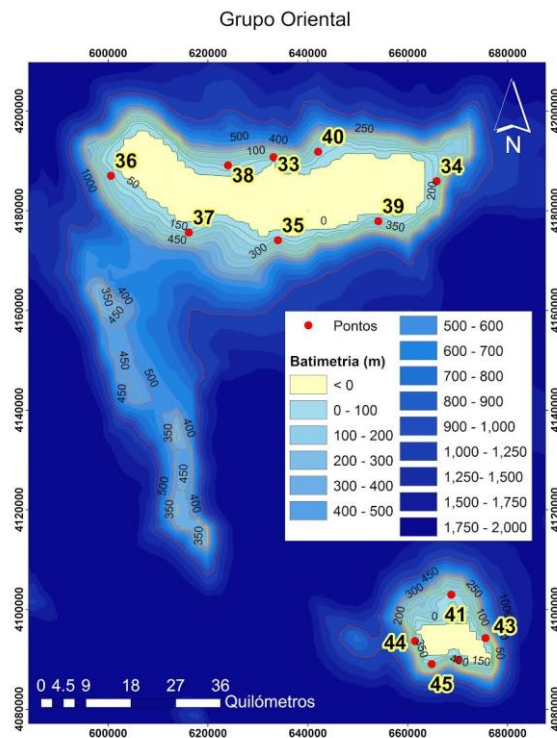


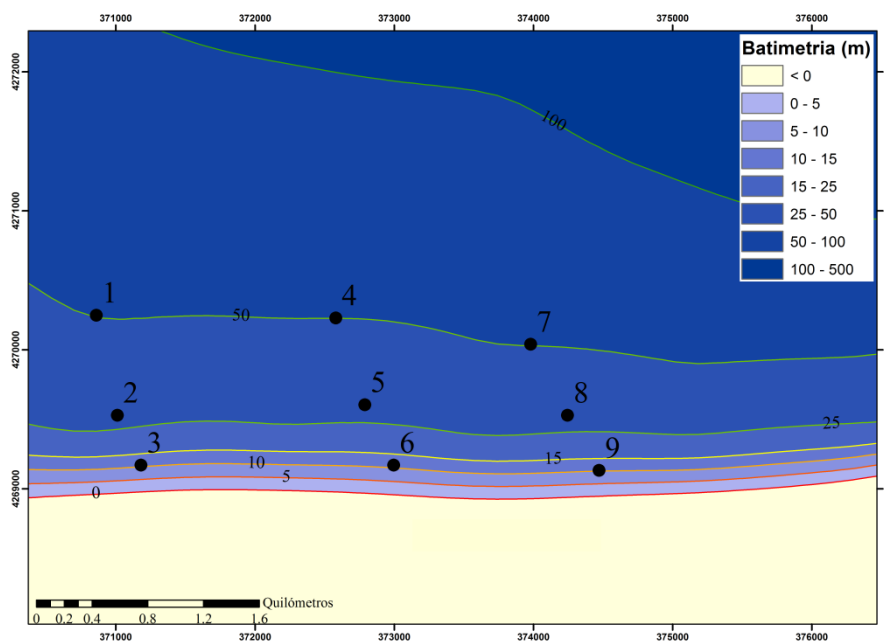
Figura 4.5. Representação espacial dos pontos de cálculo, em conjunto com a batimetria, no Grupo Oriental.

Os pontos escolhidos para a caracterização da agitação marítima situam-se na batimétrica dos 100 m. Estes pontos foram distribuídos em redor de cada ilha, pelos quatro quadrantes principais (Norte, Sul, Este e Oeste). Como estes pontos se encontram distribuídos pelos quatro quadrantes, é possível uma melhor caracterização das

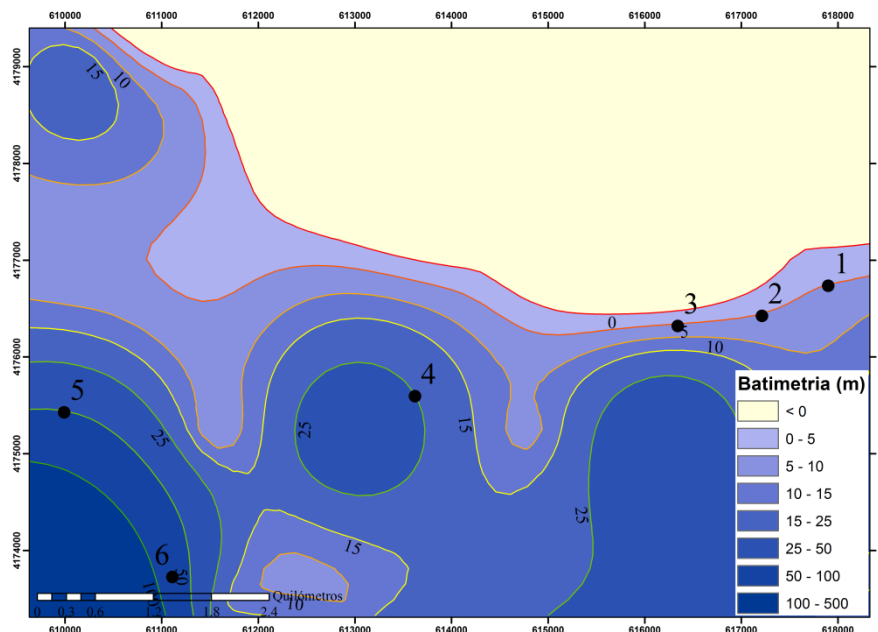
características da agitação marítima e conseqüente potencial energético nestas zonas costeiras e nas zonas de transição em cada uma das ilhas estudadas.

É possível também observar na Figura 4.3, na Figura 4.4 e na Figura 4.5 que as distâncias entre as várias linhas batimétricas são muito curtas, e que este aspeto pode desenrolar um papel decisivo não só no comportamento das ondas, mas também na distribuição do potencial energético na passagem de águas profundas para águas menos, tal como já foi mencionado na introdução.

Colocaram-se também alguns pontos em frente a estruturas portuárias de maior importância, como a zona de porto Cachorro, Figura 4.6, ou o porto de Ponta Delgada, Figura 4.7, por exemplo. No que diz respeito aos pontos de cálculo para a representação do potencial energético em Porto Cachorro (Pico), foram escolhidas batimétricas de 10, 20 e 30 metros (Figura 4.6), constituindo assim uma área ao largo da Central do Pico. Os pontos de cálculo para o Porto de Ponta Delgada, encontram-se a profundidades de 5, 25, 50 e 75 metros (Figura 4.7).



**Figura 4.6.** Representação espacial dos pontos de cálculo, em conjunto com a batimetria, ao largo de Porto Cachorro (Pico).



**Figura 4.7.** Representação espacial dos pontos de cálculo ao largo de Ponta Delgada.

A importância da caracterização do regime de ventos decorre não só da sua importância na transferência de energia para as ondas mas também da sua influência da circulação hidrodinâmica na zona através da geração de correntes induzidas pela ação direta do vento sobre a superfície livre ou de sobrelevação do nível médio (Faria, 2009).

Relativamente ao campo de ventos utilizado para o estudo, estes foram fornecidos pelo ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast) com uma resolução de  $0.25^\circ$  e posteriormente tratados e organizados em ficheiros com extensão \*.txt para servirem de entrada no modelo utilizado.

#### 4.2.2. Dados de Boia Ondógrafo

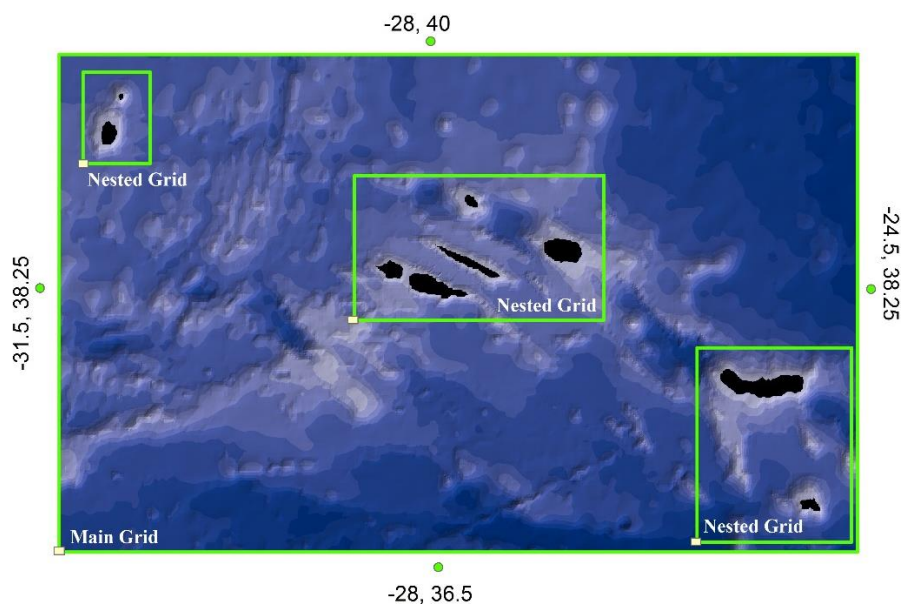
As boias do Arquipélago dos Açores são operadas pela Universidade dos Açores. Esta Universidade, associada ao Observatório do Ambiente dos Açores e ao Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa, criaram o projeto CLIMAAT (Clima e Meteorologia dos Arquipélagos Atlânticos) (Azevedo et al., 2008), que permitiu a disponibilização de um sistema integrado de monitorização de dados meteo-oceanográficos, com implantação de um conjunto de boias ondógrafas direcionais *Datawell* no Arquipélago dos Açores (Rodrigues, 2014).

Com base nas medições efetuadas por estes aparelhos, é possível extrair vários parâmetros de onda tais como: altura de onda significativa ( $H_s$ ), altura de onda máxima ( $H_{m\acute{a}x}$ ), período médio ( $T_z$ ), período de pico ( $T_p$ ), direção média de propagação das ondas ( $\theta_m$ ) e direção de pico ( $\theta_p$ ). Tendo em conta o tema de estudo, os parâmetros

utilizados para a caracterização da agitação marítima e cálculo do potencial energético foram:  $H_s$ ,  $T_p$  e  $\theta_p$ .

#### 4.2.3. Dados de Agitação Marítima do WAM

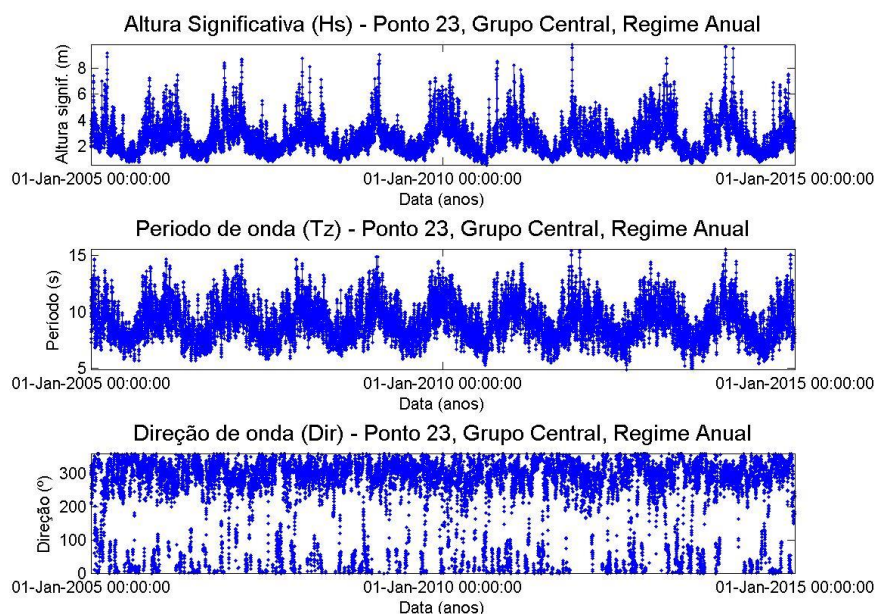
O modelo de terceira geração WAM (WAMDI Group, 1988) permite efetuar a estimação de valores de altura de onda, período e direção em vários pontos ao largo das nove ilhas que compõem o Arquipélago dos Açores. A Figura 4.8 permite observar os pontos da grelha do modelo no WAM para os quais são obtidos os valores acima referidos.



**Figura 4.8.** Representação espacial dos pontos utilizados no WAM.

Estes dados são definidos pelos valores para  $H_s$  (altura significativa da onda),  $T_z$  (período médio da onda) e  $\theta_m$  (direção média de propagação das ondas), para o período de 1 de Janeiro de 2005 a 30 de Dezembro de 2014, com intervalos de 6 horas. São estes valores que constituirão as condições de fronteira do modelo SWAN.

A Figura 4.9 apresenta um exemplo dos valores que constituem as condições de fronteira do modelo SWAN. Desta forma, é representada a distribuição temporal dos parâmetros de altura de onda significativa, período médio e direção média, ao longo dos dez anos, para o ponto 14 do grupo Central.



**Figura 4.9.** Distribuição temporal dos parâmetros de altura de onda significativa, período médio e direção média, ao longo dos 10 anos, para o ponto 23 (Figura 4.4) do Grupo Central.

Estes dados foram obtidos através de uma aplicação de *download* automático, desenvolvida por Poseiro (2013).

#### 4.2.4. Dados de Maré e Nível do mar

Os dados de maré são importantes no que diz respeito à medição de altura da onda. O nível do mar varia consoante a maré astronómica. Esta é estimada com base em análises harmónicas de séries de observações maregráficas de duração variável e podem ser obtidas facilmente a partir do *software* Xtide (Flatter, 1998). O nível médio do mar varia adicionalmente com as condições meteorológicas, como é o caso da sobrelevação meteorológica (*storm surge*), que consiste numa subida temporária do nível do mar devido à variação no campo de pressões atmosférica ou ação de ventos fortes e prolongados (Dias e Taborda, 1992). Deve-se também referir que o valor desta sobrelevação varia ao longo do tempo e consoante o local.

Existem duas formas diferentes de obter a informação do nível médio do mar, em que a primeira tem base nas leituras de maregrafos (instrumentos que possibilitam a medição da variação do nível das águas num determinado local), que incluem a maré astronómica e a sobrelevação meteorológica; a segunda forma passa pela previsão da maré astronómica, à qual tem de se adicionar a previsão da sobrelevação meteorológica (Rodrigues, 2014).

Assim sendo, os valores de nível de maré utilizados neste trabalho tem por base os resultados do *software* Xtide (Flatter, 1998), que fornece os dados da maré astronómica obtidos através de séries harmónicas que são ajustadas a cada local.

### 4.3. Condições de Aplicação do Modelo SWAN

#### 4.3.1. Domínio de Cálculo

O domínio de cálculo é constituído por duas malhas regulares encaixadas, aplicadas aos diferentes locais de estudo, com diferentes resoluções. Na Tabela 4.1 pode-se observar todas malhas exteriores e interiores utilizadas no modelo SWAN. Para o Grupo Ocidental, Central e Oriental, a malha exterior tem uma dimensão de 604.5x376.5 km<sup>2</sup>, com origem no ponto de coordenadas UTM (100730, 4057900) e tem uma resolução espacial de 1500x1500 m<sup>2</sup>.

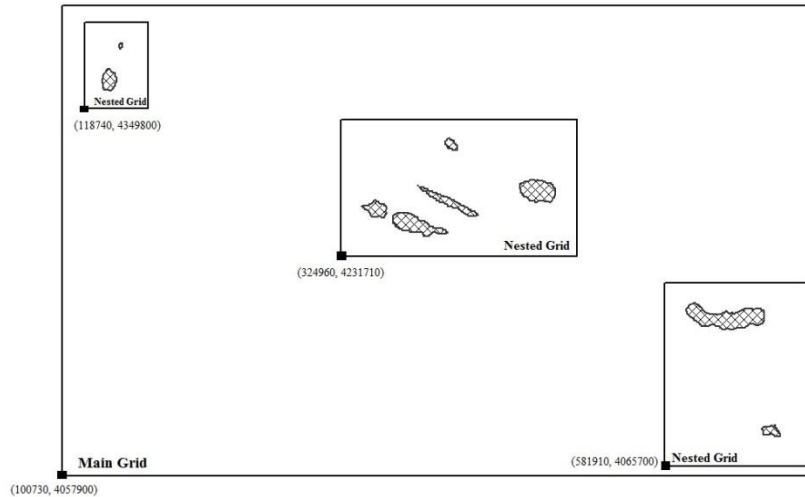
Dentro desta grelha (ver Figura 4.10), para o Grupo Ocidental, foi definida uma malha interior com origem no ponto (118740, 4349800), com uma dimensão de 47.1x68.6 km<sup>2</sup> e uma resolução espacial de 500x500 m<sup>2</sup>. Para o Grupo Central, foi definida uma malha interior com origem no ponto (324960, 4231710), com uma dimensão de 184.2x109.2 km<sup>2</sup> e uma resolução espacial de 500x500 m<sup>2</sup>. Por último, para o grupo Oriental, foi definida uma malha interior com origem no ponto (581910, 4065700), com uma dimensão de 114.1x144.2 km<sup>2</sup> e uma resolução espacial de 500x500 m<sup>2</sup>.

**Tabela 4.1.** Coordenadas das malhas utilizadas no modelo SWAN.

Zonas	Domínios	Origem(x,y)	Dimensões (km <sup>2</sup> )	Δx (m)	Δy (m)
Grupo Ocidental	Malha Exterior (" <i>Main Grid</i> ")	(100730, 4057900)	604.5x376.5	1500	1500
	Malha Interior (" <i>Nested Grid</i> ")	(118740, 4349800)	47.1x68.6	500	500
Grupo Central	Malha Exterior (" <i>Main Grid</i> ")	(100730, 4057900)	604.5x376.5	1500	1500
	Malha Interior (" <i>Nested Grid</i> ")	(324960, 4231710)	184.2x109.2	500	500
Grupo Oriental	Malha Exterior (" <i>Main Grid</i> ")	(100730, 4057900)	604.5x376.5	1500	1500
	Malha Interior (" <i>Nested Grid</i> ")	(581910, 4065700)	114.1x144.2	500	500
Pico	Malha Exterior (" <i>Main Grid</i> ")	(324960, 4231710)	184.2x109.2	500	500
	Malha Interior (" <i>Nested Grid</i> ")	(363500, 4267780)	14.52x5.55	160	160
Ponta Delgada	Malha Exterior (" <i>Main Grid</i> ")	(100730, 4057900)	114.1x144.2	500	500
	Malha Interior (" <i>Nested Grid</i> ")	(608700, 4173330)	15.98x7.52	160	160

A principal razão pela qual se procede ao uso de malhas encaixadas, está associada ao tempo de computação. O modelo SWAN, ao efetuar os cálculos, requer as condições de fronteira de cada malha, que no caso da malha exterior irá corresponder às condições de agitação ao largo e, na malha interior, os parâmetros que correspondem aos da malha exterior. Desta forma, as malhas interiores possuem uma maior resolução para que se

obtenham resultados mais precisos nos pontos de estudo. Com isto, poupa-se tempo de computação, uma vez que só nas partes cruciais do domínio de cálculo é que se adota uma resolução elevada.



**Figura 4.10.** Localização das malhas de estudo para os Grupos Ocidental, Central e Oriental.

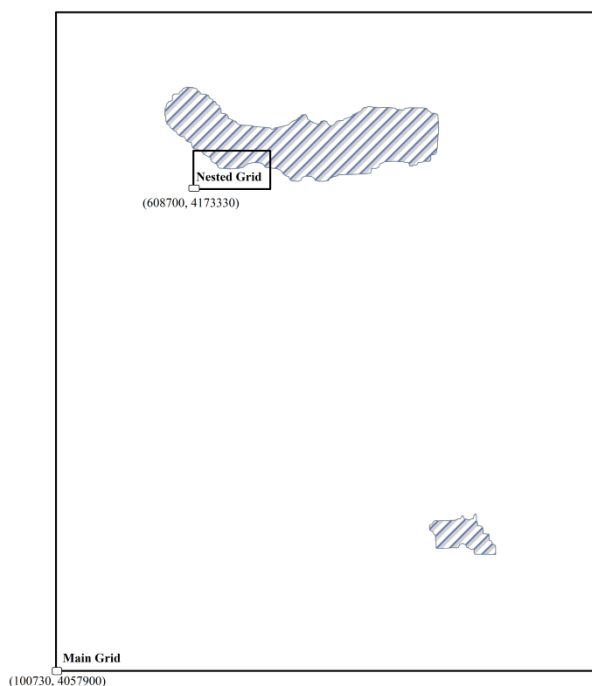
Em relação ao Porto Cachorro no Pico (Figura 4.11), foi definida uma malha exterior com origem no ponto (118740, 4349800), com uma dimensão de 47.1x68.6 km<sup>2</sup> e uma resolução espacial de 500x500 m<sup>2</sup>. A malha interior usada foi definida com origem no ponto (363500, 4267780), com uma dimensão 14.52x5.55 km<sup>2</sup> e uma resolução espacial de 160x160 m<sup>2</sup>.



**Figura 4.11.** Localização das malhas de estudo para o Pico.

Em relação ao porto de Ponta Delgada (Figura 4.12), foi definida uma malha exterior com origem no ponto (100730, 4057900), com uma dimensão de 114.1x144.2 km<sup>2</sup> e uma resolução espacial de 500x500m<sup>2</sup>. A malha interior usada foi definida com

origem no ponto (608700, 4173330), com uma dimensão 15.98x7.52 km<sup>2</sup> e uma resolução espacial de 160x160 m<sup>2</sup>.



**Figura 4.12.** Localização das malhas de estudo para Ponta Delgada.

#### **4.3.2. Características das Simulações**

A execução do modelo SWAN, versão SWAN 40.72, requer a introdução de diferentes dados de base, referentes às variáveis físicas que caracterizam a agitação ao largo, os ventos, marés e correntes, nomeadamente:

- Utilização dos dados de ventos fornecidos pelo ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecast) no período de 2005 a 2014. O campo de ventos foi considerado em todas as malhas computacionais;
- Utilização como condições ao largo do SWAN as fornecidas pelo modelo de geração WAM (WAMDI Group, 1988), parâmetros Hs, Tp e  $\theta_p$ , para o período de 2005 a 2014, de 6 em 6 horas;
- Utilização dos dados de marés de 6 em 6 horas no período de 2005 a 2014, provenientes do modelo Xtide;

Os restantes parâmetros do SWAN foram mantidos constantes para todas as corridas do SWAN:

- Para os fenómenos físicos, foi considerada difração, interação onda-onda tripla e quádrupla, atrito de fundo introduzido segundo a expressão semi-empírica de

JONSWAP, rebentação induzida pelo fundo e rebentação parcial por excesso de declividade (“*whitcapping*”).

No que diz respeito às correntes, estas não foram consideradas para a realização dos cálculos do modelo SWAN.

## **5. Análise e Discussão de Resultados**

### **5.1. Introdução**

O estudo climático de agitação marítima requer a recolha e análise de dados durante um período de tempo bastante longo. Um registo de aproximadamente 20 a 30 anos fornece dados suficientes para realizar um estudo deste género (Pereira, 2008). O período de tempo utilizado para este estudo é de dez anos, sendo assim inferior ao necessário, o que não invalida o seu contributo para a investigação.

As costas Norte e Oeste das diversas ilhas do Arquipélago dos Açores estão expostas às condições marítimas do Oceano Atlântico. Estas são particularmente influenciadas pelas tempestades que ocorrem no Atlântico Norte e que originam uma ondulação predominante de Noroeste. Além disso, a costa Açoriana está também sujeita à ação do vento que se faz sentir, sobretudo, com direção Oeste – Este. Todos estes fatores contribuem para que toda a costa Oeste possua condições de agitação marítima características e com alguma regularidade.

A caracterização do clima de agitação marítima passa por identificar as distribuições dos parâmetros de onda assim como os seus valores máximos e médios. A altura significativa, o período de pico e a direção de pico das ondas são os parâmetros em análise. Essa caracterização pode ser efetuada considerando a totalidade dos valores obtidos para os dez anos ou utilizar resultados de meses de Verão ou de meses de Inverno para definir os regimes de Verão e de Inverno. Em relação aos regimes, para o Verão foram utilizados os dados dos meses de Abril, Maio, Junho, Julho, Agosto e Setembro, enquanto para a estação de Inverno foram utilizados os meses de Outubro, Novembro, Dezembro, Janeiro, Fevereiro e Março.

Os resultados obtidos das simulações numéricas do modelo SWAN foram, em primeiro lugar, alvo de uma análise estatística com o objetivo de se verificar os desvios entre os valores de  $H_s$  e  $T_p$  estimados pelo WAM e pelo SWAN. Para além destas análises apresentam-se, também, gráficos de comparação entre as principais variáveis que caracterizam o estado do mar. A identificação das frequências dos parâmetros das ondas permite determinar as distribuições espaciais típicas destes para as diferentes alturas do ano.

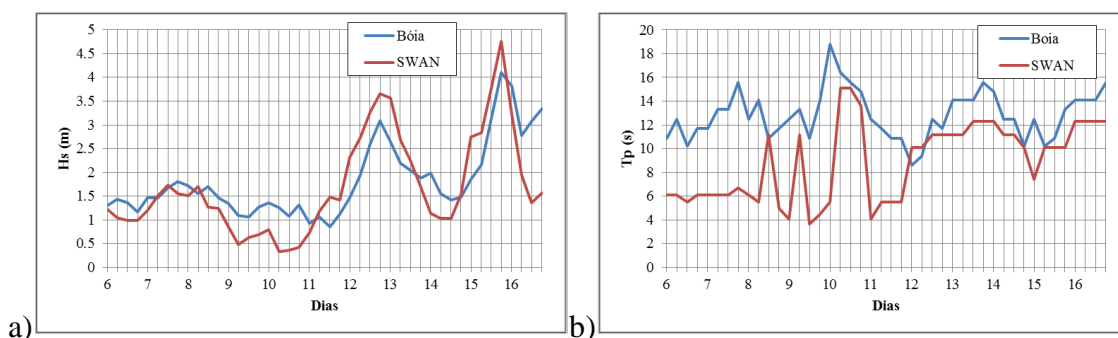
Quanto à distribuição energética, a potência (kW/m) será comparada aos principais parâmetros de onda e finalizada com mapas de distribuição espacial para uma análise final.

Devido à grande dimensão de resultados, foi tido em conta o ponto com o maior potencial médio de cada grupo. No que diz respeito ao Pico e Ponta Delgada, serão representados apenas os dados do potencial energético, ao passo que a informação da agitação marítima necessária, respetiva a estes dois casos, pode ser encontrada em anexo. Os dados estatísticos que fundamentam todos os gráficos abaixo representados na caracterização da agitação marítima, irão ser referenciados no relatório e encontram-se também disponíveis em anexo.

## 5.2. Análise do Desempenho do Modelo SWAN

A avaliação do desempenho do modelo SWAN foi feita através da comparação dos resultados simulados com os dados obtidos pela boia. As boias utilizadas para este fim situam-se ao largo da ilha das Flores, Faial/Pico e Ponta Delgada.

Os registos destas boias estão disponíveis apenas para os anos de 2013 e 2014, pelo que a comparação realizada seguidamente compreende um período que se encontra dentro desse intervalo de dois anos. Como o intervalo de registo das boias são variáveis, procedeu-se a uma filtragem dos valores para que fossem comparáveis com os obtidos através do modelo SWAN, isto é, de seis em seis horas. No que diz respeito à representação gráfica, recorreu-se a um período menor, visto ter-se tornado impraticável a representação dos 2 anos (2013-2014) de dados num só gráfico.

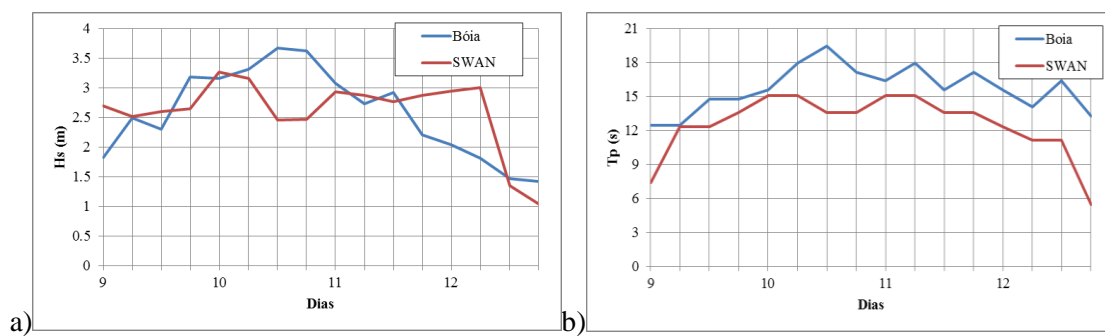


**Figura 5.1.** Comparação, da altura significativa e período de pico, entre os valores medidos e simulados. a) Dados para Hs entre 6 a 16 de Fevereiro de 2013. b) Dados para Tp entre 6 a 16 de Fevereiro de 2013.

Numa primeira análise, a comparação direta destes resultados permite concluir a qualidade dos resultados simulados. A Figura 5.1 apresenta a altura significativa e o período de pico, entre os valores medidos e simulados, entre 6 a 16 de Fevereiro de 2013. Observando o gráfico da Figura 5.1a, que diz respeito à altura significativa da onda medida ao largo da ilha das Flores, pode-se dizer que existe um comportamento semelhante entre os dois conjuntos de valores, apesar de existir disparidade em alguns pontos, muito possivelmente devido à fórmula de cálculo usada no método espectral, que,

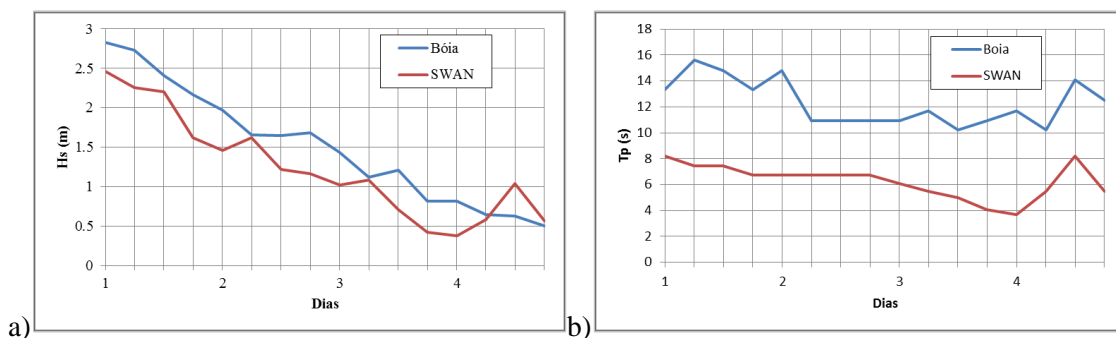
implicitamente, considera todas as ondas existentes no registo, por mais pequenas que sejam, ao passo que o método direto empregue na análise temporal, considera apenas ondas que cruzam a superfície da água. Em relação à Figura 5.1b, que diz respeito ao período de pico, pode-se dizer que, apesar de existir um comportamento similar, é notório uma grande discrepância entre os seus valores para o intervalo de tempo em questão, ou seja, é permitido dizer que há subestimação dos valores do período de pico pelo modelo numérico.

A Figura 5.2 apresenta a altura significativa e o período de pico, entre os valores medidos e simulados entre 9 a 12 de Janeiro de 2013.



**Figura 5.2.** Comparação, da altura significativa e período de pico, entre os valores medidos e simulados. a) Dados para Hs entre 9 a 12 de Janeiro de 2013. b) Dados para Tp entre 9 a 12 de Janeiro de 2013.

A partir da observação do gráfico da Figura 5.2a, que diz respeito à altura significativa da onda medida ao largo das ilhas do Faial/Pico, pode-se dizer que existe alguns pontos em discrepância ao longo do tempo. Quanto ao período de pico (Figura 5.2b), existe um comportamento similar entre os dados do SWAN e os dados da boia apesar de existir uma diferença entre ambos os valores. No entanto, esta diferença é significativamente menor em relação aos dados da boia estimados na ilha das Flores e em Ponta Delgada.



**Figura 5.3.** Comparação, da altura significativa e período de pico, entre os valores reais e simulados. a) Dados para Hs entre 1 a 4 de Outubro de 2013. b) Dados para Tp entre 1 a 4 de Outubro de 2013.

A Figura 5.3 apresenta a altura significativa e o período de pico, entre os valores reais e simulados entre 1 a 4 de Outubro de 2013. A partir da Figura 5.3a é permitido dizer que, no que diz respeito à altura significativa da onda medida ao largo de Ponta Delgada, existe um comportamento semelhante entre os dois conjuntos de valores, onde se pode observar novamente disparidade entre valores em alguns pontos. Em relação ao período de pico (Figura 5.3b), o comportamento é similar entre a boia e o modelo numérico e a discrepância entre os valores é significativa.

De forma a dar mais consistência aos dados comparados anteriormente, foram calculados parâmetros que avaliam, estatisticamente, esses resultados: o RMSE (*root mean square error* ou valor médio do erro quadrático), ME (*mean error* ou erro médio) e o R (coeficiente de correlação de Pearson).

O ideal é que o ME se aproxime de 0, podendo ter valor positivo ou negativo, conforme se trate de uma sobrestimação ou subestimação, respetivamente, dos valores da boia pelo SWAN. Quanto ao RMSE, tem sempre valor positivo e quanto mais próximo de 0 se encontrar, maior a qualidade dos resultados do SWAN relativamente às medições da boia. O valor de R representa o coeficiente de correlação de Pearson e quanto mais perto de 1 o valor atingir, mais credível é a relação entre os dados comparados.

Relativamente ao Hs das boias das Flores, Faial/Pico e Ponta Delgada, obtiveram-se respetivamente: ME=-0.136 (subestimação), ME=0.02 e ME=-0.279; RMSE=0.649, RMSE=0.537 e RMSE=0.243; R=0.786, R=0.503 e R=0.933. Em relação ao período de pico para as mesmas boias, obteve-se respetivamente: ME=0.678 (sobrestimação), ME=-0.398 (subestimação), ME=-3.17 e ME=-6.03; RMSE=3.180, RMSE=2.105 e RMSE=1.101; R=0.313, R=0.666 e R=0.602.

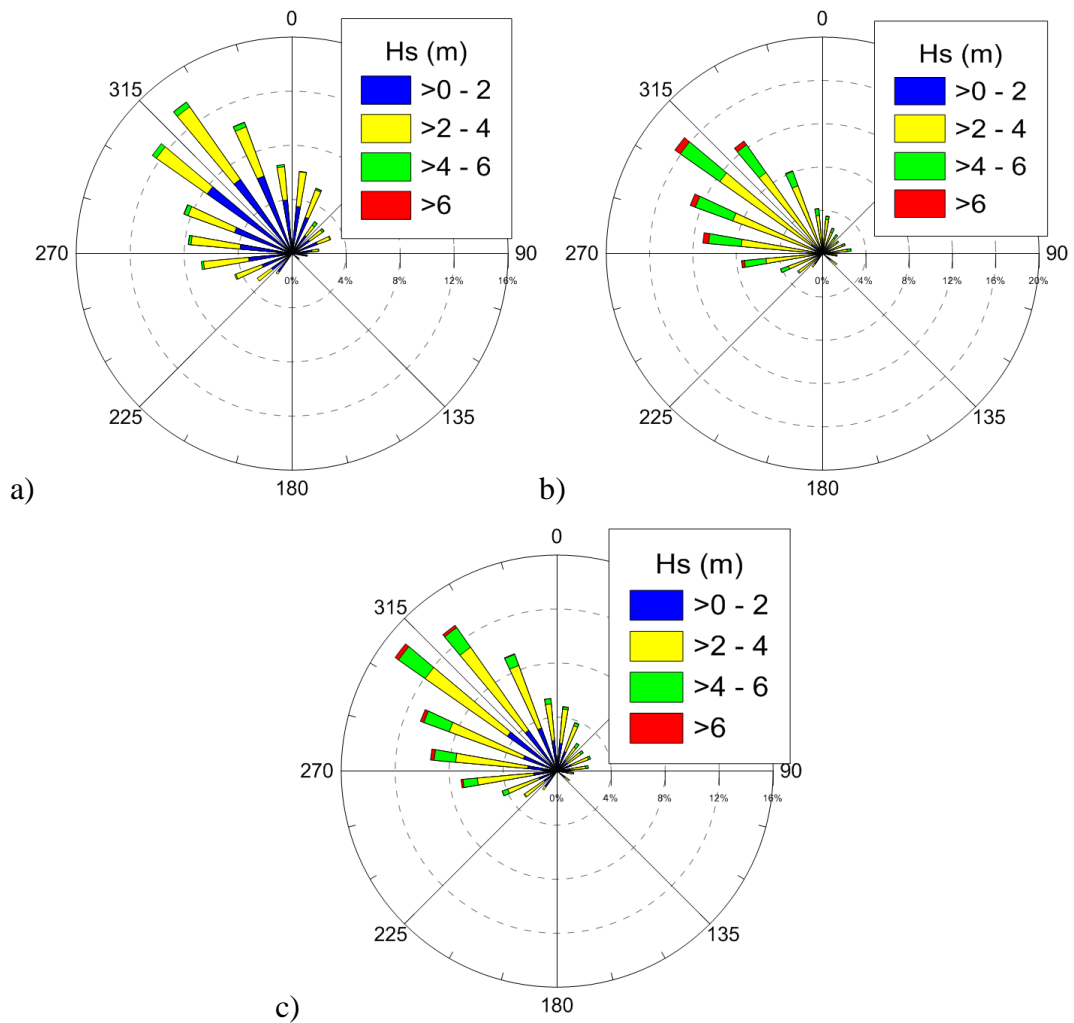
Pode então concluir-se que o modelo SWAN consegue representar de forma satisfatória as condições de agitação predominantes na zona no que diz respeito à altura significativa, sendo que o período de pico fica aquém do esperado.

### **5.3. Caracterização da Agitação Marítima**

#### **5.3.1. Grupo Ocidental**

##### **5.3.1.1. Altura significativa**

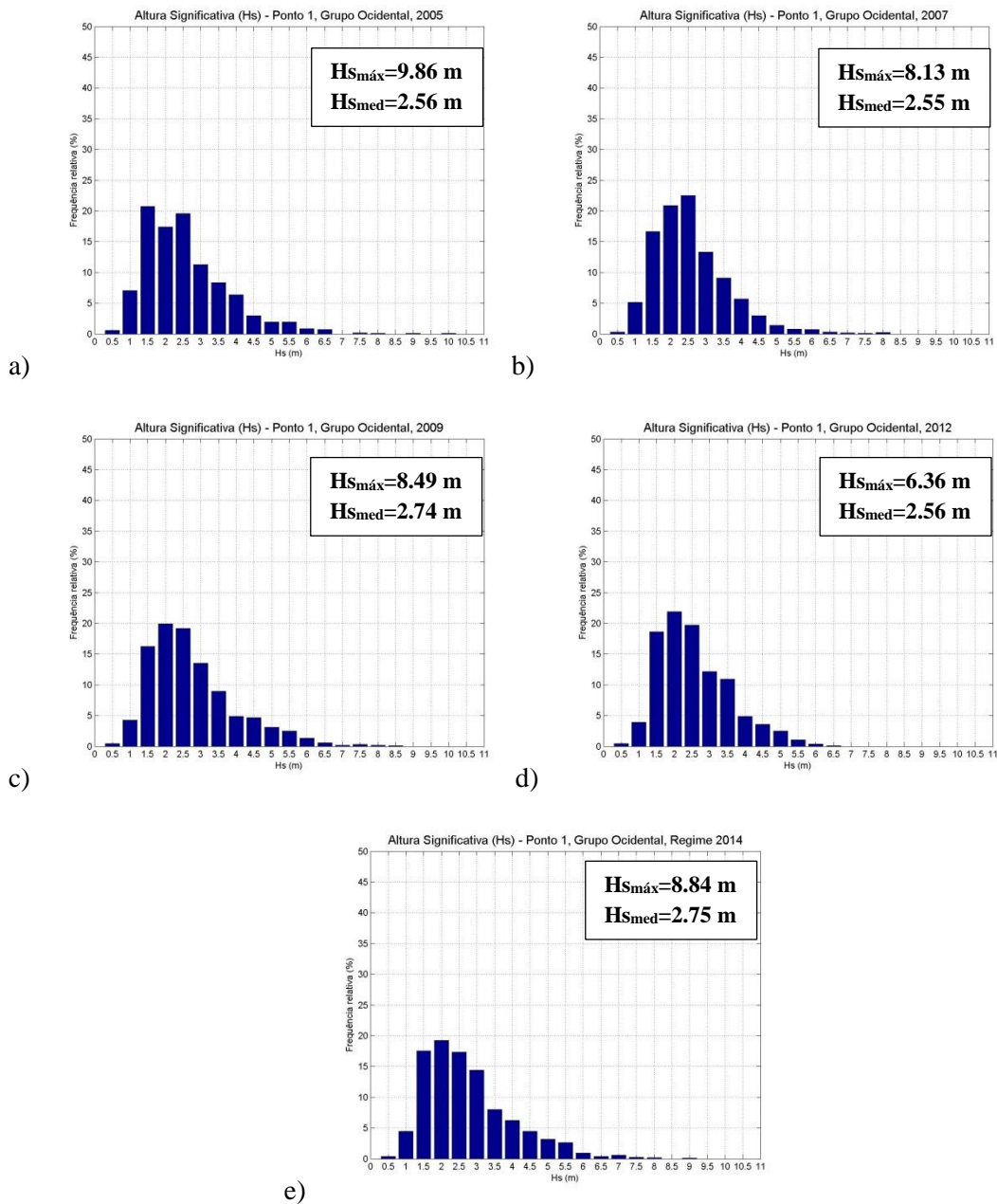
Na Figura 5.4 apresenta-se, para o ponto 1 do grupo Ocidental, a distribuição espacial típica da altura significativa e direção de pico para os meses de Verão, Inverno e para os dez anos.



**Figura 5.4.** Distribuição da direção de pico das ondas em função da altura significativa. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno. c) Total

A partir da observação da Figura 5.4, repara-se que a diferença de valores entre os regimes não sofre alterações significativas. No Verão a direção média tende a aproximar-se mais de Noroeste com valores de altura de onda significativa, maioritariamente entre os 0 e 4 metros, e a aproximar-se mais de Oeste no Inverno com valores entre os 2 e 6 metros.

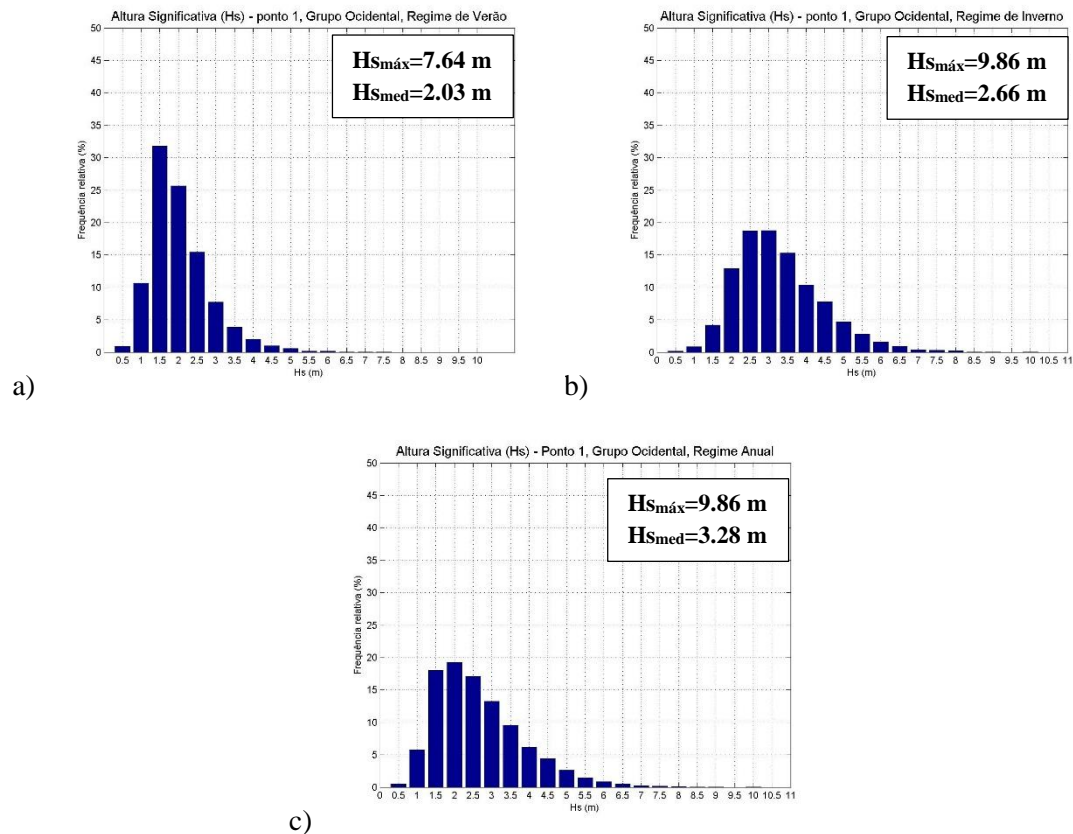
Na Figura 5.5 apresenta-se a frequência relativa da altura significativa para os anos: 2005, 2007, 2009, 2012 e 2014.



**Figura 5.5.** Frequência relativa da altura significativa. a) 2005. b) 2007. c) 2009. d) 2012. e) 2014

Observando a Figura 5.5, é permitido dizer que ao longo dos últimos dez anos não existem grandes variações na altura significativa, o que pode ser comprovado com a média anual. Em geral, o maior numero de ocorrências situa-se entre os 1.5 e os 3 m decrescendo á medida que a altura da onda aumenta. Os valores da altura máxima variam conforme o ano em estudo.

Na Figura 5.6 apresentam-se os histogramas de altura significativa para os meses de Verão, Inverno e dez anos. No geral, existem notórias diferenças entre o clima de agitação marítima nos meses de Inverno e Verão.

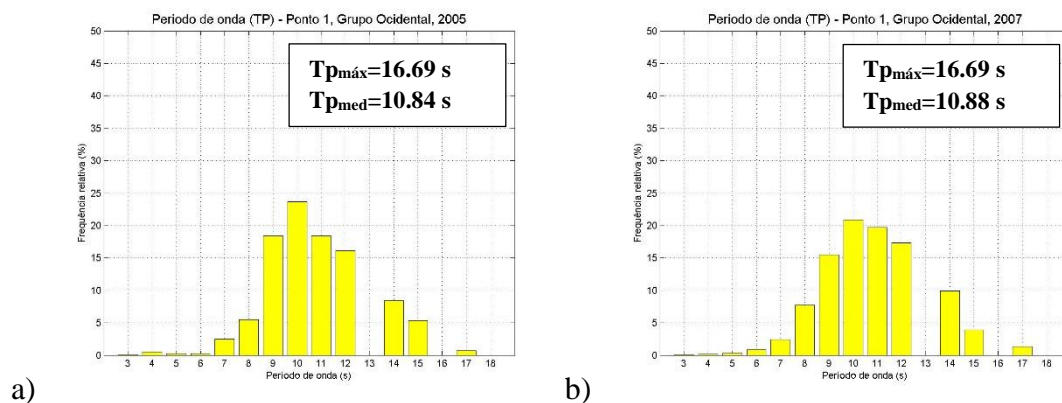


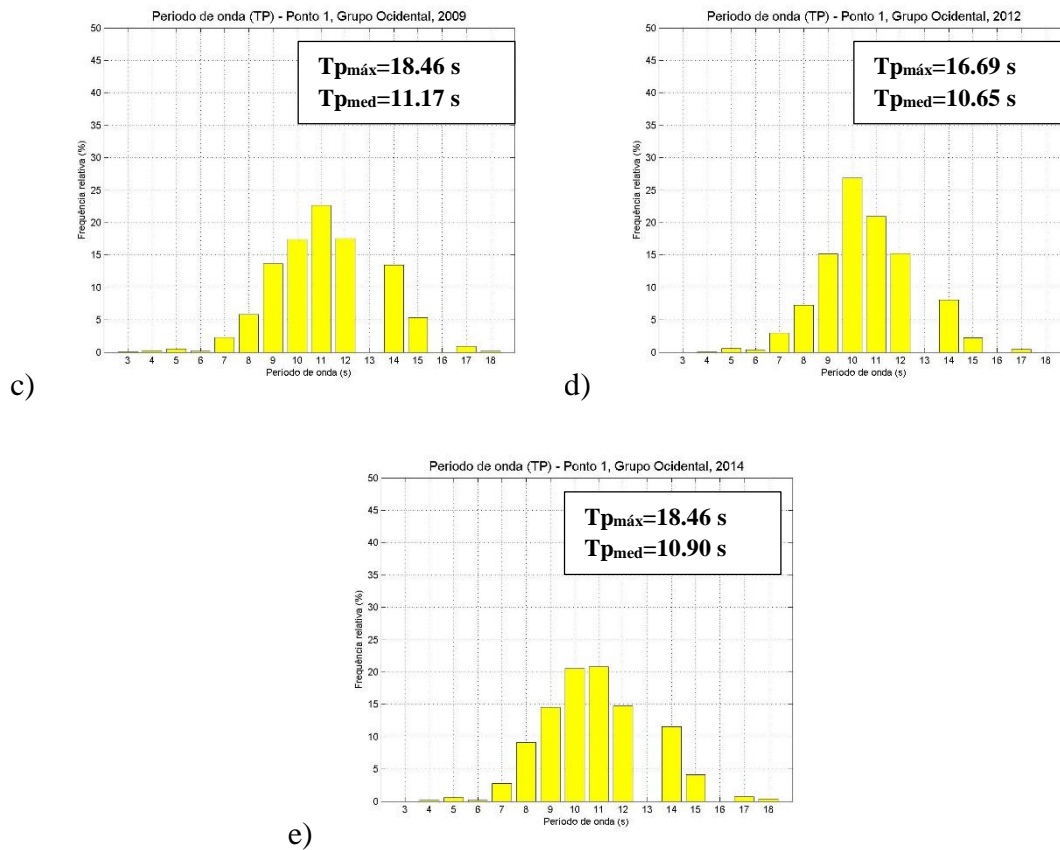
**Figura 5.6.** Frequência relativa da altura significativa. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno. c) Total

Pode ver-se na Figura 5.6 que a maior parte dos picos de altura significativa, que poderão corresponder a situações de tempestade, ocorrem nos meses de Inverno. Tendo em conta os valores máximos e médios, pode-se dizer que ambos são superiores no Inverno, ou seja, existe uma mudança considerável das distribuições de altura significativa para as diferentes estações.

### 5.3.1.2. Período de pico

Na Figura 5.7 é possível observar-se a frequência relativa do período de pico para os anos de 2005, 2007, 2009, 2012 e 2014.

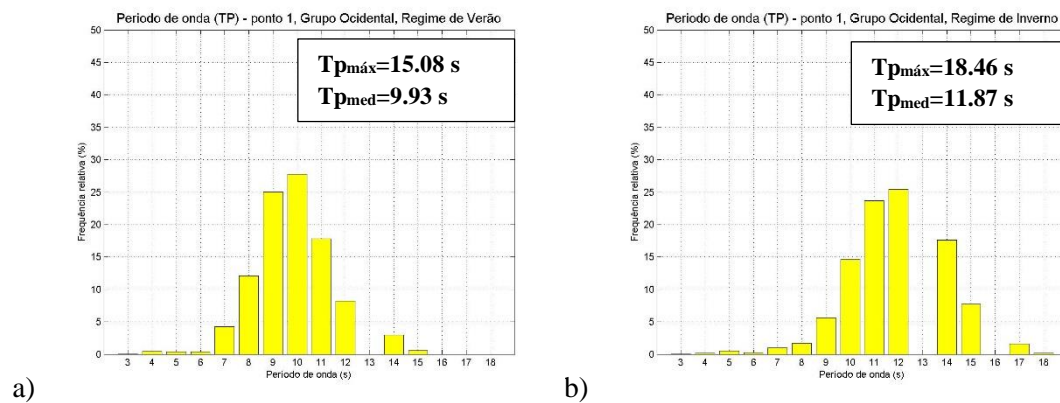


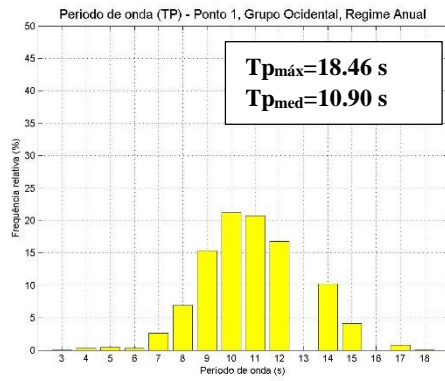


**Figura 5.7.** Frequência relativa do período de pico. a) 2005. b) 2007. c) 2009. d) 2012. e) 2014

Ao longo dos últimos dez anos, o período de pico aparenta não sofrer alterações significativas. Esta situação pode ser justificada a partir da análise à Figura 5.7, em que as classes de maior ocorrência são as seguintes: [9-10], [10-11] e [11-12].

Na Figura 5.8 apresenta-se a frequência relativa do período de pico para os meses de Verão, Inverno e dez anos. No Inverno podemos observar que o período de pico ocorre sobretudo em classes superiores a dez segundos. Nos meses de Verão a situação inverte-se, estando estas classes maioritariamente abaixo dos dez segundos.



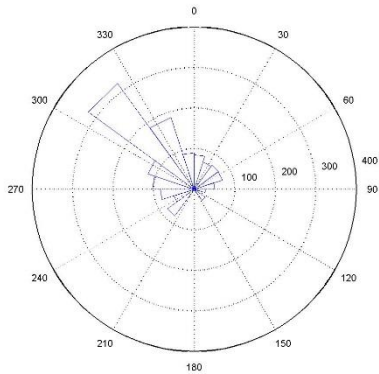


c)

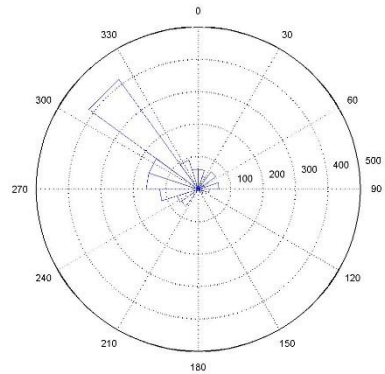
Figura 5.8. Frequência relativa do período de pico. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno. c) Total

### 5.3.1.3. Direção de onda

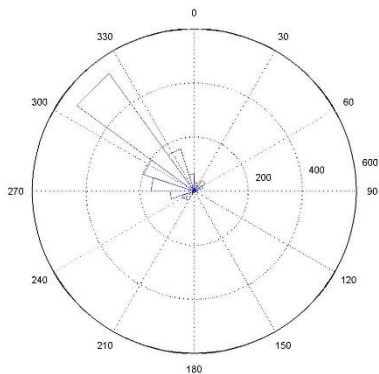
Na Figura 5.9 é possível observar-se a distribuição da direção de pico para os anos de 2005, 2007, 2009, 2012 e 2014.



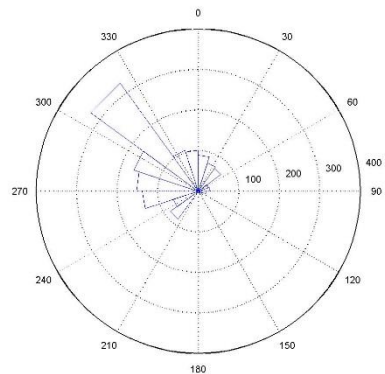
a)



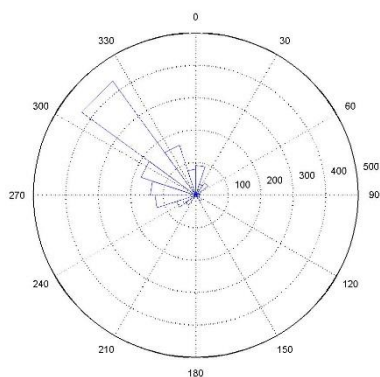
b)



c)



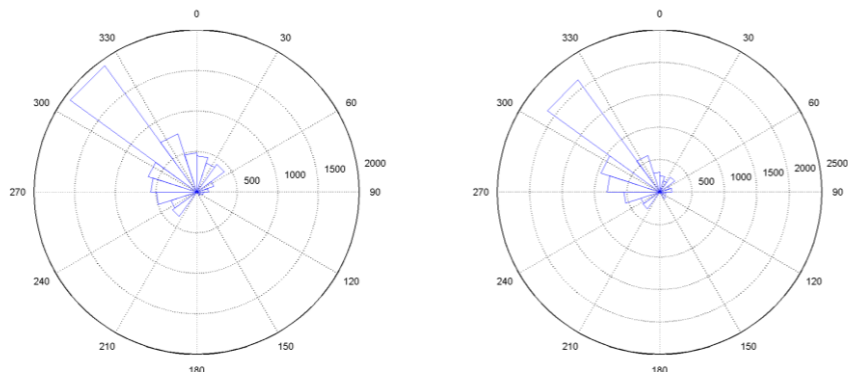
d)



e)

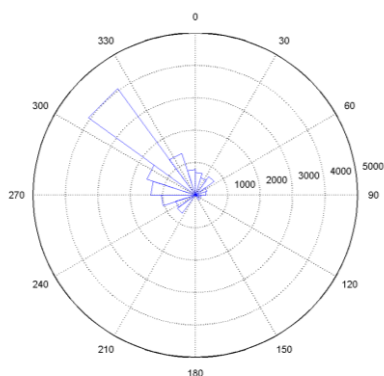
**Figura 5.9.** Distribuição da direção de pico das ondas. a) 2005. b) 2007. c) 2009. d) 2012. e) 2014

Tal como já foi mencionado, a costa Oeste e Norte açoriana está exposta a uma ondulação predominante de Noroeste, como se pode observar na Figura 5.9. A distribuição da direção de pico das ondas encontra-se quase integralmente no quadrante limitado pelas direções de Oeste e Norte, sendo, na maior parte das vezes, correspondente à direção de Noroeste. A mesma análise pode ser efetuada para os meses de Verão e para os meses de Inverno, visto que não existem alterações significativas na direção (Figura 5.10).



a)

b)



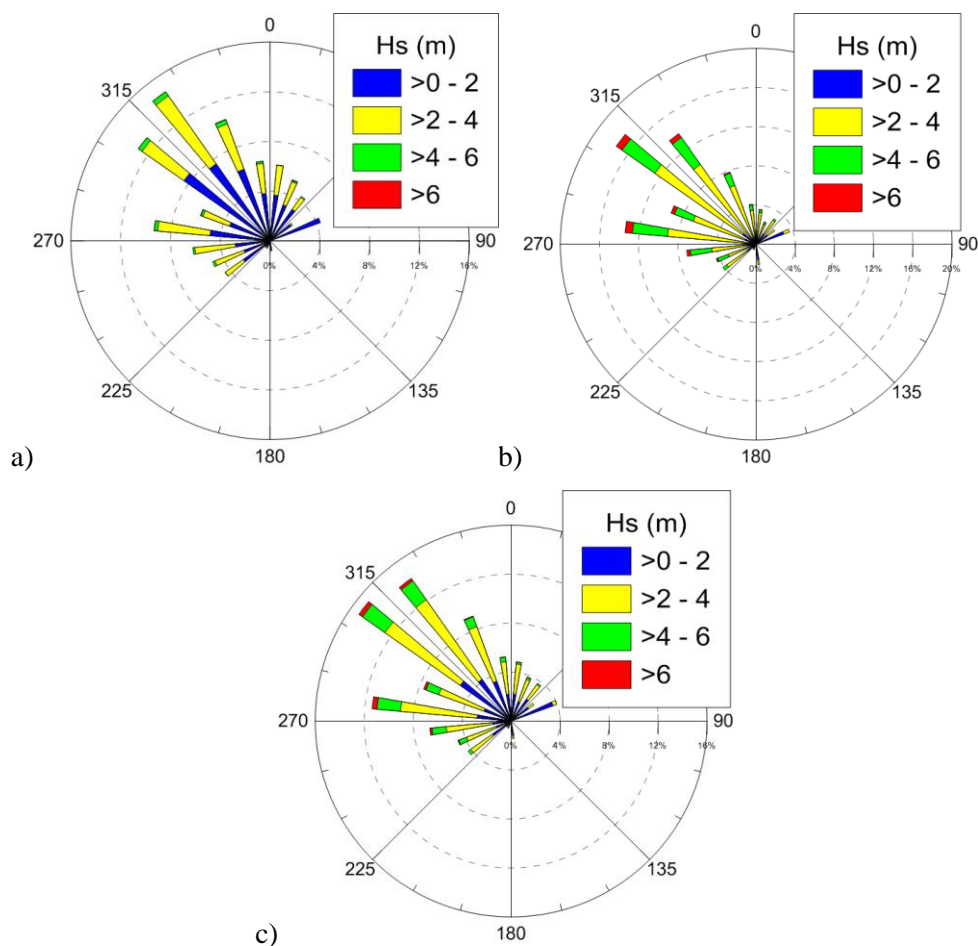
c)

**Figura 5.10.** Distribuição da direção de pico das ondas. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno. c) Total

### 5.3.2. Grupo Central

#### 5.3.2.1. Altura significativa

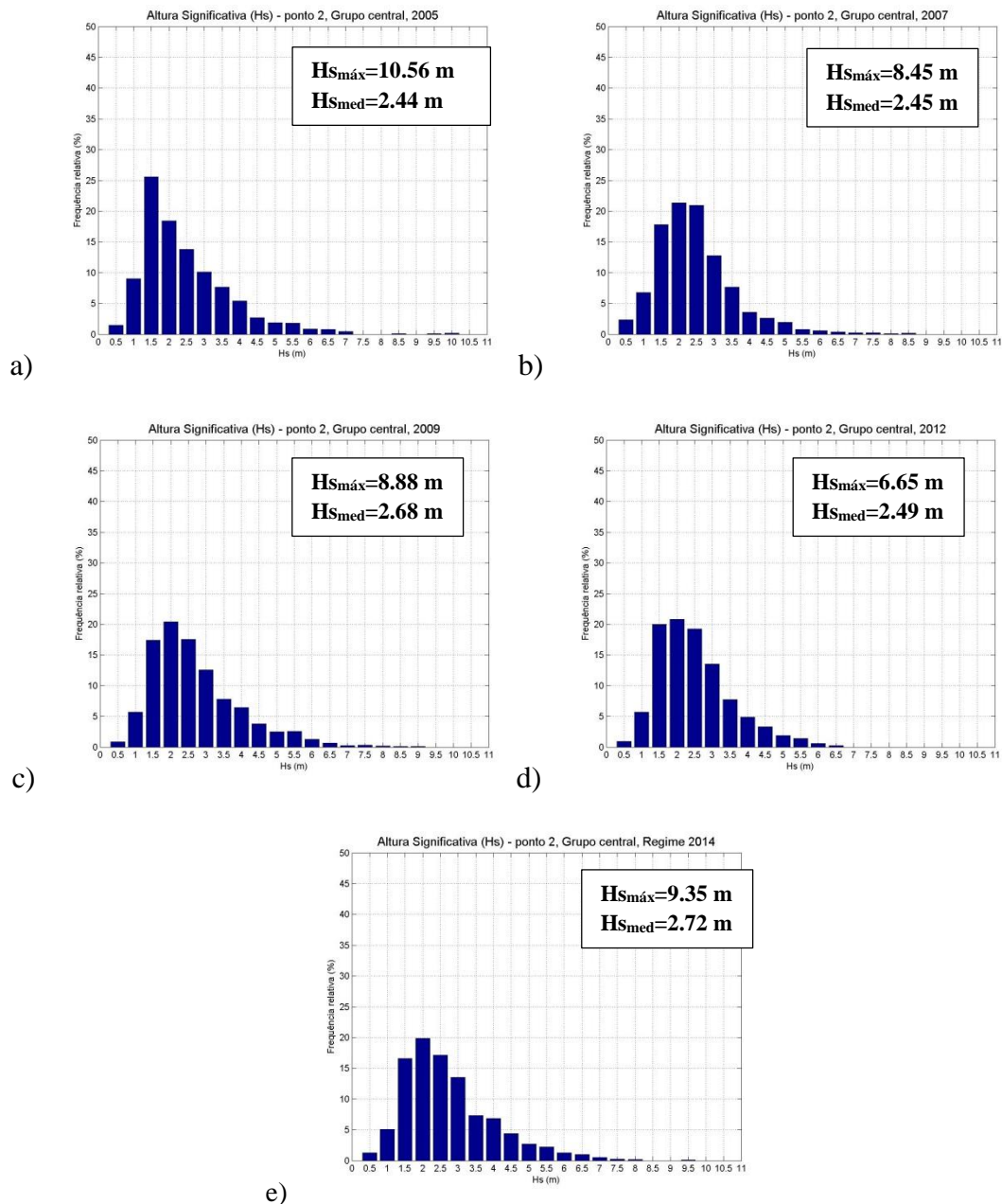
Na Figura 5.11 apresenta-se, para o ponto 11 do grupo Central, a distribuição espacial típica da altura significativa e direção de pico para os meses de Verão, Inverno e para os dez anos.



**Figura 5.11.** Distribuição da direção de pico das ondas em função da altura significativa. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno. c) Total

Observando a Figura 5.11, concluímos que os valores entre os regimes não sofrem alterações significativas. No Verão e Inverno a direção de pico tem orientação predominante de Noroeste, enquanto a altura significativa atinge maiores valores no Inverno ao contrário do que acontece no Verão.

Na Figura 5.12 apresenta-se a frequência relativa da altura significativa para os anos: 2005, 2007, 2009, 2012 e 2014.

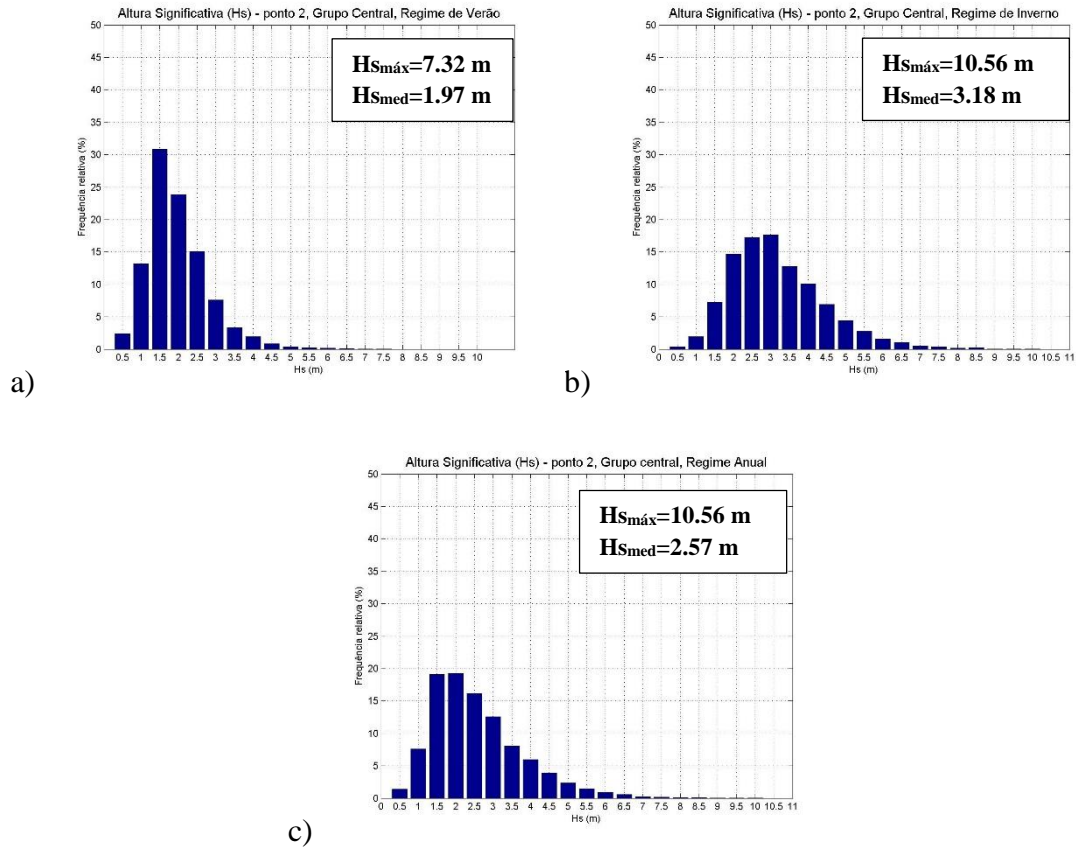


**Figura 5.12.** Frequência relativa da altura significativa. a) 2005. b) 2007. c) 2009. d) 2012. e) 2014

Verificando a Figura 5.12, é permitido dizer que ao longo dos últimos dez anos não existem grandes variações na altura significativa, o que pode ser comprovado com a média anual, sendo que as classes de valores mais frequentes são [1,5 – 2] e [2 – 2,5].

No geral, é possível observar a diferença entre o clima de agitação marítima nos meses de Inverno e Verão. Tendo em conta os valores máximos e médios, pode-se dizer que ambos são superiores no Inverno, ou seja, existe uma mudança significativa das distribuições de altura significativa para as diferentes estações.

Na Figura 5.13 apresentam-se os histogramas de altura significativa para os meses de Verão, Inverno e dez anos. No geral, existem notórias diferenças entre o clima de agitação marítima nos meses de Inverno e Verão.

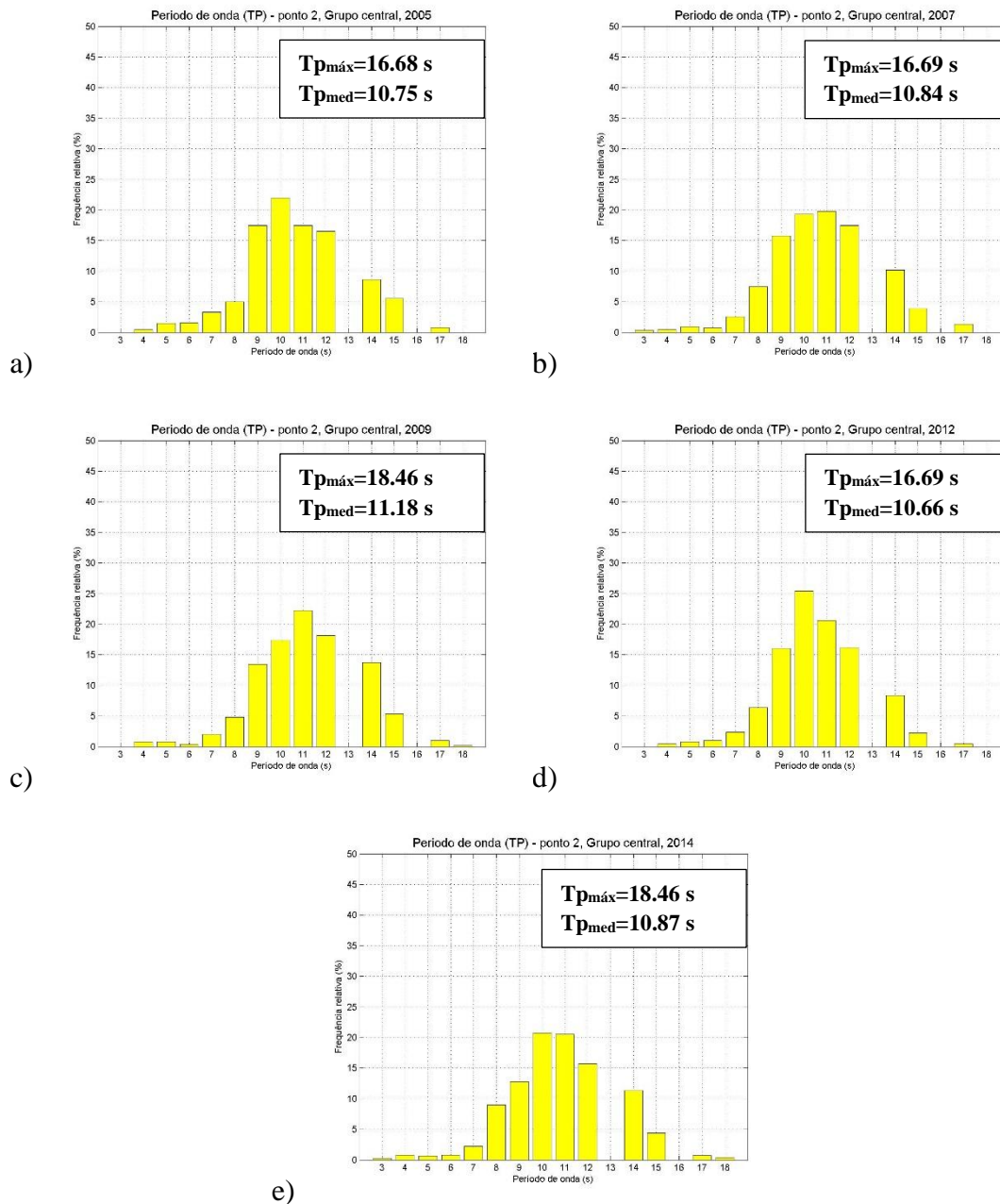


**Figura 5.13.** Frequência relativa da altura significativa. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno. c) Total

A frequência de altura significativa (Figura 5.13) é superior nos meses de Inverno, onde existe uma maior distribuição das classes de valores entre os 2 e 4,5 m. Quer isto dizer que a ocorrência do estado do mar, correspondente a tempestades, é maior para estes meses. Enquanto no Verão as classes de valores que mais predominam são [1,5-2,0] m, ou seja, corresponde a um período mais calmo no que diz respeito à agitação marítima.

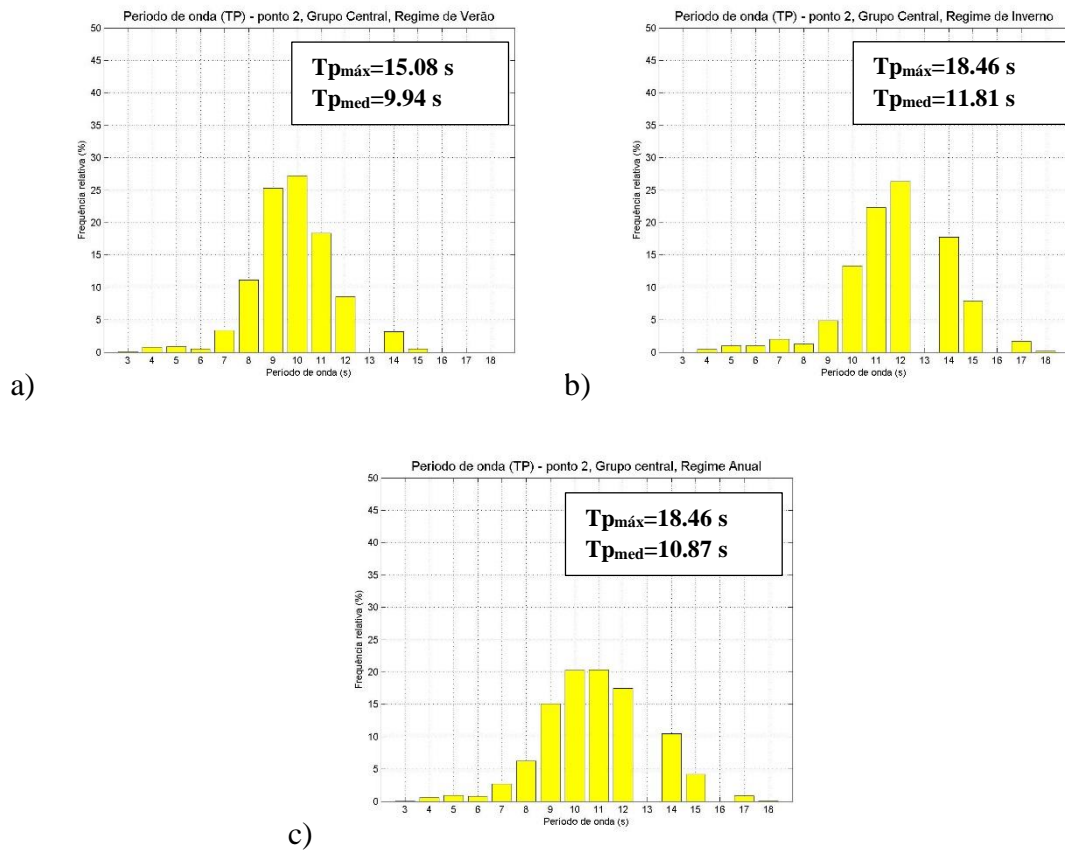
### 5.3.2.2. Período de pico

Na Figura 5.14 é possível observar-se a frequência relativa do período de pico para os anos de 2005, 2007, 2009, 2012 e 2014.



**Figura 5.14.** Frequência relativa do período de pico. a) 2005. b) 2007. c) 2009. d) 2012. e) 2014

Ao longo dos últimos dez anos, o período de pico aparenta não sofrer alterações relevantes. Esta situação é justificada a partir da Figura 5.14, em que as classes de maior ocorrência, semelhantes às do Grupo Ocidental, são as seguintes: [9-10], [10-11] e [11-12]. Na Figura 5.15 apresenta-se a frequência relativa do período de pico para os meses de Verão, Inverno e dez anos.

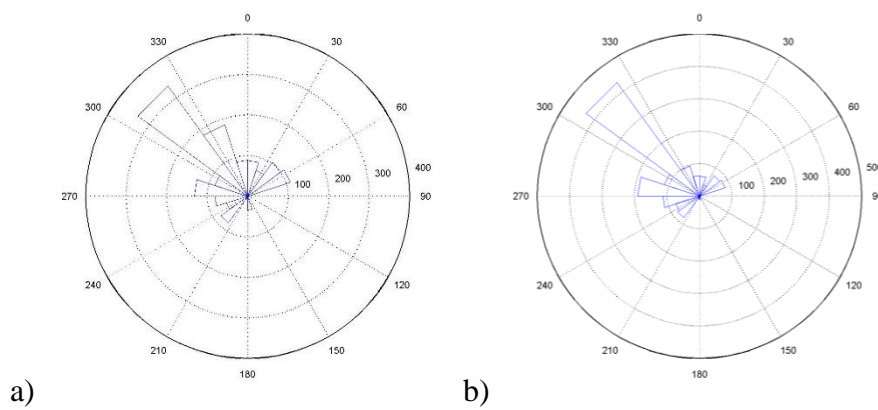


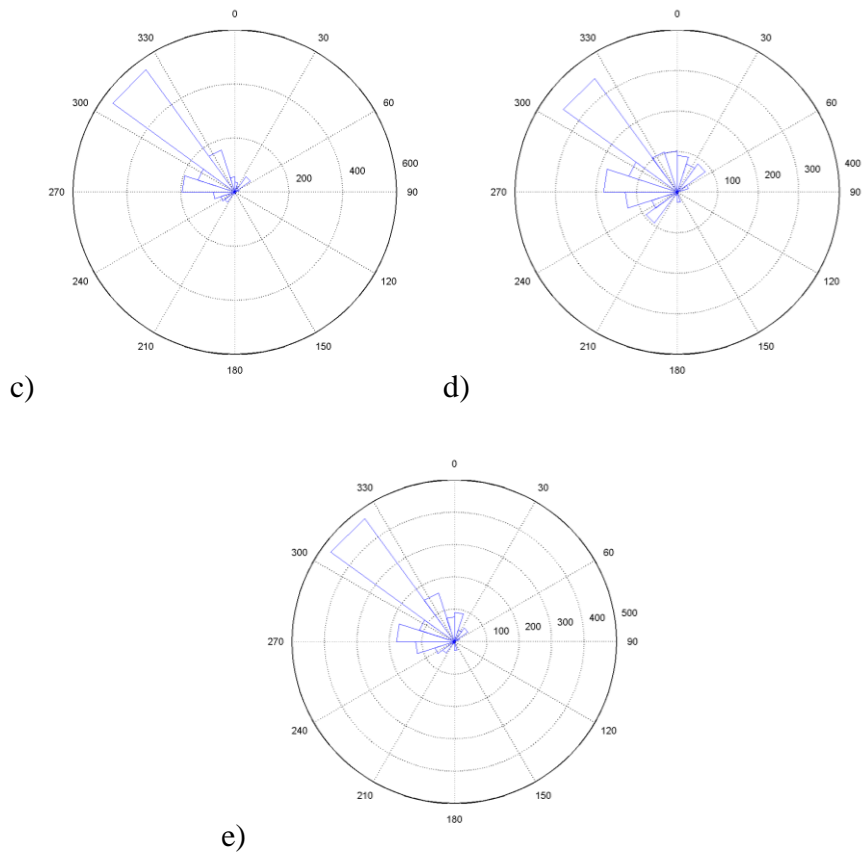
**Figura 5.15.** Frequência relativa do período de pico. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno. c) Total

No Inverno (Figura 5.15) podemos observar que o período de pico ocorre, principalmente, em classes iguais e/ou superiores a 10 segundos. Nos meses de Verão a situação inverte-se, estando estas classes maioritariamente abaixo dos 11 segundos.

### 5.3.2.3. Direção de onda

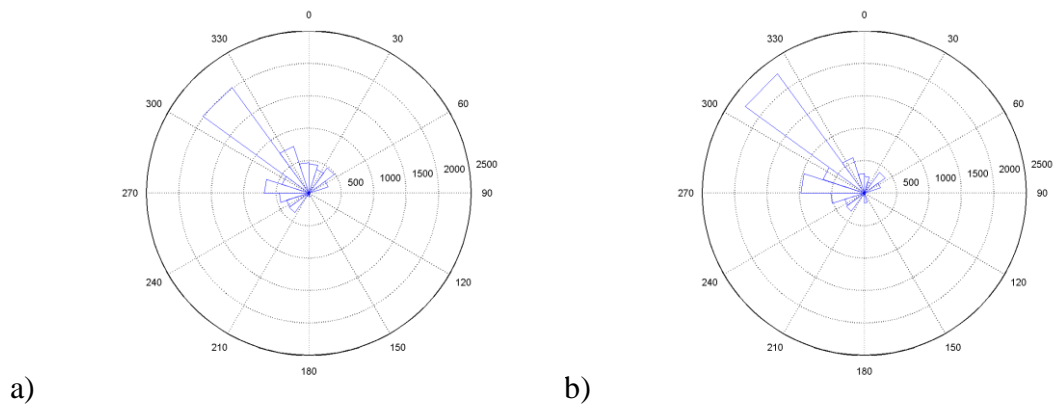
Na Figura 5.16 é possível observar-se a distribuição da direção de pico para os anos de 2005, 2007, 2009, 2012 e 2014.

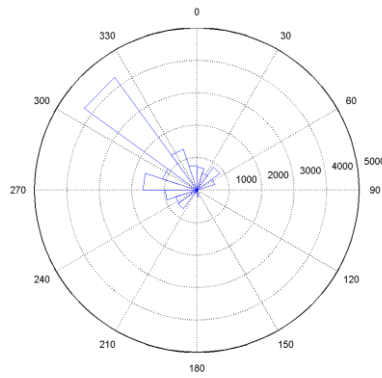




**Figura 5.16.** Distribuição da direção de pico das ondas. a) 2005. b) 2007. c) 2009. d) 2012. e) 2014

Como se pode observar na Figura 5.16, a distribuição da direção de pico das ondas encontra-se quase integralmente no quadrante limitado pelas direções de Oeste e Norte, sendo, na maior parte das vezes, correspondente à direção de Noroeste. A mesma análise pode ser feita para os meses de Verão e Inverno (Figura 5.17), onde a orientação de Noroeste é predominante.





c)

Figura 5.17. Distribuição da direção de pico das ondas. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno. c) Total

### 5.3.3. Grupo Oriental

#### 5.3.3.1. Altura significativa

Na Figura 5.18 apresenta-se, para o ponto 41 do grupo Oriental, a distribuição espacial típica da altura significativa e direção de pico para os meses de Verão, Inverno e para os dez anos.

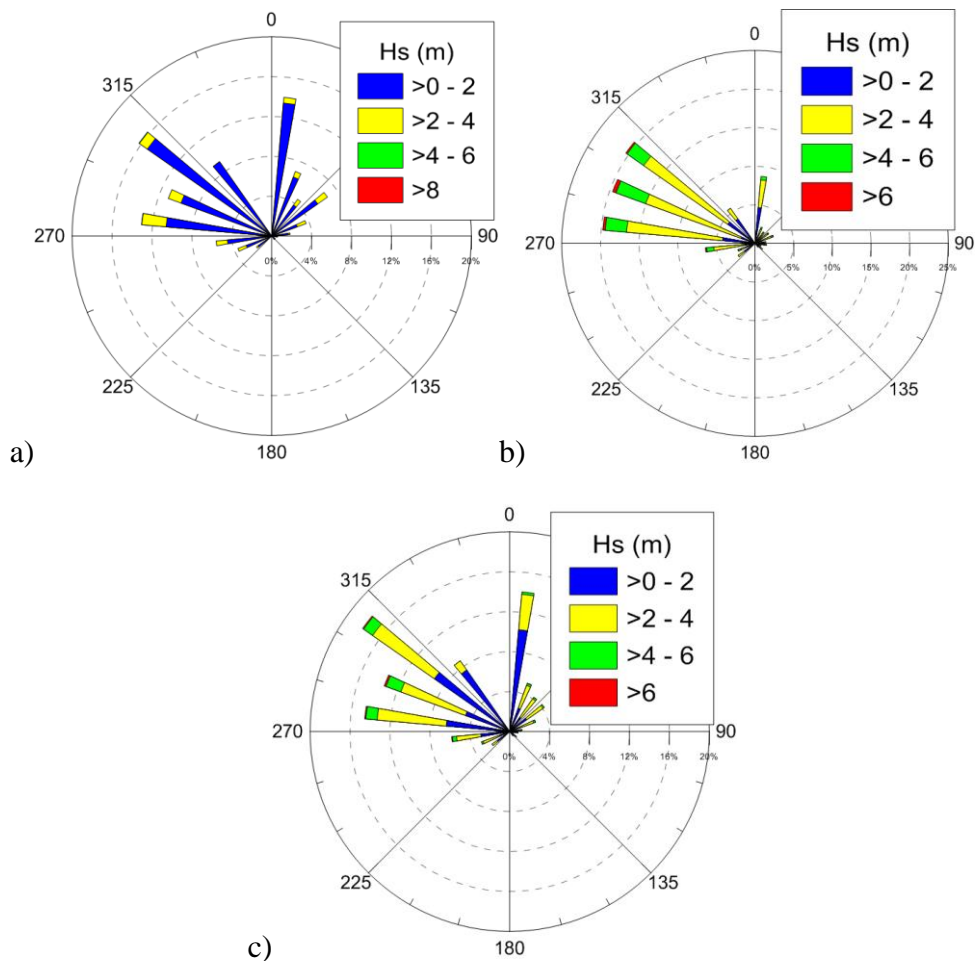


Figura 5.18. Distribuição da direção de pico das ondas em função da altura significativa. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno. c) Total

A partir da observação da Figura 5.18, a diferença de valores da altura significativa e de direção de pico, entre os regimes de Verão e Inverno, são maiores para este grupo. No Verão a direção de pico tem predominância de Noroeste e Norte, enquanto no Inverno tende a ter orientações de Oeste e Noroeste. Relativamente à altura significativa, é bem maior no Inverno do que no Verão, uma vez que no Inverno predominam as classes de valores [2-4] m e no Verão [0-2] m.

Na Figura 5.19 apresenta-se a frequência relativa da altura significativa para os anos: 2005, 2007, 2009, 2012 e 2014

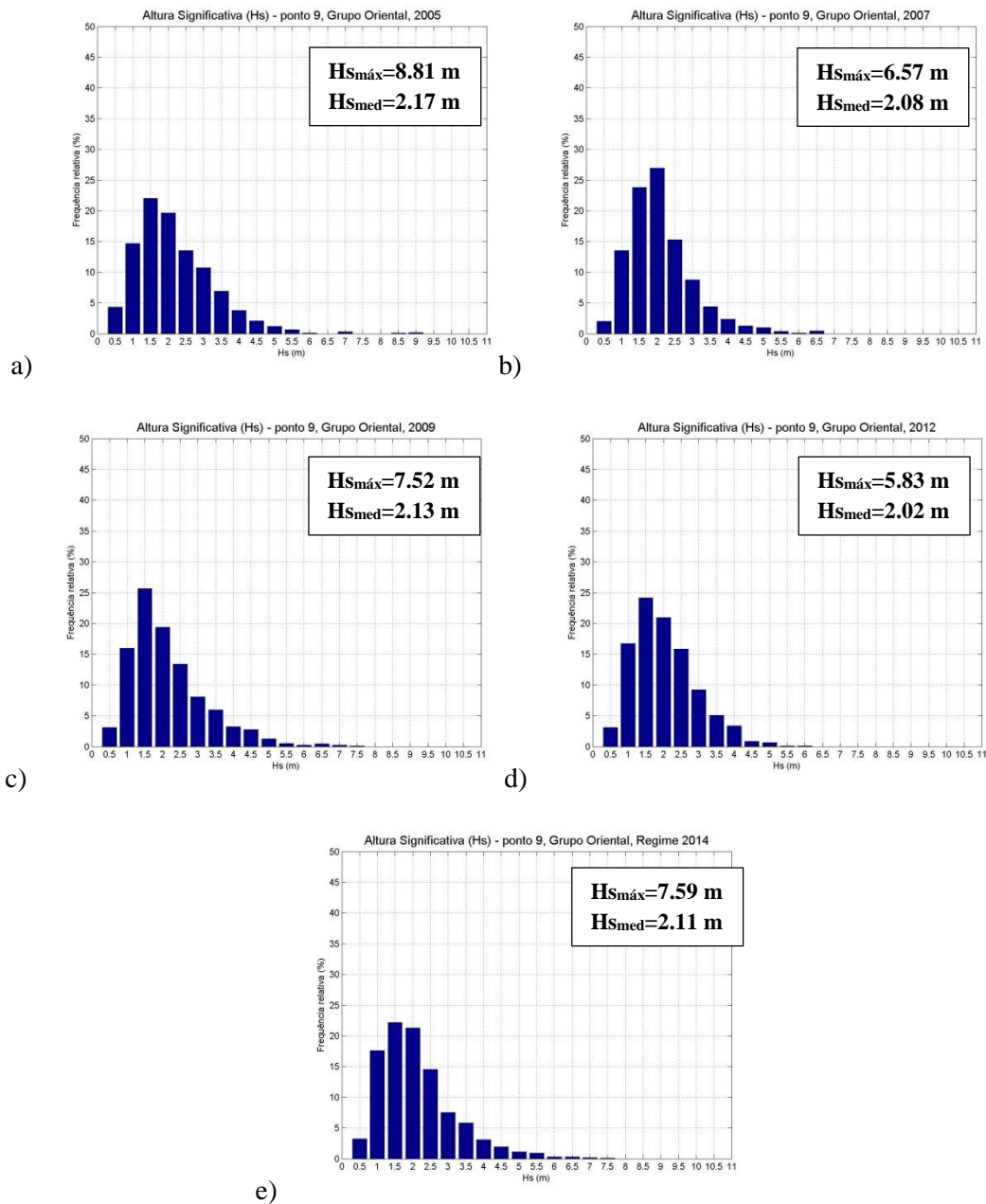
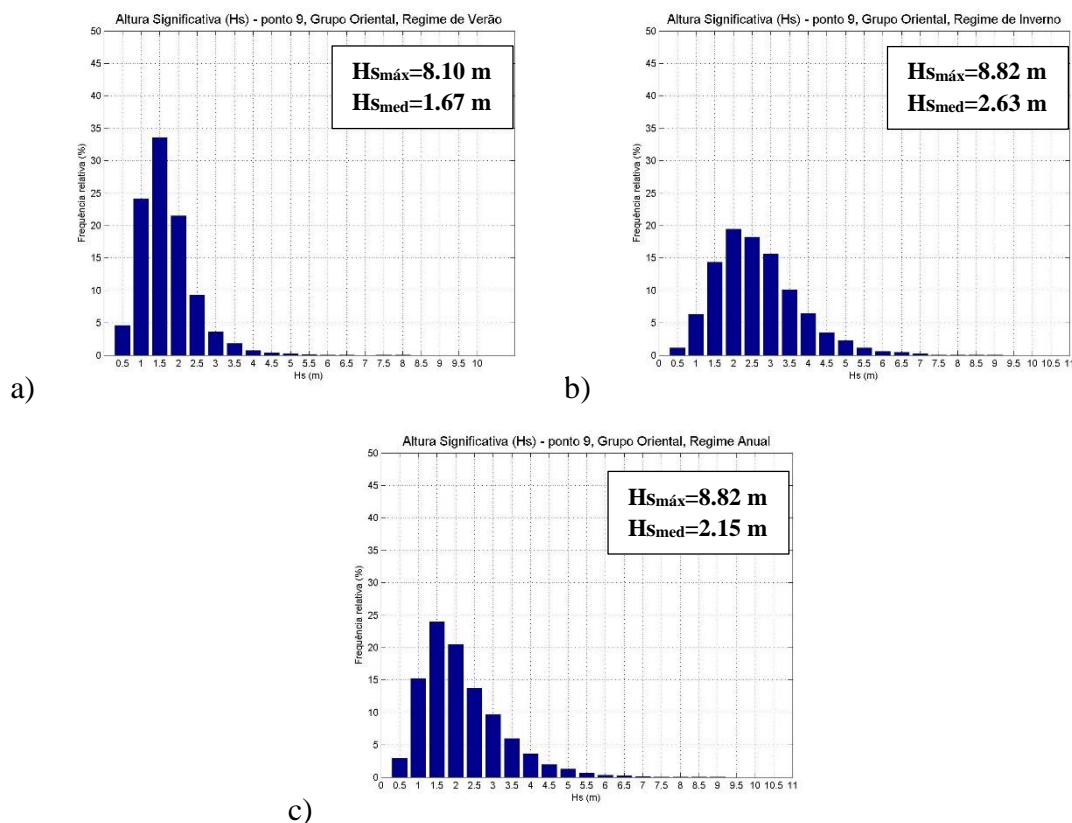


Figura 5.19. Frecuencia relativa da altura significativa. a) 2005. b) 2007. c) 2009. d) 2012. e) 2014

Observando a Figura 5.19, pode-se dizer que ao longo dos últimos dez anos não existem grandes variações na altura significativa, o que pode ser justificado com a média anual.

Na Figura 5.20 apresentam-se os histogramas de altura significativa para os meses de Verão, Inverno e dez anos.

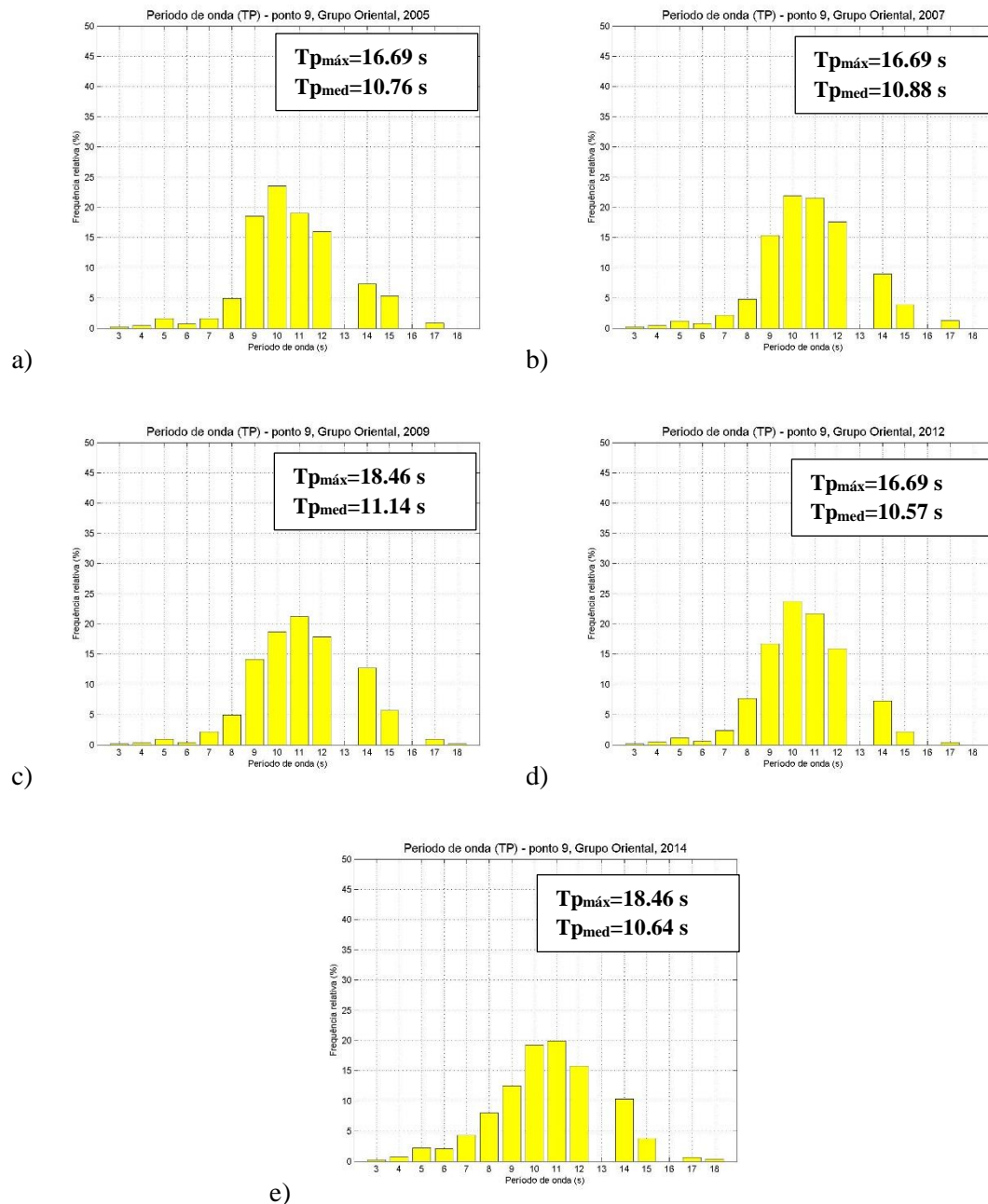


**Figura 5.20.** Frecuencia relativa da altura significativa. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno. c) Total

As diferenças existentes entre os regimes de Verão e Inverno podem ser observados na Figura 5.20. Tendo em conta os valores máximos e médios, pode-se dizer que ambos são superiores no Inverno. A distribuição dos valores de altura significativa no Inverno está mais distribuída que no Verão, abrangendo assim maiores alturas de onda com mais frequência.

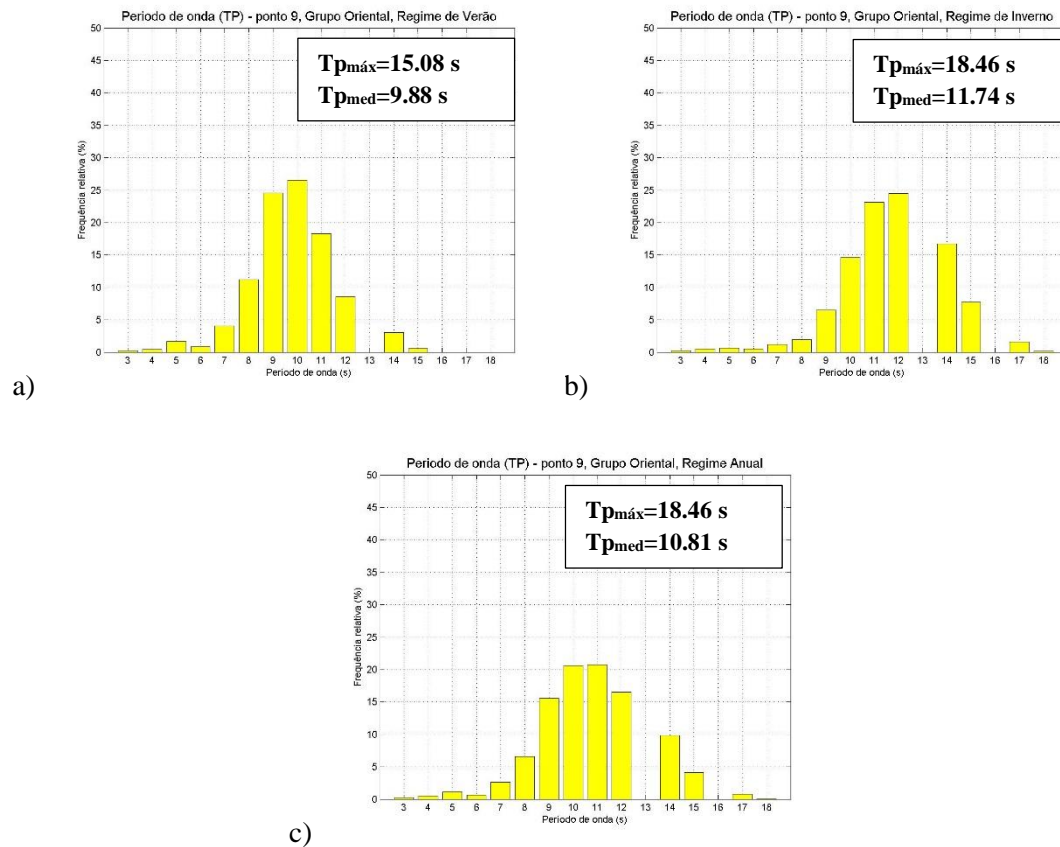
### 5.3.3.2. Período de pico

Na Figura 5.21 é possível observar-se a frequência relativa do período de pico para os anos de 2005, 2007, 2009, 2012 e 2014.



**Figura 5.21.** Frequência relativa do período de pico. a) 2005. b) 2007. c) 2009. d) 2012. e) 2014

Ao longo dos últimos dez anos, o período de pico aparenta não sofrer alterações significativas. Esta situação pode ser justificada a partir da Figura 5.21, em que as classes de maior ocorrência são as seguintes: [9-10], [10-11] e [11-12]. Na Figura 5.22 apresenta-se a frequência relativa do período de pico para os meses de Verão, Inverno e dez anos.

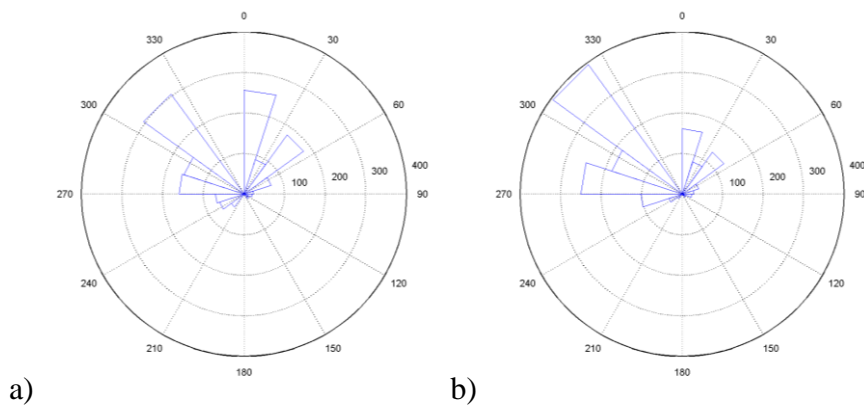


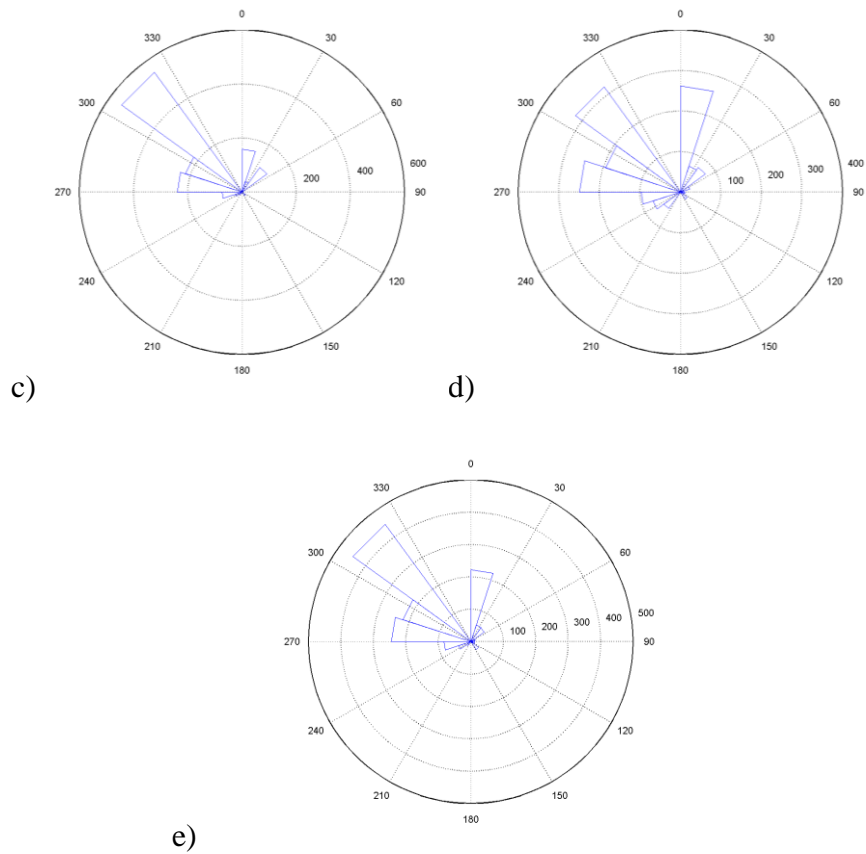
**Figura 5.22.** Frequência relativa do período de pico. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno. c) Total

No Inverno podemos observar que o período de pico ocorre sobretudo em classes superiores a 10 segundos e nos meses de Verão a situação inverte-se, estando estas classes maioritariamente abaixo dos 12 segundos (Figura 5.22).

### 5.3.3.3. Direção de onda

Na Figura 5.23 é possível observar-se a distribuição da direção de pico para os anos de 2005, 2007, 2009, 2012 e 2014.

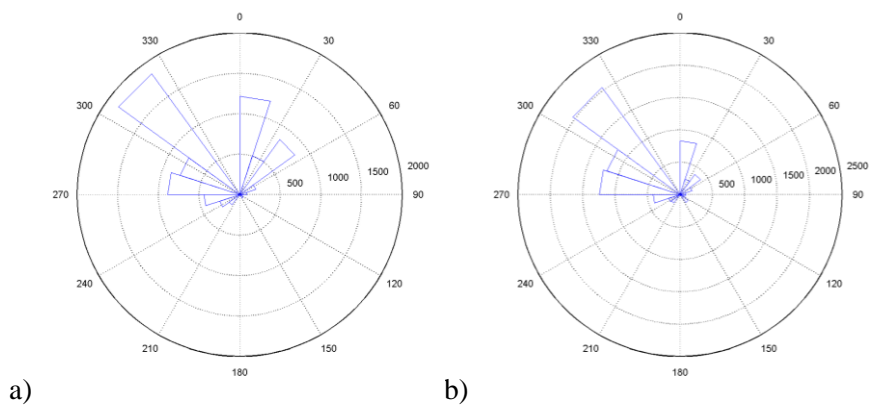


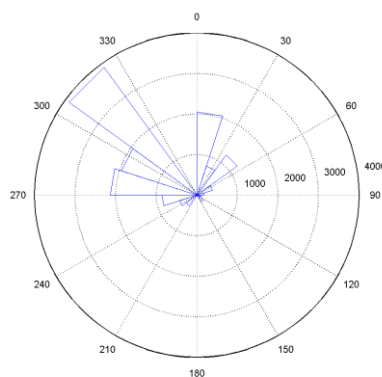


**Figura 5.23.** Distribuição da direção de pico das ondas. a) 2005. b) 2007. c) 2009. d) 2012. e) 2014

A distribuição da direção média das ondas, representada na Figura 5.23, encontra-se quase integralmente no quadrante limitado pelas direções de Oeste e Norte, sendo, na maior parte das vezes, correspondente à direção de Noroeste.

Na Figura 5.24 pode-se observar a distribuição de pico das ondas para os meses de Verão, Inverno e dez anos. No que diz respeito ao regime de Verão (Figura 5.24), para além da predominância de Noroeste, também se pode observar uma ocorrência significativa de Norte e Nordeste. No Inverno, a ocorrência com orientação do primeiro quadrante diminui, mantendo-se a predominância vinda de Noroeste.





c)

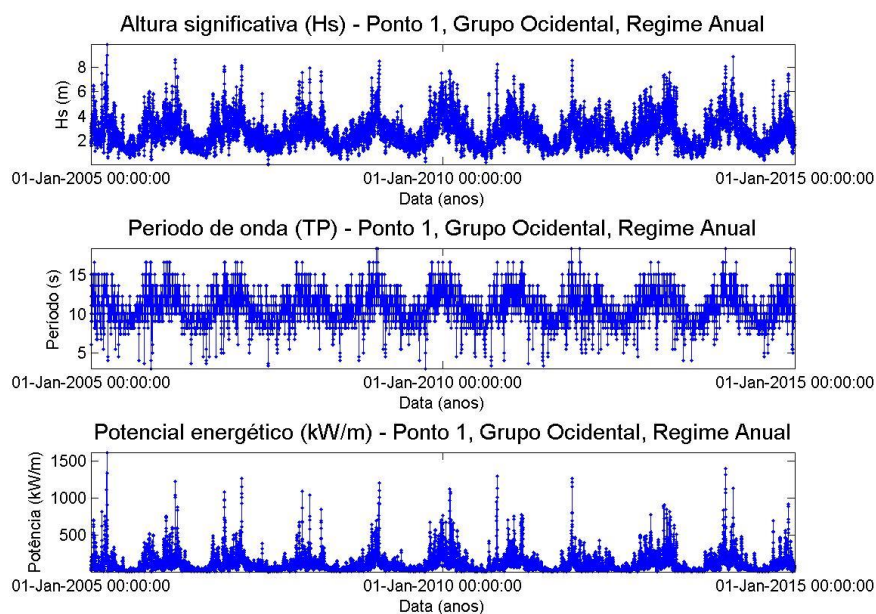
**Figura 5.24.** Distribuição da direção de pico das ondas. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno. c) Total

## 5.4. Avaliação da distribuição energética

Neste sub-capítulo serão abordados os resultados referentes ao cálculo da potência, através de representações da sua distribuição temporal em função de outros parâmetros, da sua frequência de ocorrência ao longo dos dez anos de regimes, da sua distribuição em função da direção de onda e, por fim, através de mapas de distribuição espacial.

### 5.4.1. Grupo Ocidental

Na Figura 5.25 apresenta-se a distribuição temporal dos parâmetros de altura significativa, período de pico e potência, para o período de tempo de 2005 a 2014.

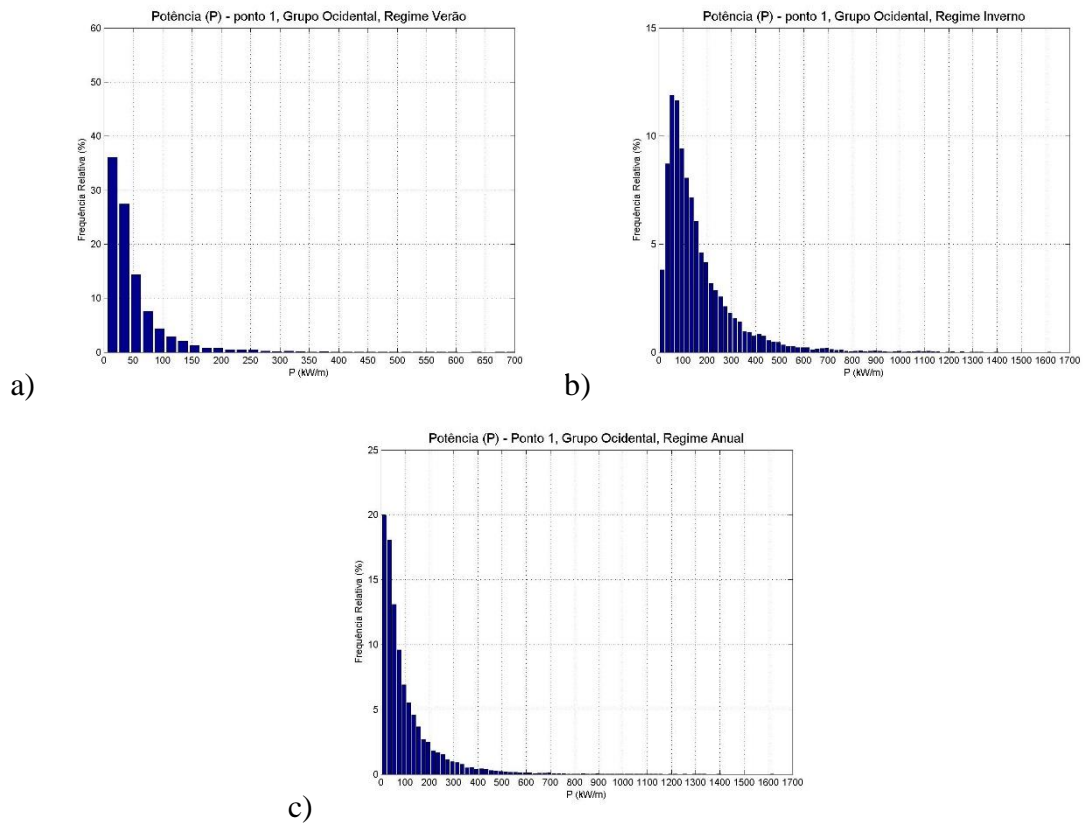


**Figura 5.25.** Distribuição temporal dos parâmetros de altura significativa de onda, período de pico e Potência.

Como se pode observar na Figura 5.25, existe uma relação direta entre a potência, altura significativa e período de pico, ou seja, pode dizer-se que as maiores variações da

potência ocorrem no mesmo intervalo de tempo da altura significativa e período de pico. É também de salientar que os picos máximos da potência coincidem com os picos máximos da altura significativa, justificando assim o facto de o potencial energético ser elevado quando ocorrem tempestades.

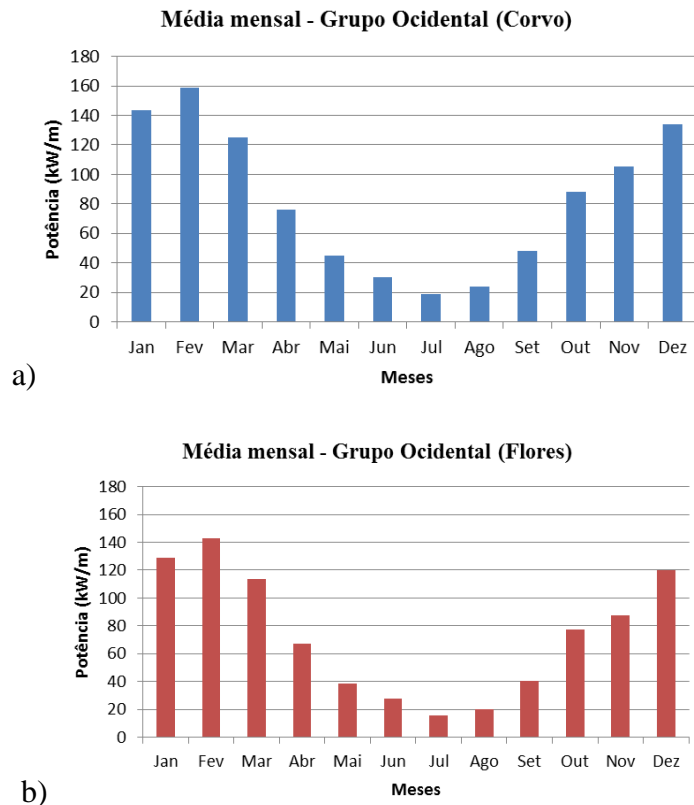
A frequência relativa da potência, para os meses de Verão, Inverno e dez anos, é demonstrada na Figura 5.26.



**Figura 5.26.** Frequência relativa da potência. a) Meses de Verão b) Meses de Inverno c) Total

Nos meses de Verão existe uma ocorrência predominante (mais de 50%) de valores entre os 0-50 kW/m. Ao contrário no Inverno, existe uma maior distribuição ao longo das classes, nomeadamente entre os 20-160 kW/m, com destaque para a maior ocorrência de valores nas classes [40-60] e [60-80] kW/m. Através da observação direta do Figura 5.26c, pode dizer-se que as classes de maior ocorrência ao longo dos últimos dez anos são: [0-20], [20-40] e [40-60] (kW/m).

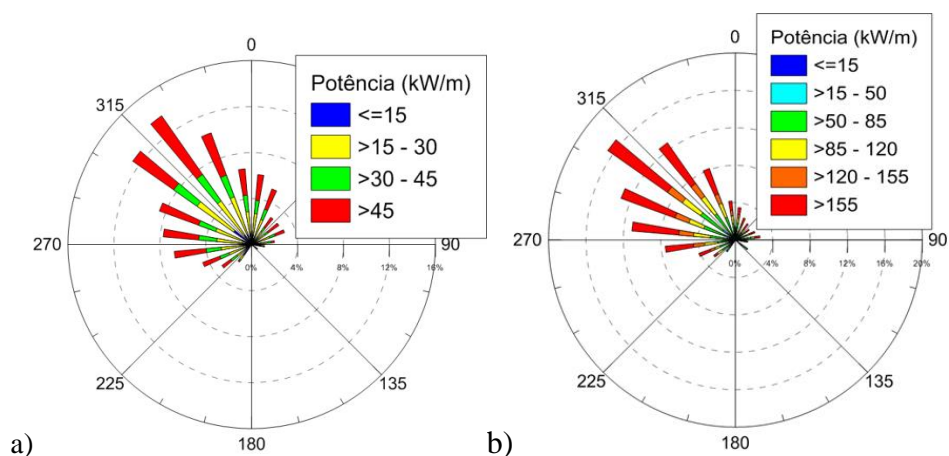
Na Figura 5.27 apresenta-se os regimes médios mensais da potência, nas ilhas de Flores e Corvo, para o período de tempo de 2005 a 2014.

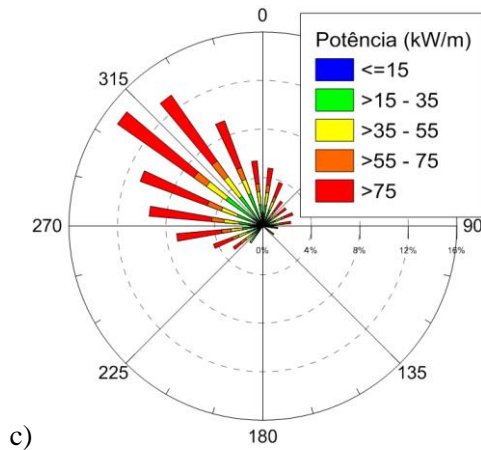


**Figura 5.27.** Regime médio mensal da potência em Corvo (a) e Flores (b) (Grupo Ocidental) (2005-2014).

Pode-se dizer que nos meses de Inverno (Janeiro, Fevereiro e Dezembro) existe uma maior disponibilidade energética enquanto nos meses de Verão (Junho, Julho e Agosto) acontece exactamente o oposto, onde o recurso energético é sem dúvida menor.

Na Figura 5.28 apresenta-se a distribuição da direção de pico das ondas em função da potência para os meses de Verão, Inverno e para o total dos dez anos.

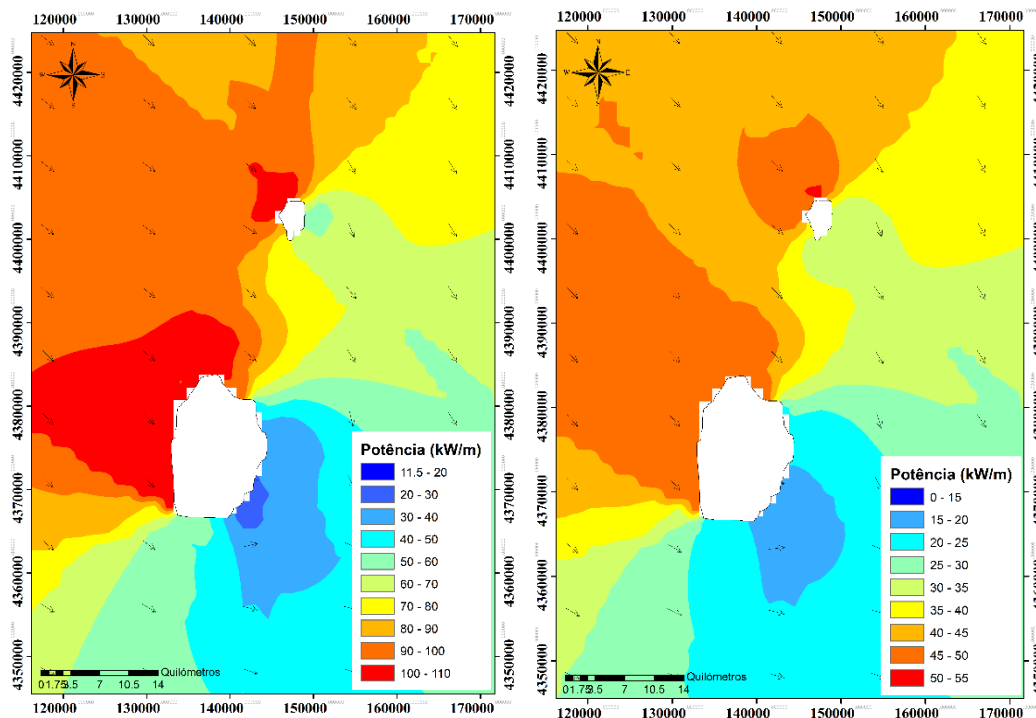


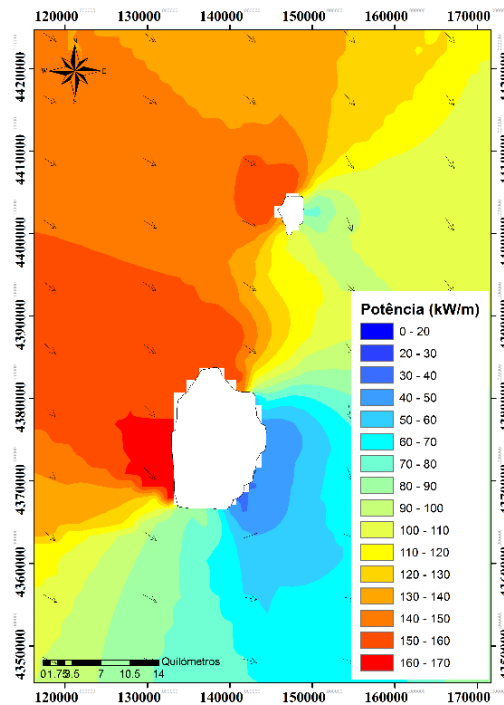


**Figura 5.28.** Distribuição da direção de pico das ondas em função da potência. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno. c) Total

A direção predominante neste ponto é de Noroeste, com exceção no Inverno que se aproxima mais de Oeste. Como se pode observar na Figura 5.28, a relação entre a direção de pico e a potência diz-nos que no geral existe uma maior disponibilidade do recurso energético com orientação de Noroeste.

Todas as comparações efetuadas desde Figura 5.25 à Figura 5.28, vêm justificar os mapas de distribuição espacial do potencial energético no Grupo Ocidental do Arquipélago dos Açores que se apresentam na Figura 5.29. Quer no regime de Verão quer no regime de Inverno, a costa Oeste-Norte da Ilha do Corvo e das Flores, são significativamente afetadas pela direção predominante de Noroeste, ou seja, nesta zona vamos encontrar uma maior disponibilidade do recurso energético.

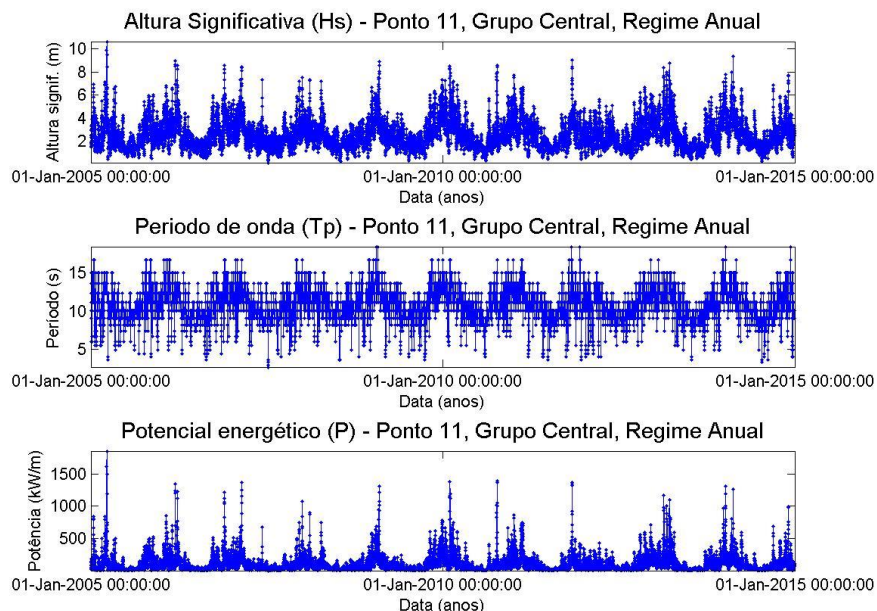




**Figura 5.29.** Distribuição espacial média da potência em conjunto com a direção de pico no Grupo Ocidental. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno. c) Total

#### 5.4.2. Grupo Central

Na Figura 5.30 apresenta-se a distribuição temporal dos parâmetros de altura significativa, período de pico e potência, para o período de tempo de 2005 a 2014.

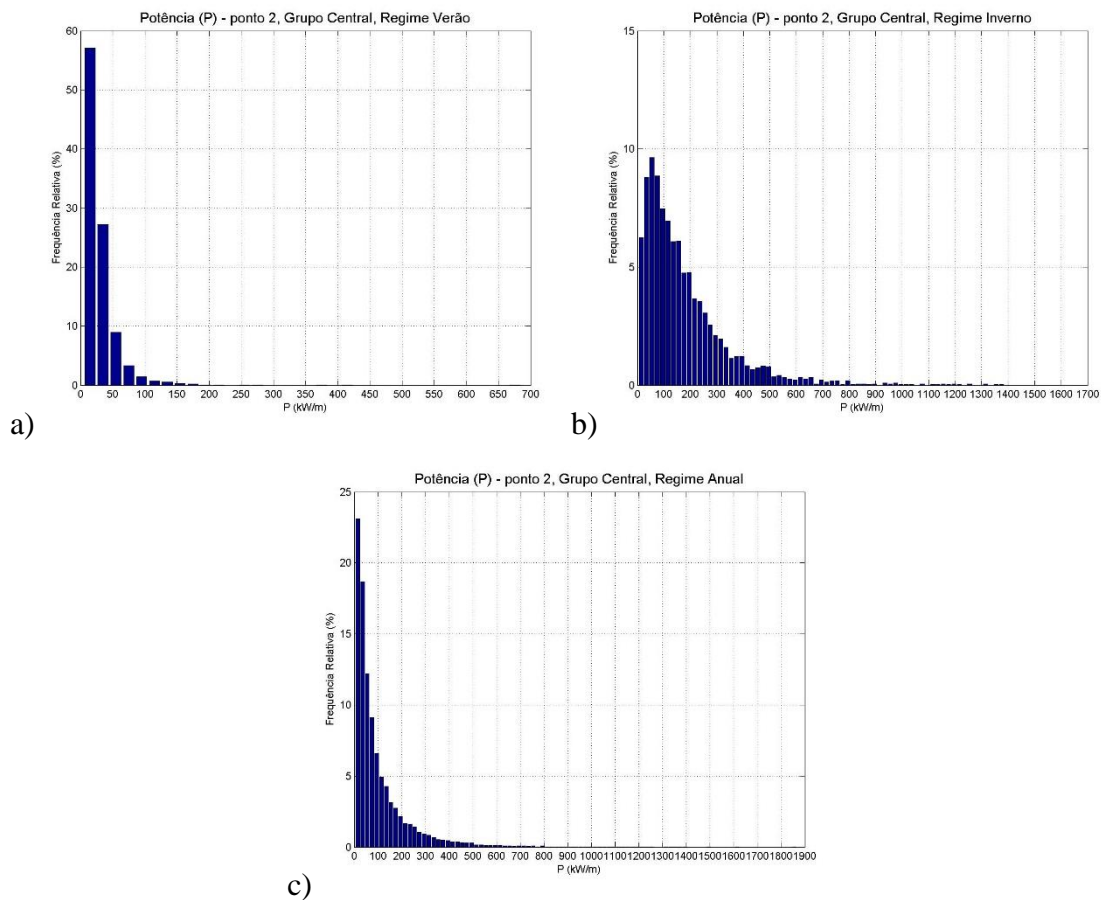


**Figura 5.30.** Distribuição temporal dos parâmetros de altura significativa de onda, período de pico e potência.

Como se pode observar na Figura 5.30, existe uma correlação entre a potência, altura significativa e período de pico, ou seja, pode dizer-se que as maiores variações da

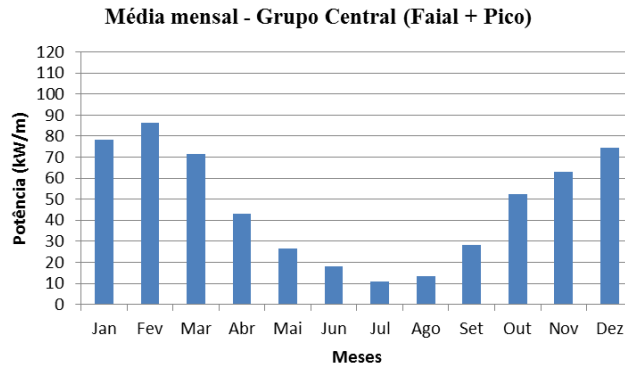
potência ocorrem no mesmo intervalo de tempo da altura significativa e período de pico, tal como já foi mencionado na análise ao Grupo Ocidental.

A distribuição anual relativa da potência é apresentada na Figura 5.31. Nos meses de Verão existe uma ocorrência predominante (acima dos 50%) entre os valores de 0-50 kW/m. No Inverno, existe uma maior distribuição ao longo das classes, nomeadamente entre os 0-140 kW/m, com destaque para a maior ocorrência de valores nas classes [20-40], [40-60] e [60-80] kW/m. Através da observação direta da Figura 5.31c, pode dizer-se que as classes de maior ocorrência ao longo dos últimos dez anos são: [0-20], [20-40] e [40-60] (kW/m).



**Figura 5.31.** Frequência relativa da potência. a) Meses de Verão b) Meses de Inverno c) Total

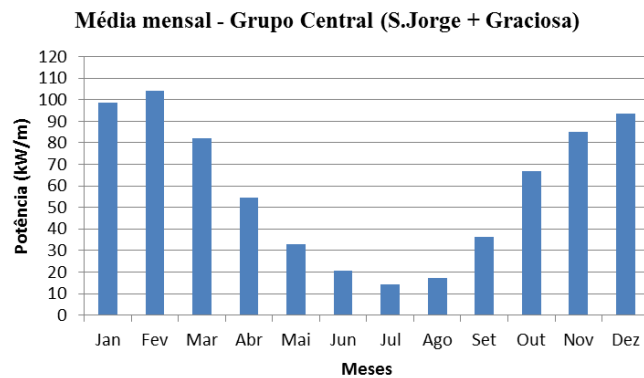
Devido ao elevado número de ilhas no Grupo Central, preparou-se 3 sub-grupos: Faial/Pico, São Jorge/Graciosa e Terceira. Estes sub-grupos foram criados a partir da média mensal dos principais pontos (Norte, Este, Sul e Oeste) ao largo das ilhas que compõem o Grupo Central. Assim sendo, pode-se então observar na Figura 5.32 a média mensal para os dez anos.



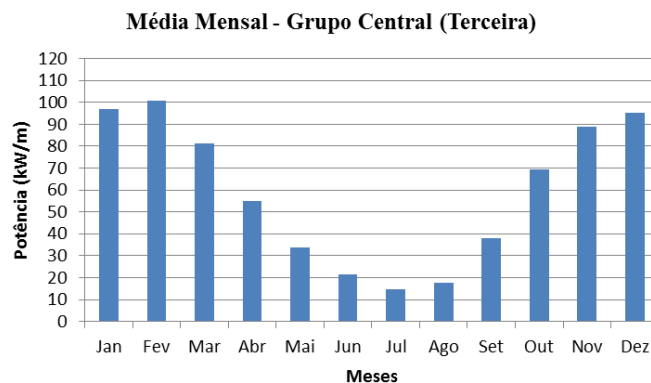
**Figura 5.32.** Regime médio mensal da potência no conjunto Faial/Pico (2005-2014).

É permitido dizer que nos meses de Inverno existe uma maior disponibilidade energética, atingindo valores médios entre os 70-80 kW/m, enquanto que nos meses de Verão, onde o recurso energético é significativamente menor, consegue-se atingir valores médios acima dos 15 kW/m em Abril, Maio, Junho e Setembro.

No que diz respeito aos sub-grupos São Jorge/Graciosa (Figura 5.33) e à Ilha Terceira (Figura 5.34), pode-se dizer também que os meses de Inverno, comparativamente aos meses de Verão, apresentam maior disponibilidade energética, atingindo valores médios de cerca de 100 kW/m. Nos meses de Verão, só o mês de Julho não atinge os 15 kW/m.

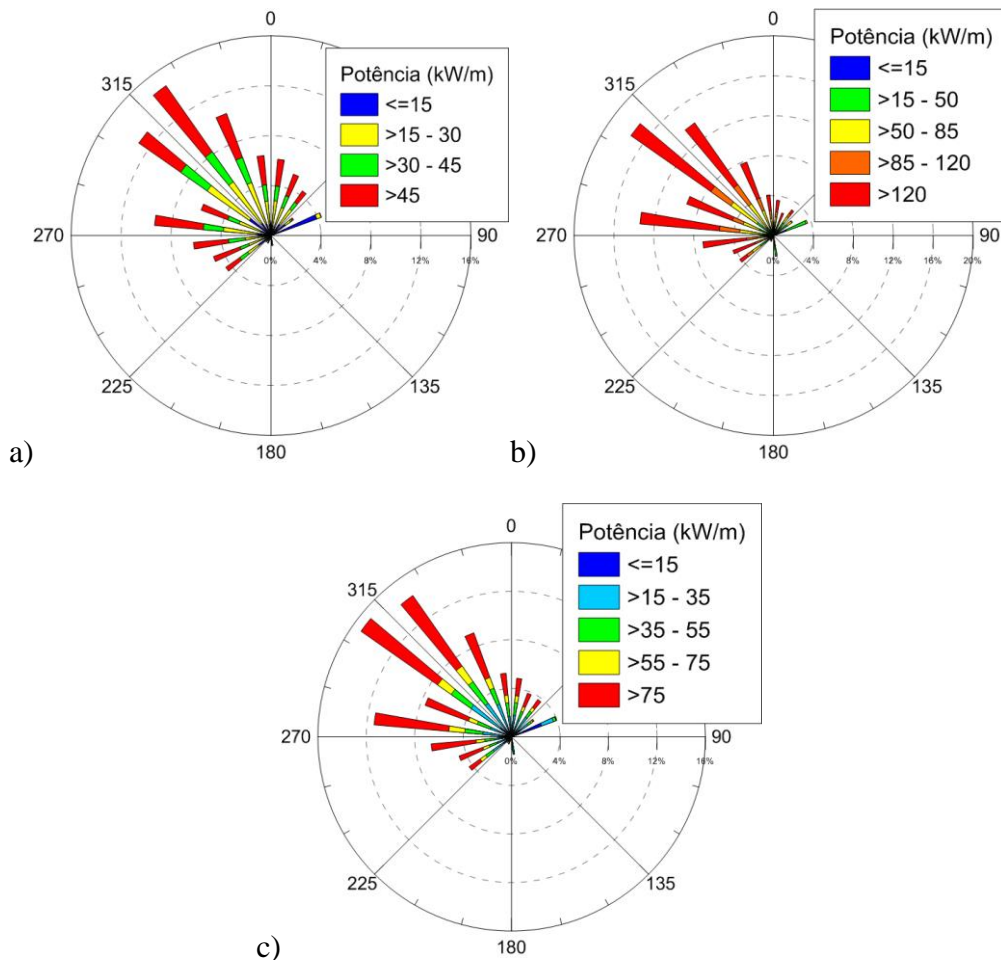


**Figura 5.33.** Regime médio mensal da potência no conjunto S.Jorge/Graciosa (2005-2014).



**Figura 5.34.** Regime médio mensal da potência na Ilha Terceira (2005-2014).

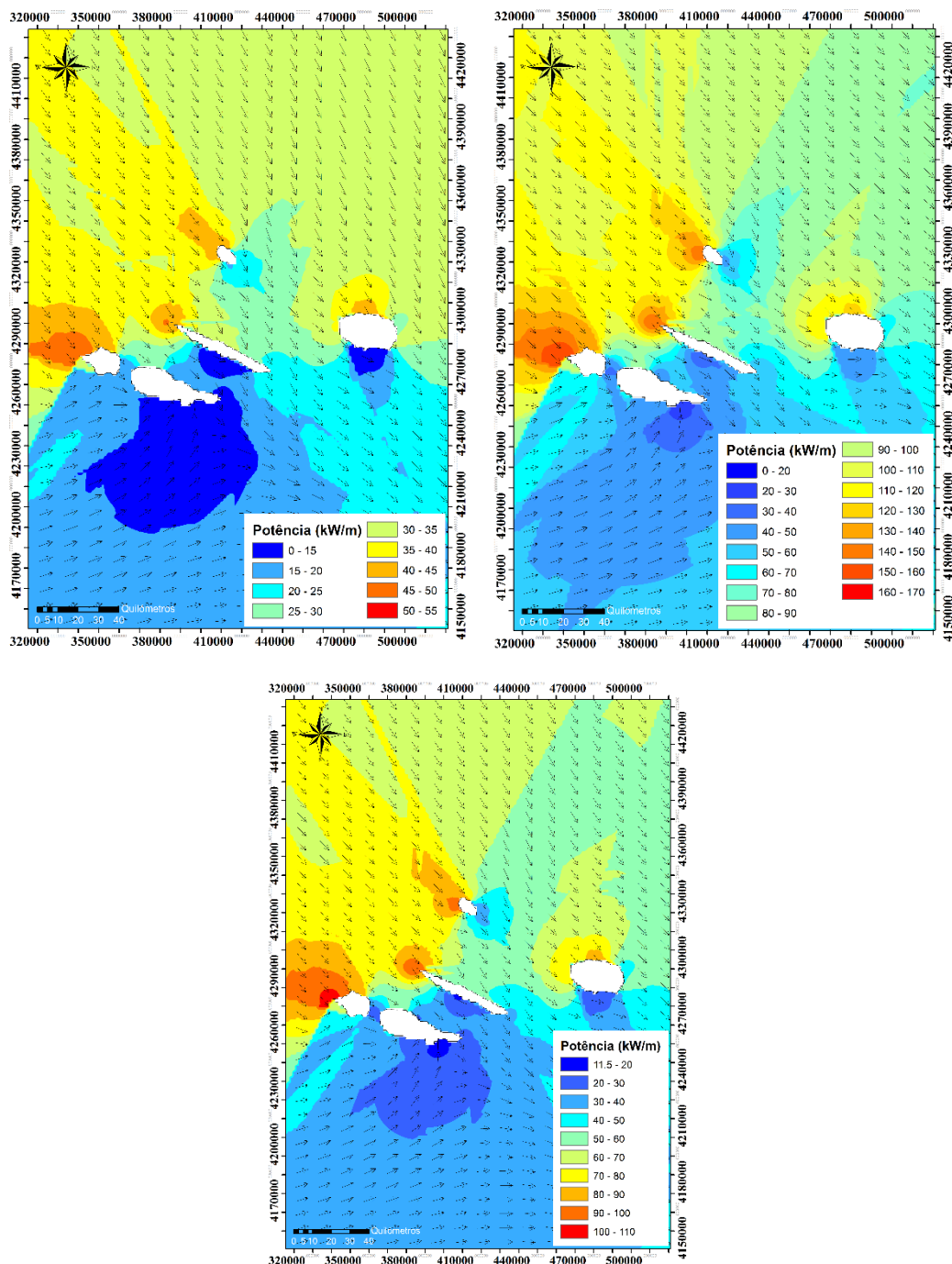
Em suma, pode-se concluir que para os sub-grupos mencionados anteriormente, os valores de Inverno são, significativamente, maiores que os valores correspondentes aos meses de Verão. Nos meses de Inverno pode-se observar valores médios de potencial entre os 30 e 100 kW/m e nos meses de Verão valores médios entre os 10 e 50 kW/m. De seguida, pode-se observar diagramas polares relativos ao ponto 11 do Grupo Central (Figura 5.35), onde são representadas as distribuições da direção de pico das ondas em função da potência para os meses de Verão, Inverno e para o total dos dez anos.



**Figura 5.35.** Distribuição da direção de pico das ondas em função da potência. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno. c) Total

A direção predominante neste ponto é de Noroeste, com exceção no Inverno que se aproxima mais de Oeste. Como se pode observar na Figura 5.35, a relação entre a direção de pico e a potência diz-nos que no geral existe uma maior disponibilidade do recurso energético com orientação de Noroeste.

Todas as comparações efetuadas desde a Figura 5.30 à Figura 5.35 vêm justificar os mapas de distribuição espacial do potencial energético no Grupo Central do Arquipélago dos Açores na Figura 5.36.



**Figura 5.36.** Distribuição espacial média da potência em conjunto com a direção de pico no Grupo Central. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno. c) Total

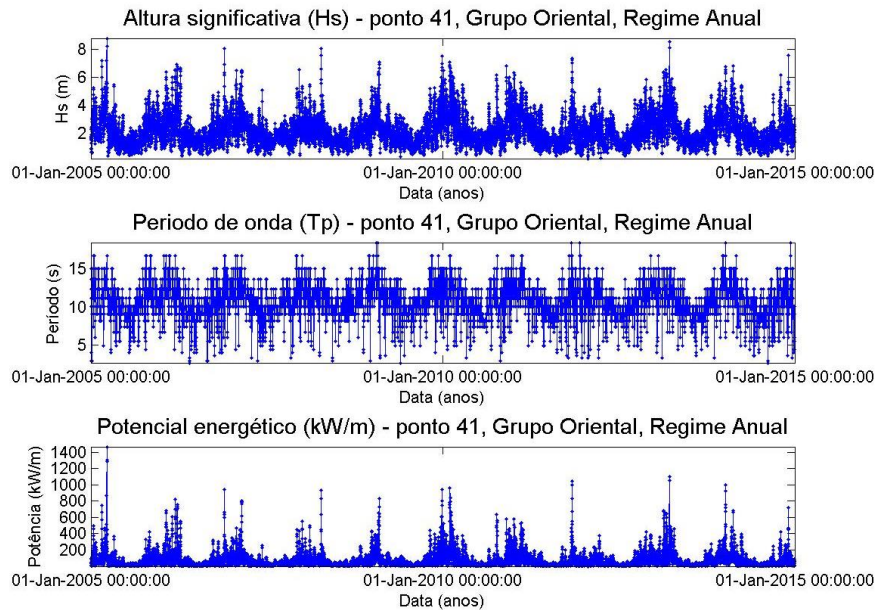
Quer no regime de Verão quer no regime de Inverno, a costa Oeste-Norte da Ilha do Faial, São Jorge, Graciosa e Terceira são significativamente afetadas pela direção predominante de Noroeste, ou seja, nesta zona vamos encontrar uma maior disponibilidade do recurso energético.

Em relação à Ilha do Pico, esta encontra-se “protegida” pelo Faial e São Jorge, fazendo assim com que ondas que tenham percorrido longas distâncias, não tenham a mesma intensidade quando chegam à ilha. Pode-se concluir que as costas Oeste e Norte,

com exceção do Pico, possuem ao largo valores médios anuais de potencial energético entre os 80 e os 100 kW/m. No que diz respeito às zonas mais abrigadas, estes valores variam entre os 0 e 30 kW/m.

### 5.4.3. Grupo Oriental

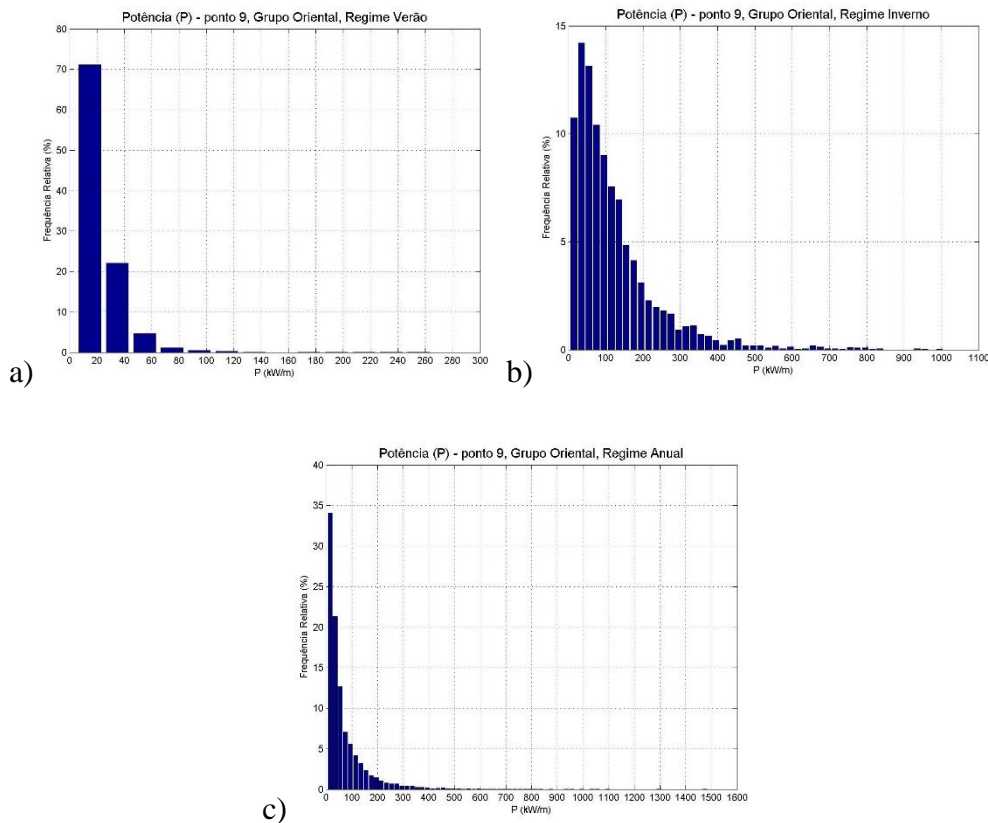
Na Figura 5.37 apresenta-se a distribuição temporal dos parâmetros de altura significativa, período de pico e potência, para o período de tempo de 2005 a 2014.



**Figura 5.37.** Distribuição temporal dos parâmetros de altura significativa de onda, período de pico e potência.

Ao observar-se a Figura 5.37, é permitido dizer que existe uma relação intrínseca entre a altura significativa de onda, o período de pico e a potência. Mais uma vez é de salientar o fato dos picos máximos da potência coincidirem com os picos máximos da altura significativa, justificando assim o facto de o potencial energético ser elevado quando ocorrem tempestades. Os valores da potência que se encontram distribuídos ao longo dos dez anos, para este ponto, são relativamente menores comparativamente aos pontos analisados anteriormente.

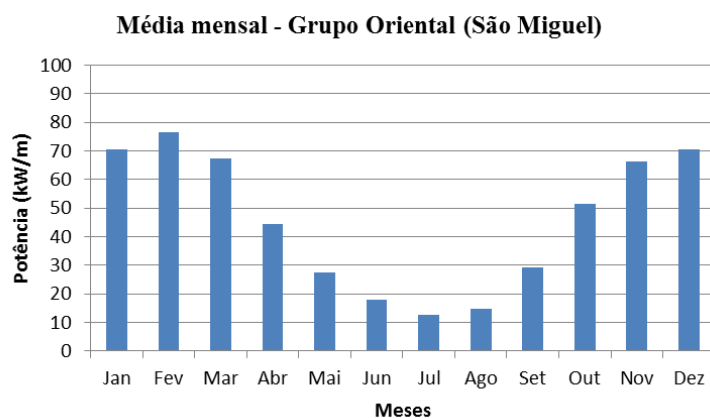
A Frequência relativa da potência é demonstrada na Figura 5.38 para os meses de Verão, Inverno e para o período de tempo de 2005 a 2014.



**Figura 5.38.** Frequência relativa da potência. a) Meses de Verão b) Meses de Inverno c) Total

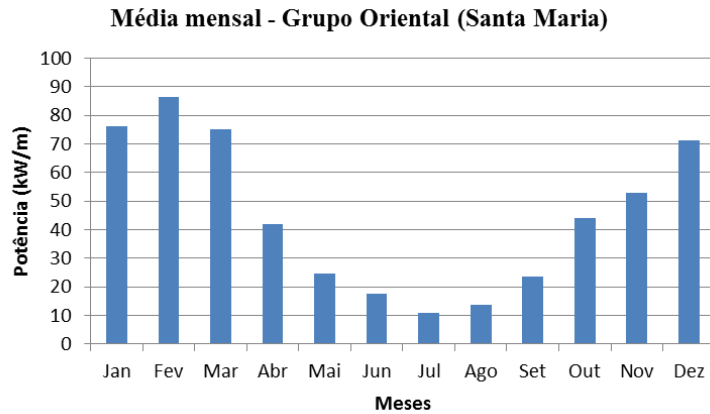
Nos meses de Verão existe uma ocorrência predominante (acima dos 50%) na classe dos [0-25] kW/m. Ao contrário no Inverno, existe uma maior distribuição ao longo das classes, nomeadamente entre os 0-100 kW/m, com destaque para a maior ocorrência de valores nas classes [0-20], [20-40] e [40-60] kW/m. Através da observação direta da Figura 5.38c, pode dizer-se que as classes de maior ocorrência ao longo dos últimos dez anos são: [0-20] e [20-40] kW/m.

Nas Figura 5.39 e Figura 5.40 é possível observar-se o regime médio mensal da potência para as ilhas de São Miguel e Santa Maria respetivamente.



**Figura 5.39.** Regime médio mensal da potência em São Miguel, Grupo Oriental (2005-2014).

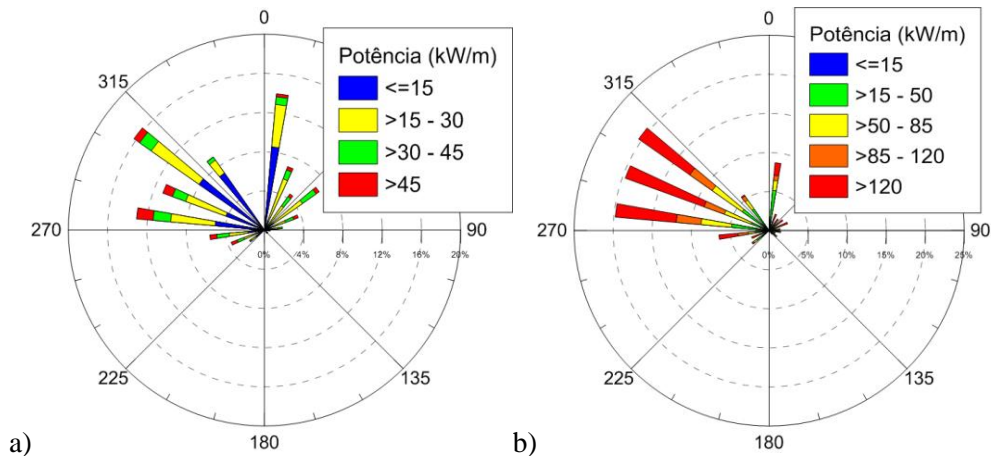
No que diz respeito à média mensal da Ilha de São Miguel, pode dizer-se que nos meses de Inverno existe uma maior disponibilidade do recurso energético, atingindo valores médios entre os 50-75 kW/m, enquanto que nos meses de Verão, onde o recurso energético é inegavelmente menor, consegue-se atingir valores médios acima dos 15 kW/m, podendo atingir até 45 kW/m em Abril, Maio, Junho e Setembro.

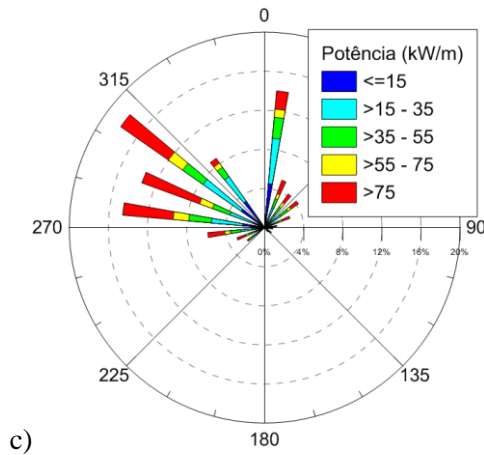


**Figura 5.40.** Regime médio mensal da potência em Santa Maria, Grupo Oriental (2005-2014).

Em relação à Ilha de Santa Maria (Figura 5.40), é permitido dizer que a análise efectuada para a Figura 5.39 é aplicada aqui também. Quer isto dizer que no Inverno tem-se valores entre os 45 e 85 kW/m e no Verão valores entre os 10 e 40 kW/m.

Na Figura 5.41, referente ao ponto 41 do Grupo Oriental, são representadas as distribuições da direção de pico das ondas em função da potência para os meses de Verão, Inverno e para o total dos dez anos.

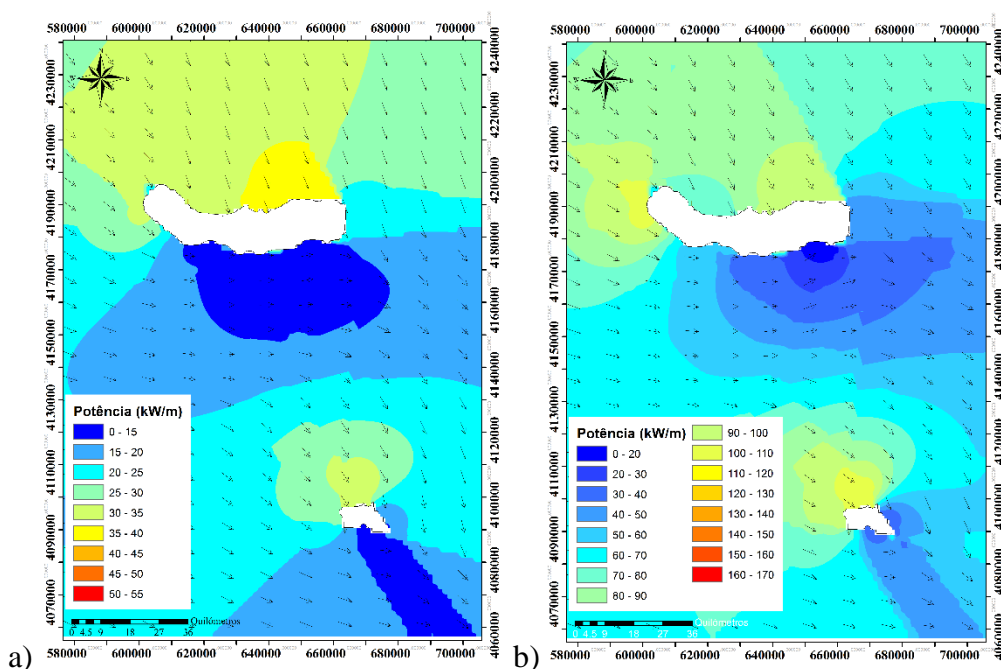


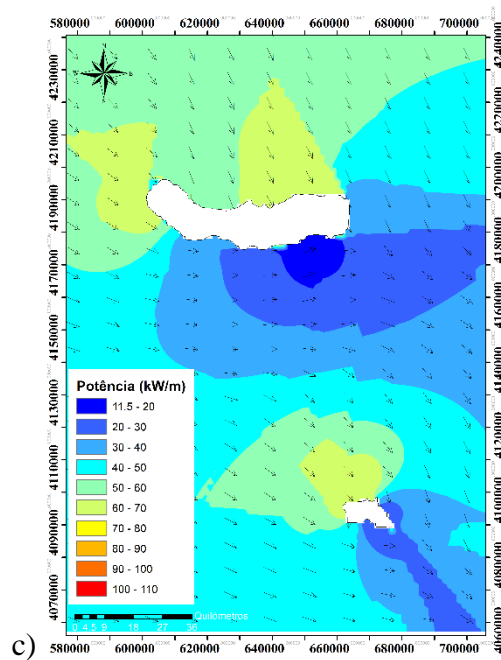


**Figura 5.41.** Distribuição da direção de pico das ondas em função da potência. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno. c) Total

No que diz respeito às direções, a direção predominante neste ponto é de Noroeste e Norte, com exceção no Inverno onde a predominância recai entre os 270 e 315 graus. Como se pode observar na Figura 5.41, a relação entre a direção de pico e a potência diz-nos que no geral existe uma maior disponibilidade do recurso energético com orientação de Noroeste.

Todas as comparações efetuadas desde a Figura 5.37 à Figura 5.41 vêm justificar os mapas de distribuição espacial do potencial energético no Grupo Oriental do Arquipélago dos Açores na Figura 5.42. Nos meses de Verão pode-se observar valores médios da potência entre os 30 e 40 kW/m a Norte-Oeste e entre os 0-25 kW/m a Sul-Este de São Miguel.





**Figura 5.42.** Distribuição espacial média da potência em conjunto com a direção de pico no Grupo Oriental. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno. c) Total

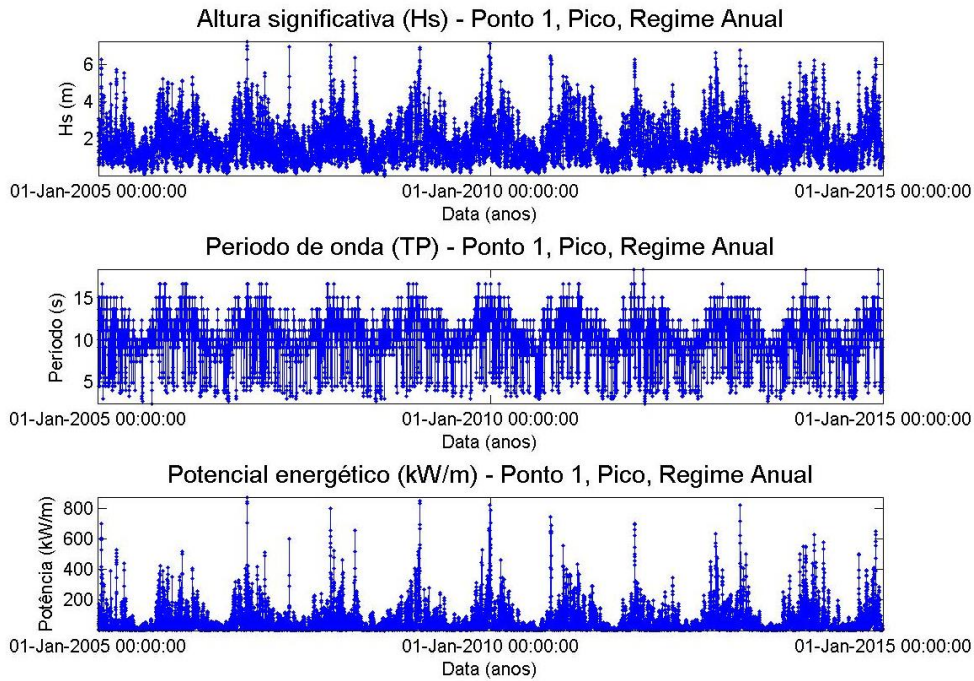
Nos meses de Inverno estes valores médios ocorrem entre os 80 e 110 kW/m a Norte-Oeste e entre 0-60 kW a Sul-Este. Por fim, no que diz respeito ao regime médio anual, ao largo da costa Norte-Oeste os valores abundantes ocorrem entre os 40-60 kW/m e ao largo da costa Sul-Este entre 0 e 40 kW/m.

#### 5.4.4. Estruturas Marítimas

Neste sub-capítulo serão abordados os casos referentes às zonas ao largo da central do Pico e do porto de Ponta Delgada. Serão também representados resultados em função das várias profundidades medidas (10, 30 e 50 m de profundidade), com exceção das que correspondem ao ponto mais próximo dos respetivos locais.

##### 5.4.4.1. Porto Cachorro - Pico

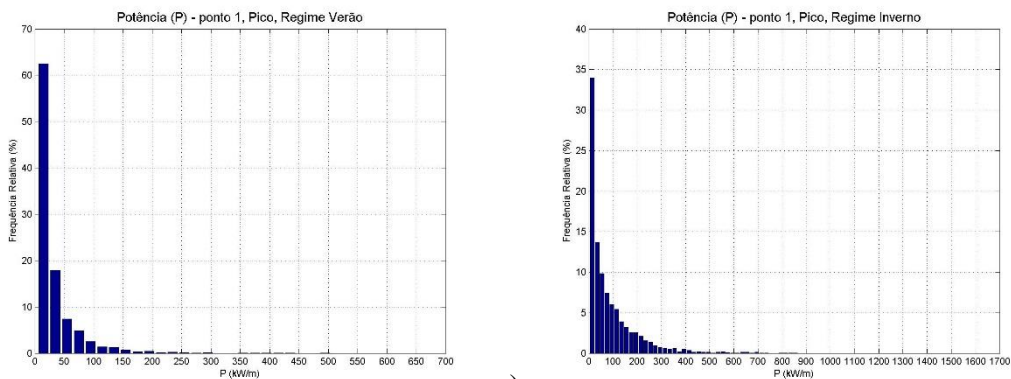
Na Figura 5.43, é possível observar-se a distribuição temporal de alguns parâmetros já mencionados neste capítulo: altura significativa, período de pico e potencial energético.



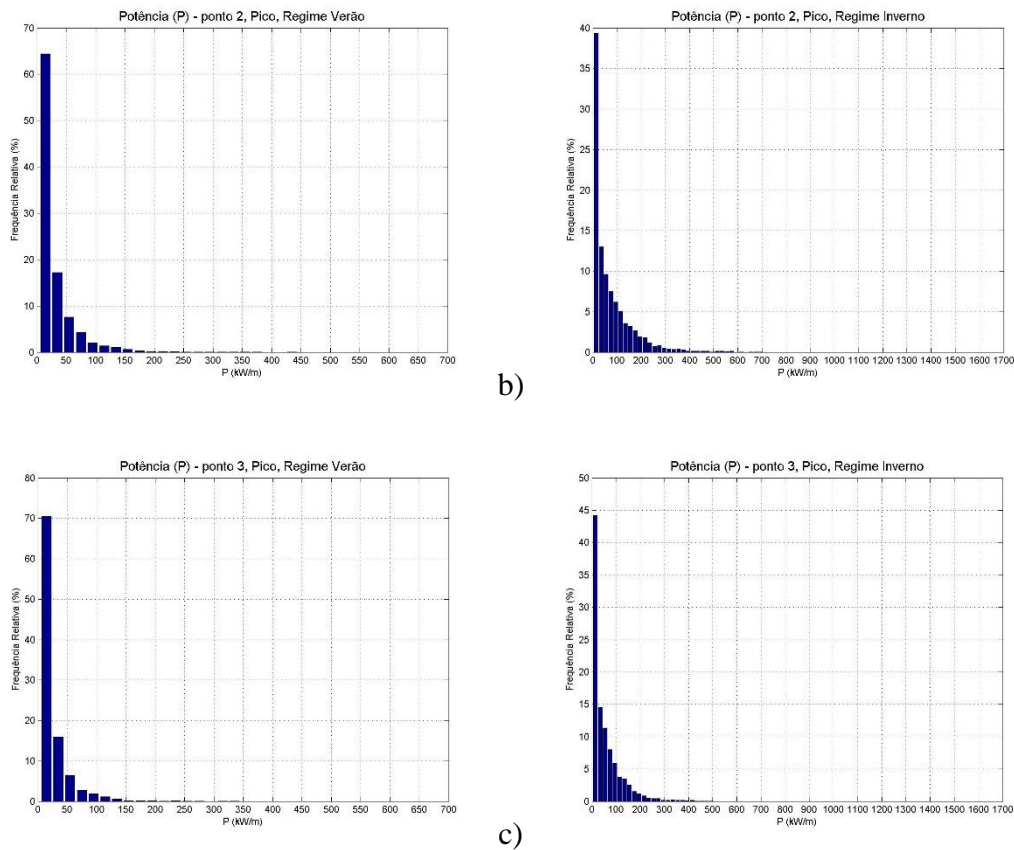
**Figura 5.43.** Distribuição temporal da altura significativa, período de pico e potência para o ponto 1 do Pico (10 metros profundidade).

Pode-se observar na figura acima a relação direta entre o comportamento da potência, altura de onda e período. Ao longo dos dez anos dá-se a ocorrência de vários máximos, correspondentes ao regime de Inverno, chegando-se a ultrapassar a “barreira” dos 800 kW/m e atingido o valor máximo de 985.5 kW/m (Tabela A 3.2). Os valores da potência que se encontram distribuídos ao longo dos dez anos, apresentam uma média de 52.1 kW/m, como também se pode observar em anexo (Tabela A 3.9).

A Frequência relativa da potência para os regimes de Verão e Inverno é apresentada na Figura 5.44 em profundidades de 10, 30 e 50 metros.



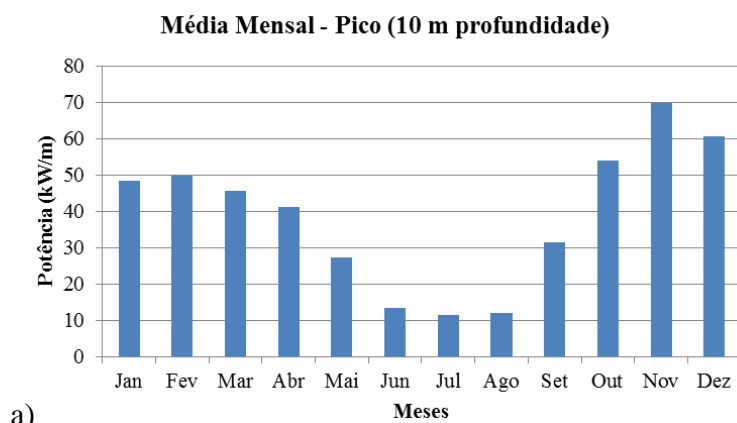
a)



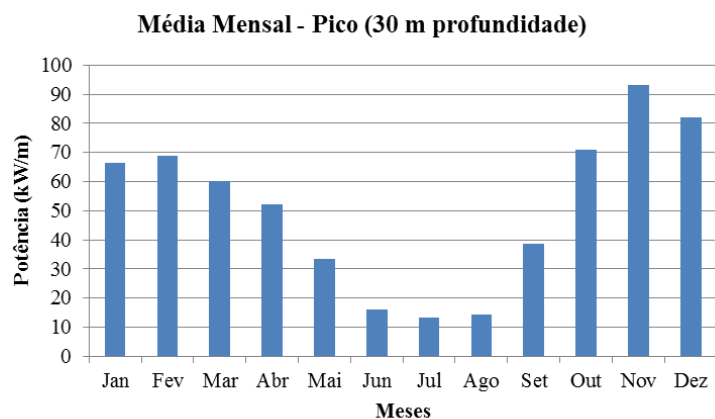
**Figura 5.44.** Frequência relativa da potência para os regimes de Verão e Inverno. a) Profundidade a 50 metros. b) Profundidade a 30 metros. c) Profundidade a 10 metros.

É possível concluir que nos meses de Verão existe uma óbvia predominância (acima de 50%) da classe de valores [0-25] kW/m. No Inverno existe uma maior distribuição das classes de valores, no entanto, o intervalo de valores também aqui predominante é dos 0 aos 20 kW/m. Em ambos os regimes, esta predominância aumenta à medida que se vai aproximando da costa.

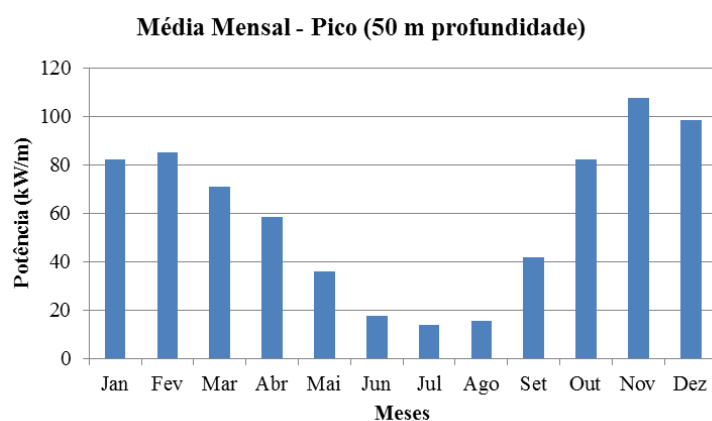
Na Figura 5.45 pode-se observar os valores médios mensais para as diferentes profundidades em estudo.



a)



b)

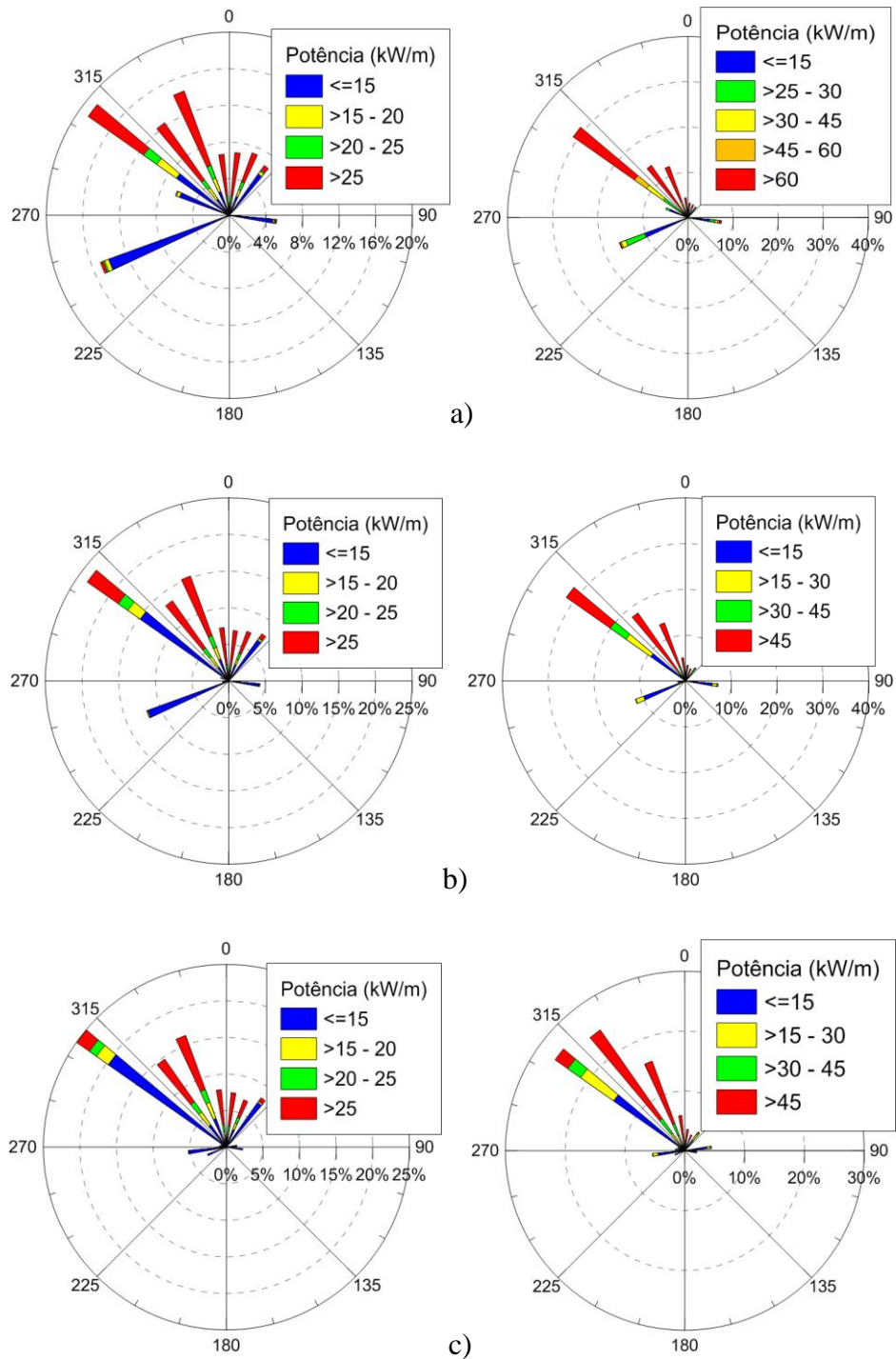


c)

**Figura 5.45.** Regime médio mensal da potência. a) Profundidade a 10 metros. b) Profundidade a 30 metros. c) Profundidade a 50 metros.

A análise aos regimes de Inverno e de Verão mostra que existe uma diferença significativa de valores em ambos. No Inverno vê-se médias entre os 45 e 100 kW/m e no Verão valores entre os 10 e 60 kW/m. Com a aproximação à costa, os valores médios tendem a diminuir em ambos os regimes.

Na Figura 5.46 são representadas as distribuições da direção de pico das ondas em função da potência para os meses de Verão e Inverno, referente às diferentes profundidades em estudo.

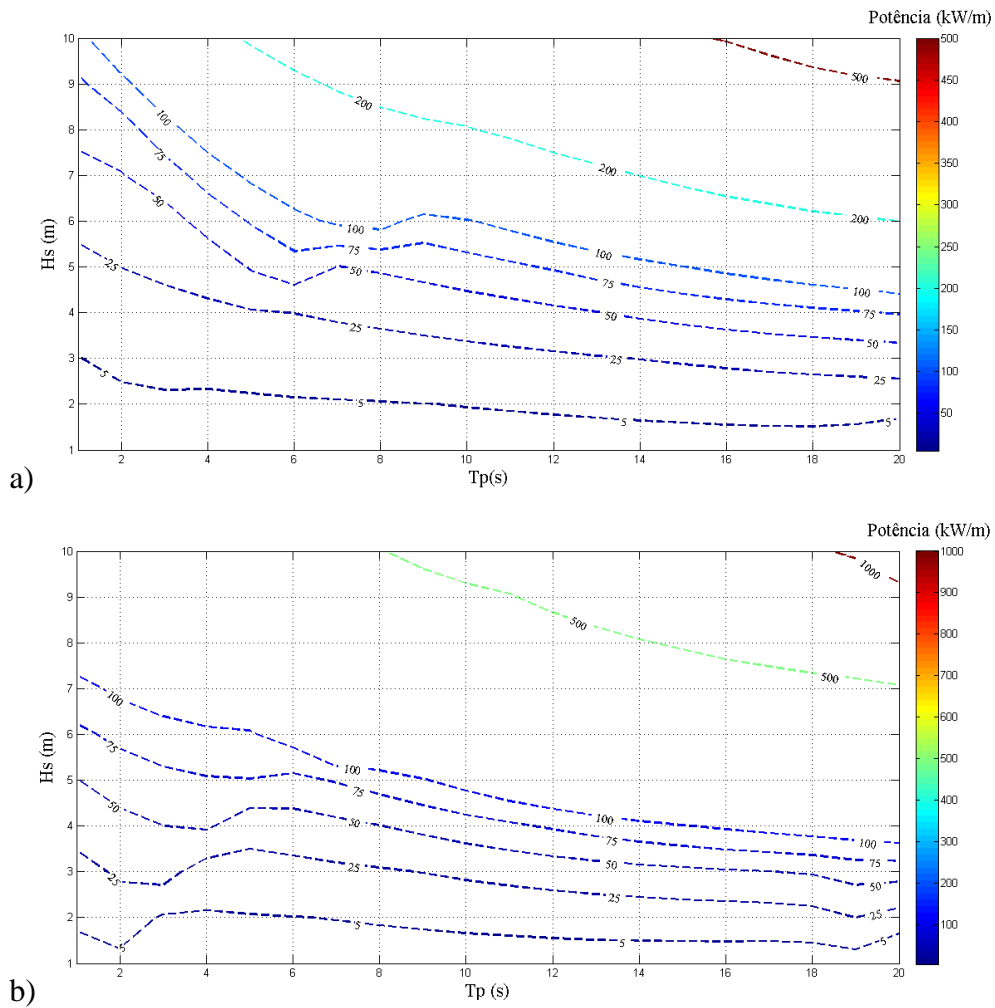


**Figura 5.46.** Distribuição da direção de pico das ondas em função da potência (Verão à esquerda; Inverno à direita).  
 a) Profundidades a 50 metros. b) Profundidades a 30 metros. c) Profundidades a 10 metros.

Ao largo do Pico durante os meses de Verão, é visível uma maior distribuição das direções de pico de onda comparativamente aos meses de Inverno, predominando em ambas orientações de Noroeste. Relativamente à potência, a disponibilidade desta é maior nos meses de Inverno em comparação com os meses de Verão. Na profundidade de 50 m (Figura 5.46a) atinge-se valores acima dos 25 kW/m no Verão e acima dos 60 kW/m no Inverno. Para as profundidades de 10 e 30 m (Figura 5.46b e Figura 5.46c), no Verão,

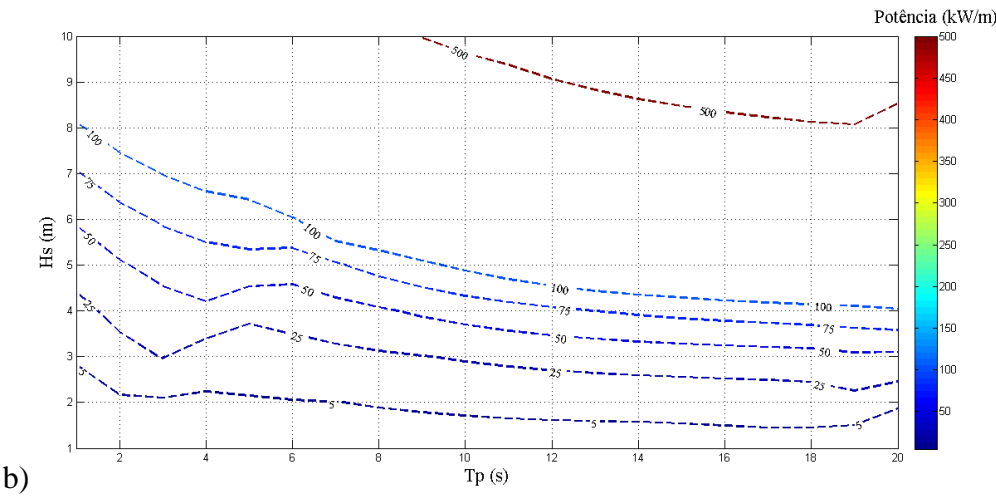
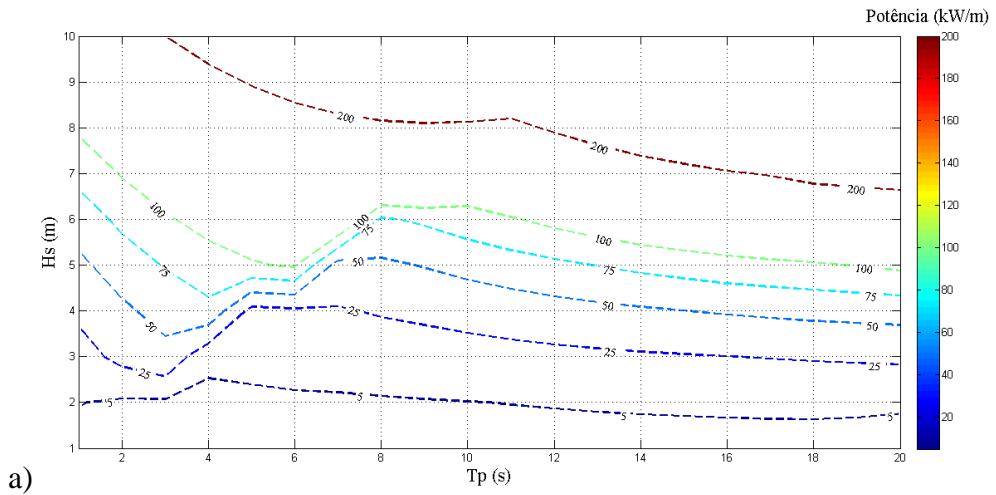
predominam as classes de valores [0-15] kW/m com orientação de 307.5° e mais a norte com valores acima dos 25 kW/m, enquanto no Inverno existe uma ocorrência equilibrada de valores com direção de onda de 307.5° e acima de 45 kW/m mais a Norte.

A Figura 5.47, Figura 5.48 e Figura 5.49 representam um diagrama de isolinhas, em que estas revelam o comportamento da potência em função da altura de onda significativa e período de pico de onda.



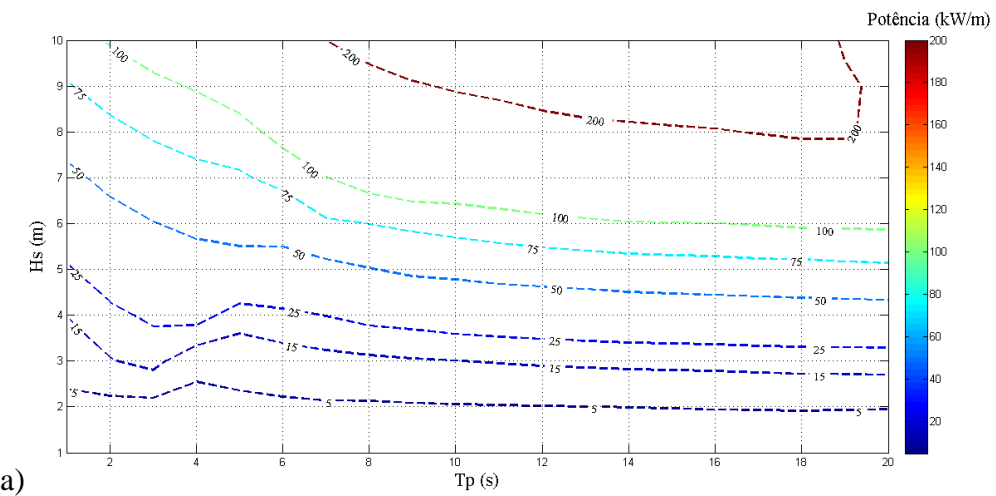
**Figura 5.47.** Diagrama de isolinhas de potência em função da altura significativa e período de pico para profundidades a 50 metros. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno

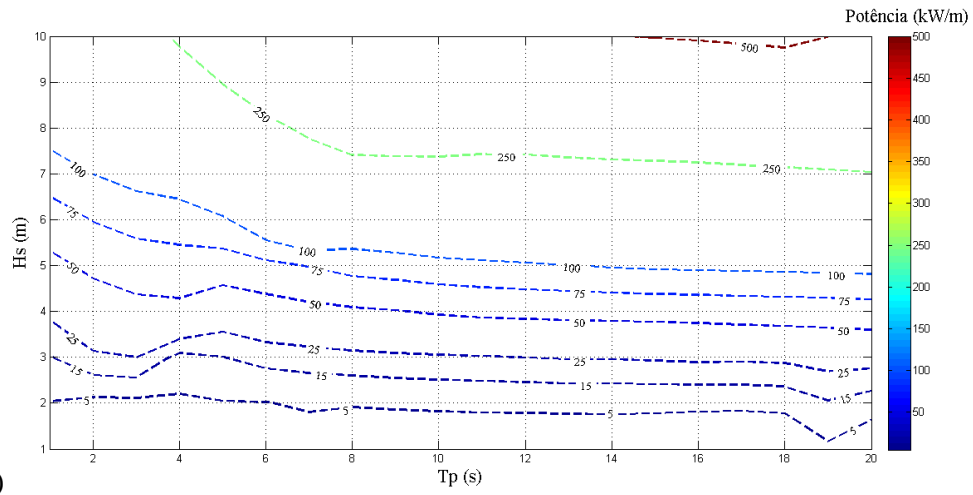
Com recurso ao anexo 5 (Figura A 5.2 e Figura A 5.3) pode-se observar que, no Verão os valores de maior ocorrência de Hs são inferiores ou iguais que 2 m, e no que diz respeito ao período de onda os valores encontram-se no intervalo de 9 a 11 s. No Inverno a altura significativa de onda ocorre com mais frequência entre 1 a 3 m de altura e no que diz respeito ao período de onda, os valores encontram-se nos 11,12 e 14 s.



**Figura 5.48.** Diagramas de isolinhas de potência em função da altura significativa e período de pico para profundidades a 30 metros. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno.

Assim, com os dados disponibilizados, é permitido concluir que para as profundidades de 30 e 50 m, os valores da potência que ocorrem com maior frequência situam-se perto dos 5 kW/m no Verão e entre os 5 e 45 kW/m no Inverno.



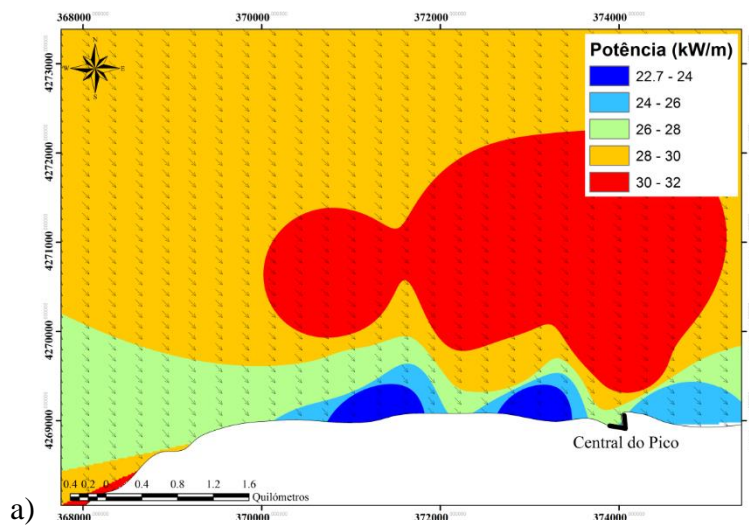


b)

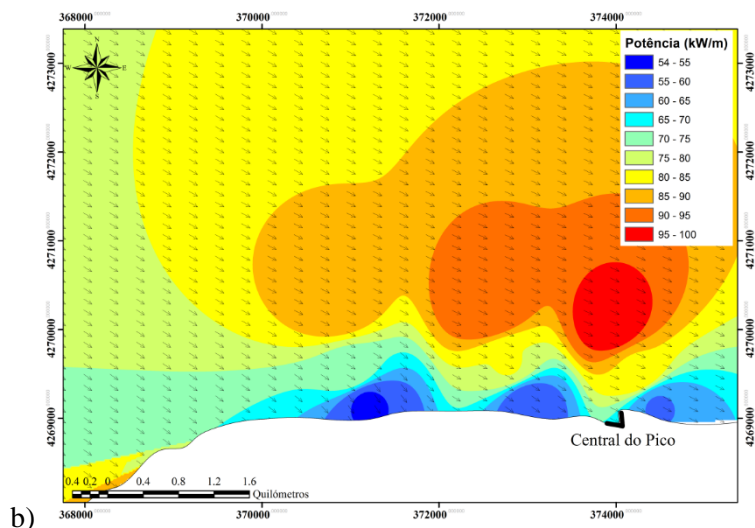
**Figura 5.49.** Diagramas de isolinhas de potência em função da altura significativa e período de pico para profundidades a 10 metros. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno

Para a profundidade de 10 m, os valores da potência que ocorrem com mais frequência no Verão situam-se à volta de 5 kW/m e no Inverno até valores de 25 kW/m.

É possível observar na Figura 5.50 a distribuição espacial média da potência em conjunto com a direção de pico ao largo do Pico.



a)

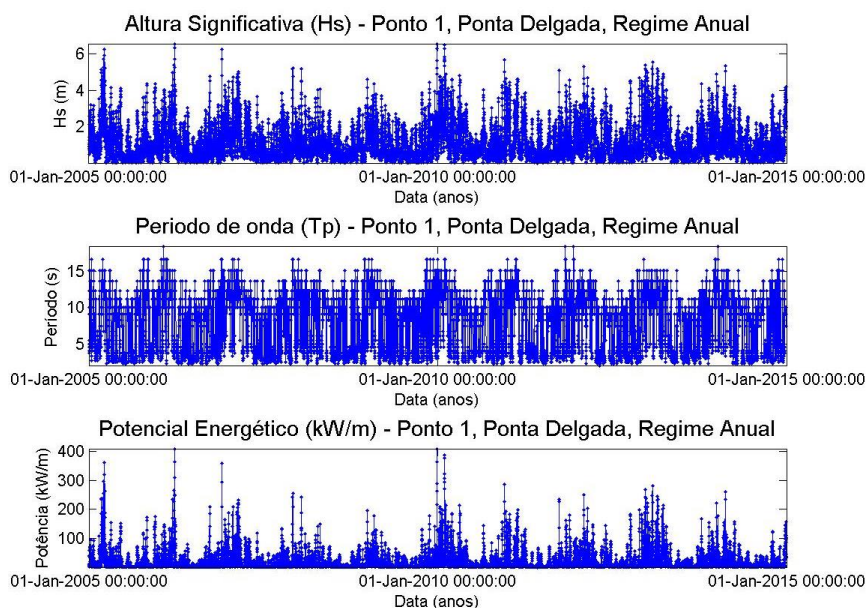


**Figura 5.50.** Distribuição espacial média da potência em conjunto com a direção de pico no Pico. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno.

No regime de Verão não existe grande diferença entre valores, no entanto pode-se observar que para a batimétrica dos 50 m apresentam-se valores entre os 30 e 32 kW/m, entre os 26 e 30 kW/m na batimétrica dos 30 m e até 24 kW/m na batimétrica dos 10 m. No regime de Inverno existe uma maior gama de valores médios para a potência, sendo que a distribuição é similar à do Verão. Os valores para a batimétrica dos 50 m variam entre 85 e dez0 kW/m, para a batimétrica dos 30 m entre 70 e 85 kW/m e para a batimétrica dos dez m até 70 kW/m.

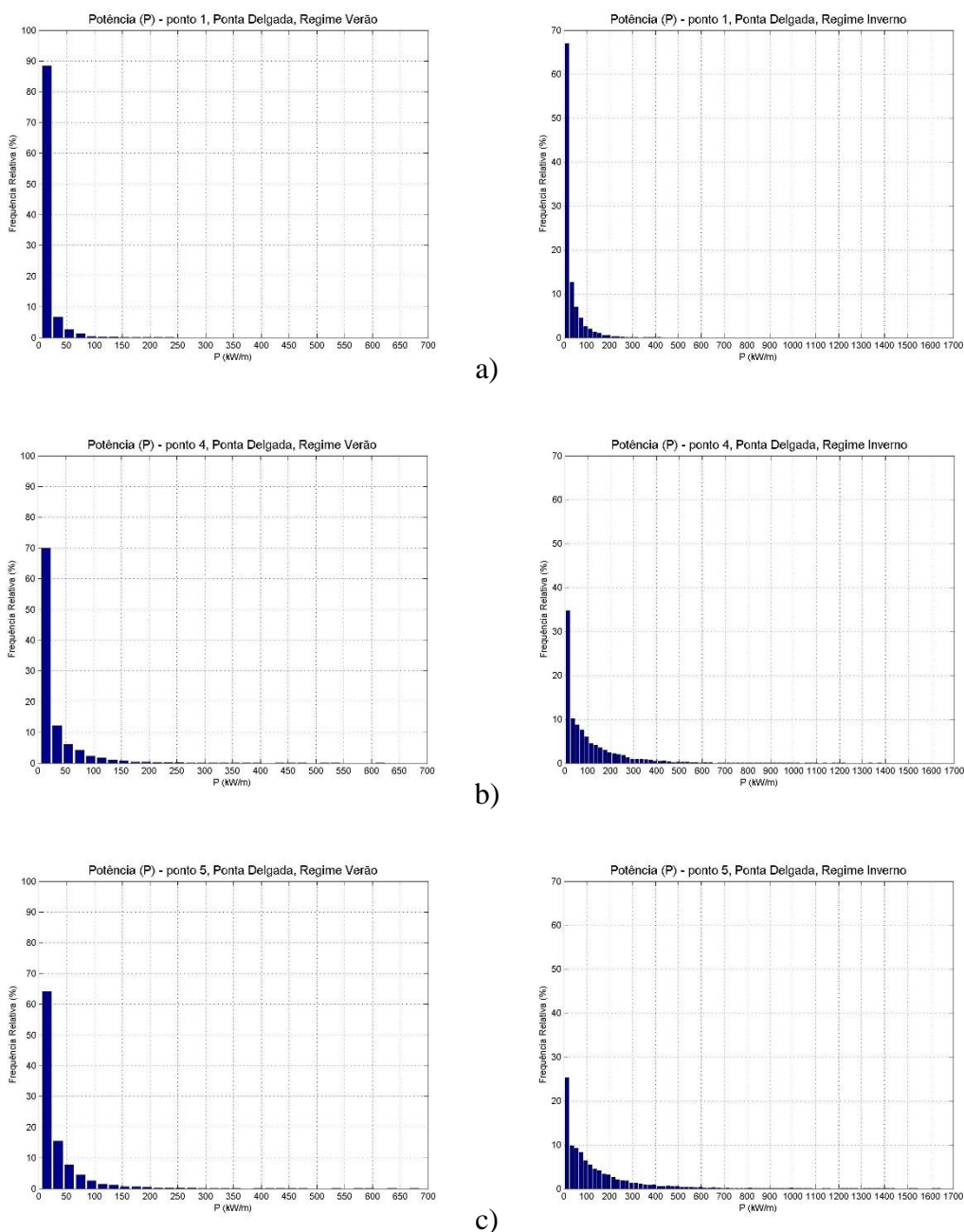
#### 5.4.4.2. Ponta Delgada

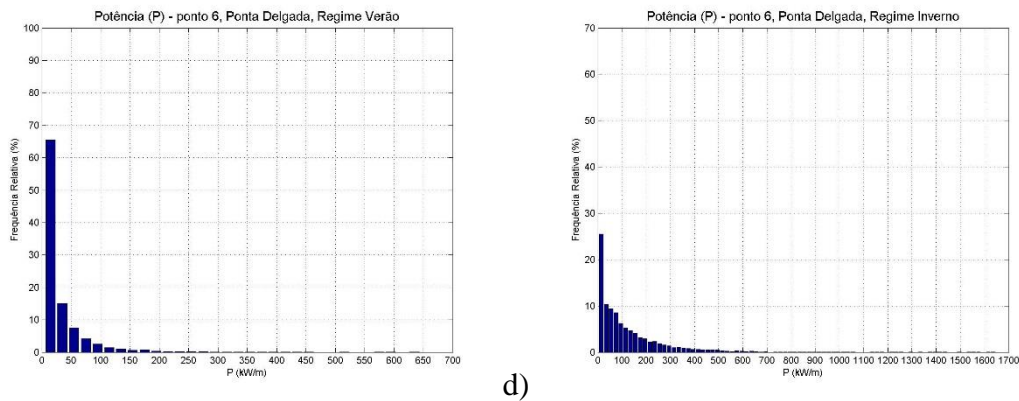
Na Figura 5.51, é possível observar-se a distribuição temporal de alguns parâmetros já mencionados neste capítulo: Hs, Tp e Potencial energético.



**Figura 5.51.** Distribuição temporal da altura significativa, período de pico e potência para o ponto 1 de Ponta Delgada (profundidades a 5 metros).

É possível observar-se a relação direta entre o comportamento da potência, altura de onda e período de onda. Ao longo dos dez anos dá-se a ocorrência de vários máximos, correspondentes ao regime de Inverno, chegando-se a ultrapassar a “barreira” dos 400 kW/m neste ponto e no geral atingido o valor máximo de 1.9 MW/m (ver em anexo Tabela A 2.2). Os valores da potência que se encontram distribuídos ao longo dos dez anos, apresentam uma média de 48.2 kW/m, como também se pode observar em anexo (Tabela A 2.9). A média ao longo dos meses de Verão é de 19.9 kW/m e no Inverno é de 76.6 kW/m (anexo Tabela A 2.9).

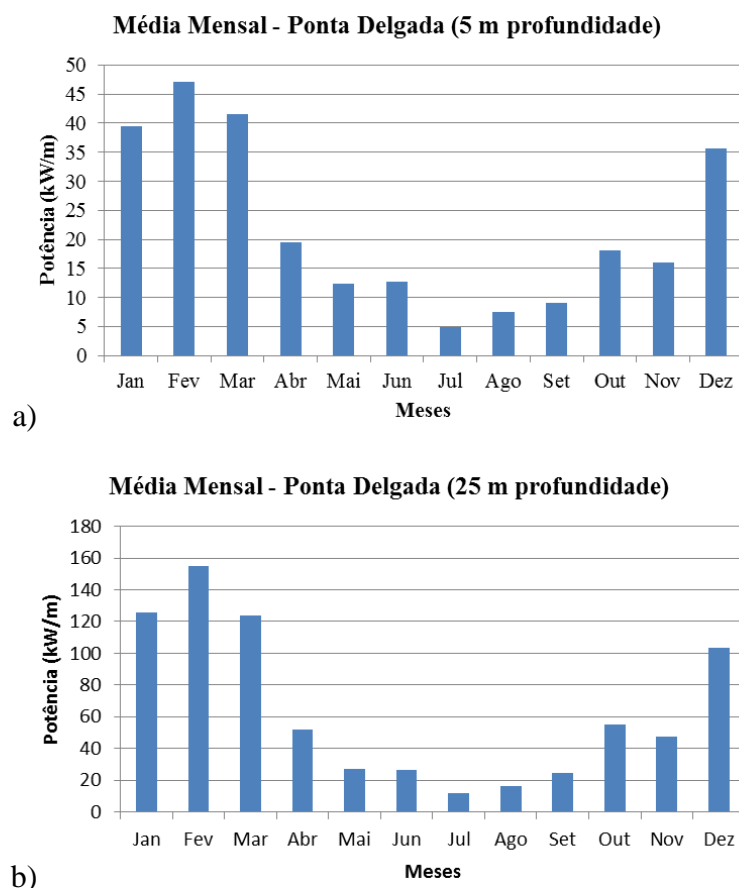


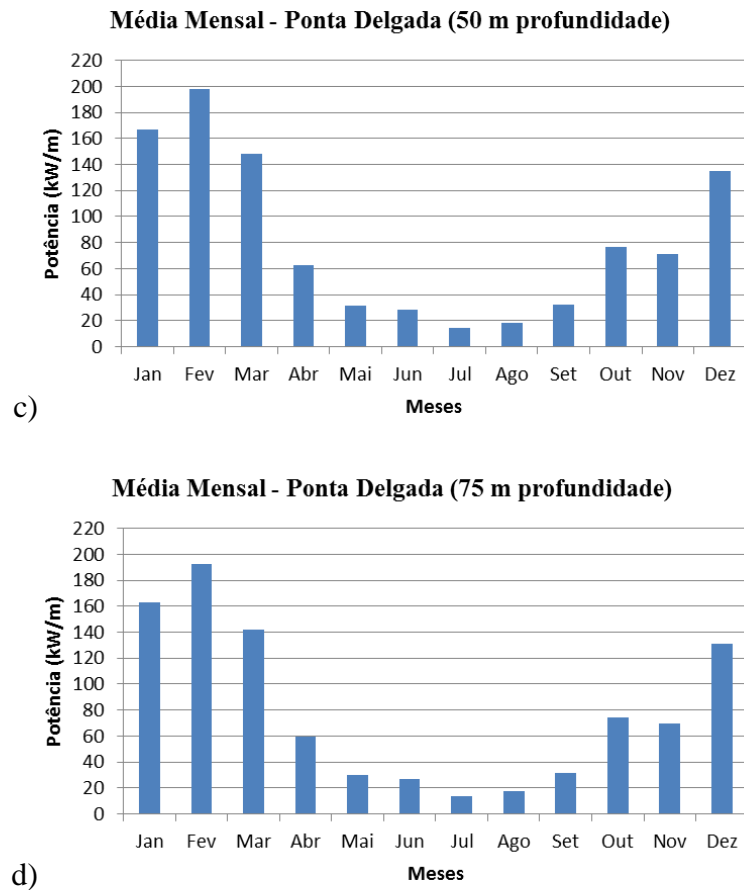


**Figura 5.52.** Frequência relativa da potência para os regimes de Verão e Inverno. a) Profundidades a 5 metros. b) Profundidades a 25 metros. c) Profundidades a 50 metros. d) Profundidades a 75 metros.

Em relação à frequência de ocorrência dos valores da potência para as diferentes profundidades (Figura 5.52), é permitido concluir que nos meses de Verão existe uma óbvia predominância (acima de 50%) da classe de valores [0-25] kW/m. No Inverno existe uma maior distribuição das classes de valores, no entanto, o intervalo de valores também aqui predominante é dos 0 aos 20 kW/m. Em ambos os regimes, esta predominância diminui à medida que se afasta da costa.

Na Figura 5.53 pode-se observar os valores médios mensais para as diferentes profundidades em estudo.

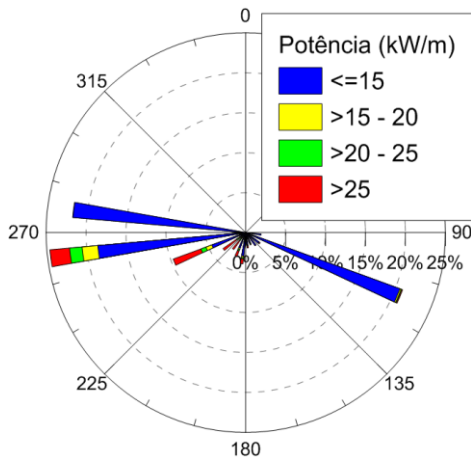




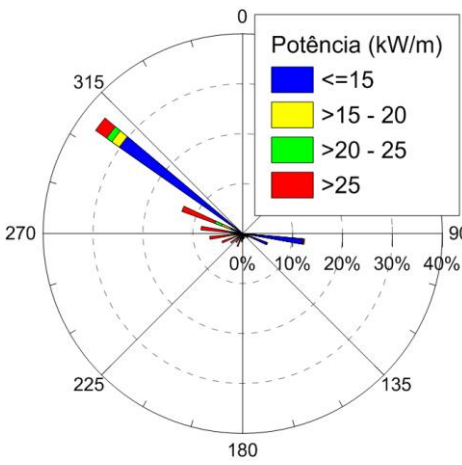
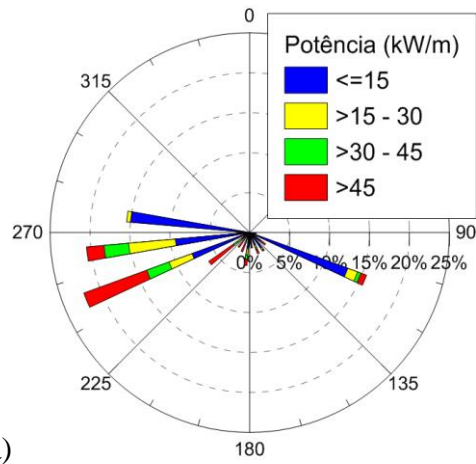
**Figura 5.53.** Regime médio mensal da potência. a) Profundidades a 5 metros. b) Profundidades a 25 metros. c) Profundidades a 50 metros. d) Profundidades a 75 metros.

A análise aos regimes de Inverno e de Verão mostra que existe uma diferença significativa de valores em ambos. É também visível uma diferença significativa de valores entre a batimétrica dos 5 m e a batimétrica dos 75 m. Na profundidade de 5 m, no Verão, é possível observar-se valores médios entre 5 a 20 kW/m e no Inverno entre 15 a 45 kW/m. Na profundidade de 25 m, no Verão, observa-se valores médios entre 10 a 60 kW/m e no Inverno entre 50 a 150 kW/m. Nas restantes profundidades os valores não diferem muito entre eles, onde se pode verificar ocorrências, no Inverno, entre 70 a 200 kW/m e, no Verão, entre 10 a 70 kW/m.

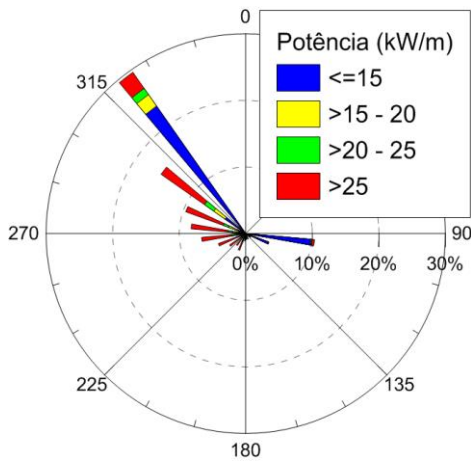
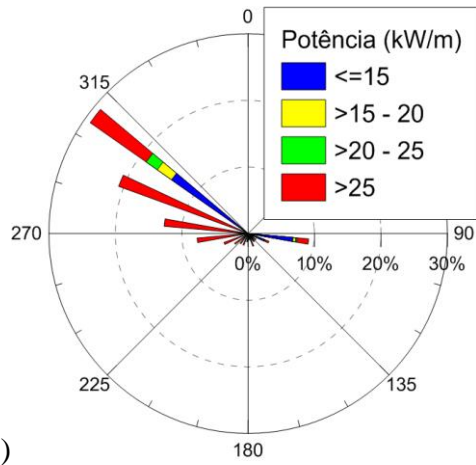
Na Figura 5.54 são representadas as distribuições da direção de pico das ondas em função da potência para os meses de Verão e Inverno, referente às diferentes profundidades em estudo.



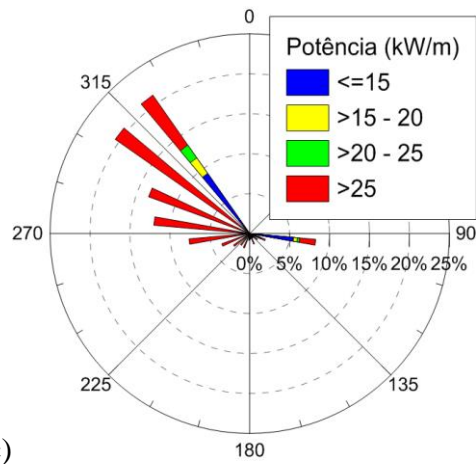
a)

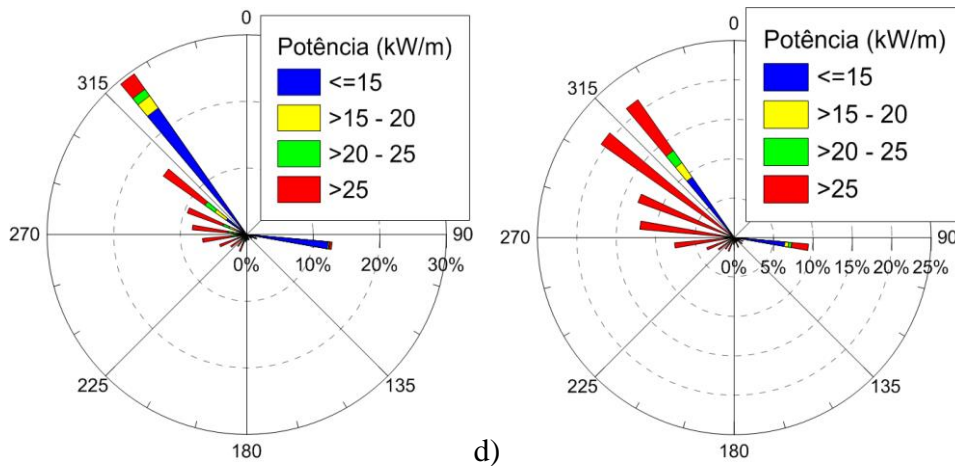


b)



c)

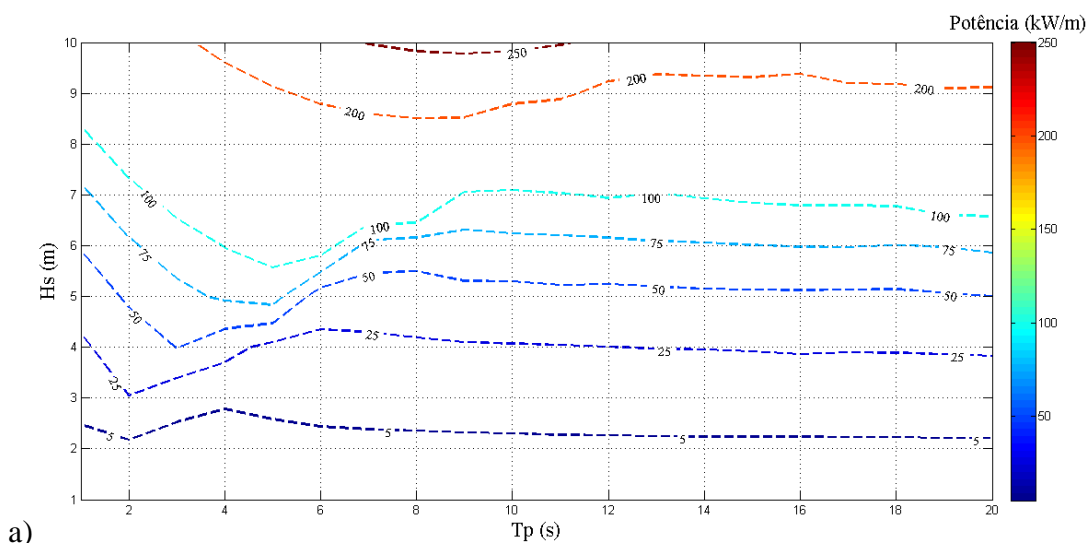


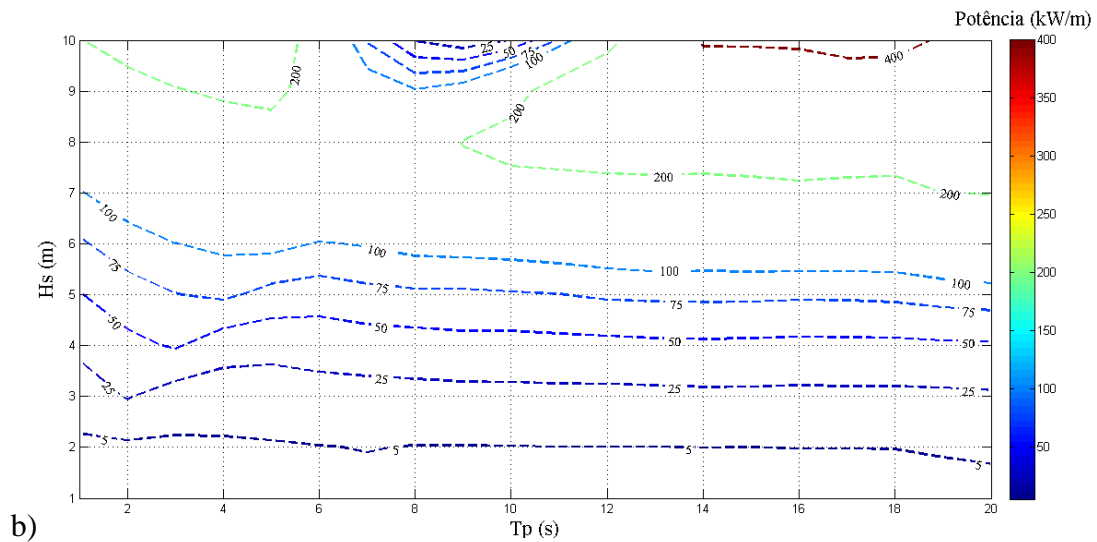


**Figura 5.54.** Distribuição da direção de pico das ondas em função da potência. a) Profundidades a 5 metros. b) Profundidades a 25 metros. c) Profundidades a 50 metros. d) Profundidades a 75 metros.

Ao largo da Ponta Delgada durante os meses de Inverno, é visível uma maior distribuição das direções de pico de onda comparativamente aos meses de Verão, predominando em ambos orientações de Noroeste, com exceção no ponto relativo à batimétrica dos 5m onde a orientação tem predominância de Oeste. Relativamente à potência, a disponibilidade desta é maior nos meses de Inverno em comparação com os meses de Verão. Na profundidade de 5 m (Figura 5.54a) predominam os valores abaixo dos 15 kW/m no Verão e acima dos 15 kW/m no Inverno. Para as profundidades de 25, 50 e 75 m (Figura 5.54b, Figura 5.54c e Figura 5.54d), no Verão, predominam as classes de valores [0-15] kW/m, enquanto no Inverno existe uma ocorrência equilibrada de valores acima de 25 kW/m.

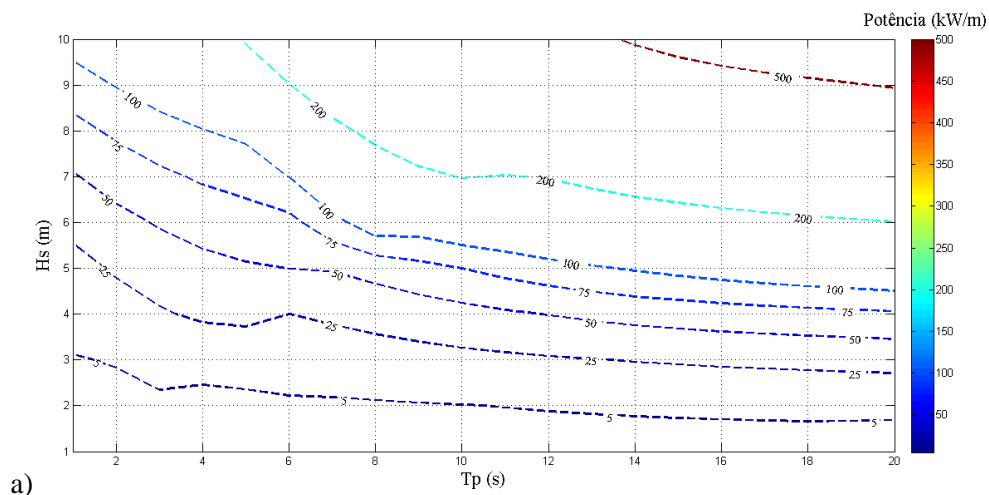
Tal como no capítulo anterior, a Figura 5.55, Figura 5.56, Figura 5.57 e Figura 5.58, representam um diagrama de isolinhas, em que estas revelam o comportamento da potência em função da altura de onda significativa e período de pico de onda.

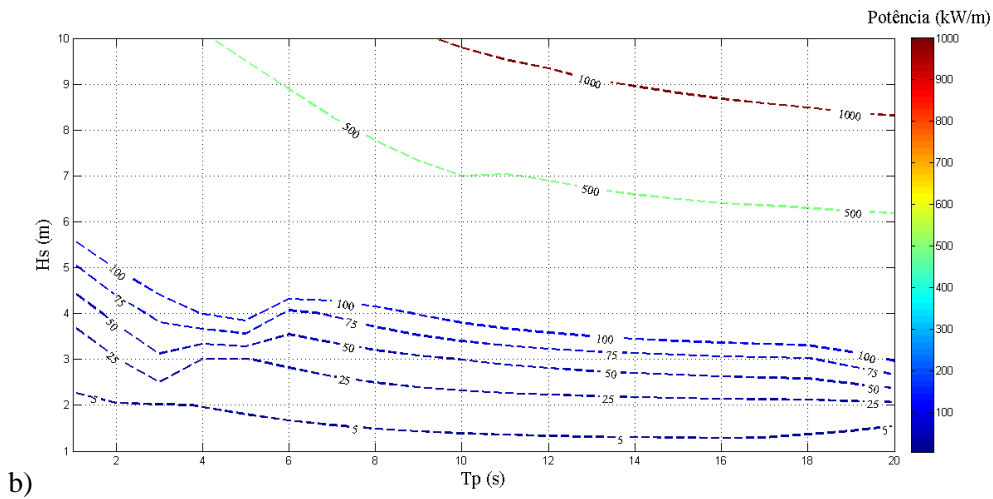




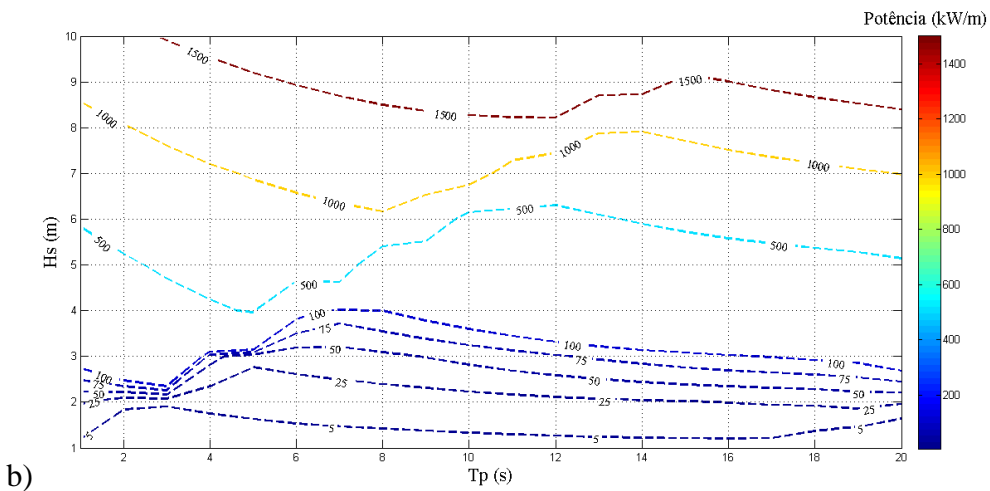
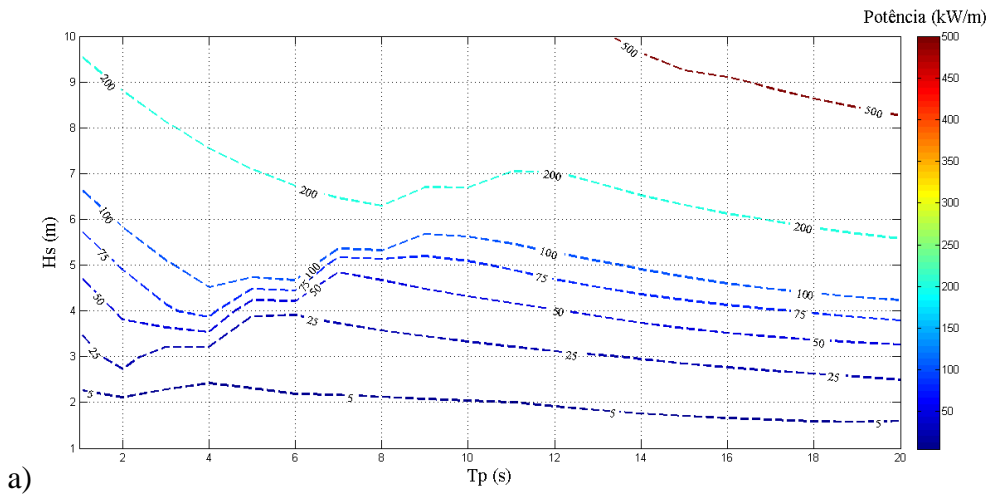
**Figura 5.55.** Diagramas de isolinhas de potência em função da altura significativa e período de pico para profundidades a 5 metros. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno.

Com recurso aos anexos Figura A 4.2 e Figura A 4.3, pode-se observar as frequências de ocorrência para a altura significativa de onda e período de onda em ambos os regimes. No Verão os valores de maior ocorrência de  $H_s$  são maioritariamente (acima de 50%) 0.5 m e no que diz respeito ao período de onda os valores encontram-se com maior frequência nos intervalos de 3 a 4 s e 9 a 11 s. No Inverno a altura significativa de onda ocorre com mais frequência abaixo ou igual a 2 m e no que diz respeito ao período de onda, os valores encontram-se nos intervalos entre os 3 a 5 s e 10 a 14 s. Assim é permitido concluir que, em relação à batimétrica dos 5 m, no Verão, ocorrem com frequência valores abaixo dos 5 kW/m e no Inverno por volta dos 5 kW/m.





**Figura 5.56.** Diagramas de isolinhas de potência em função da altura significativa e período de pico para profundidades a 25 metros. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno.

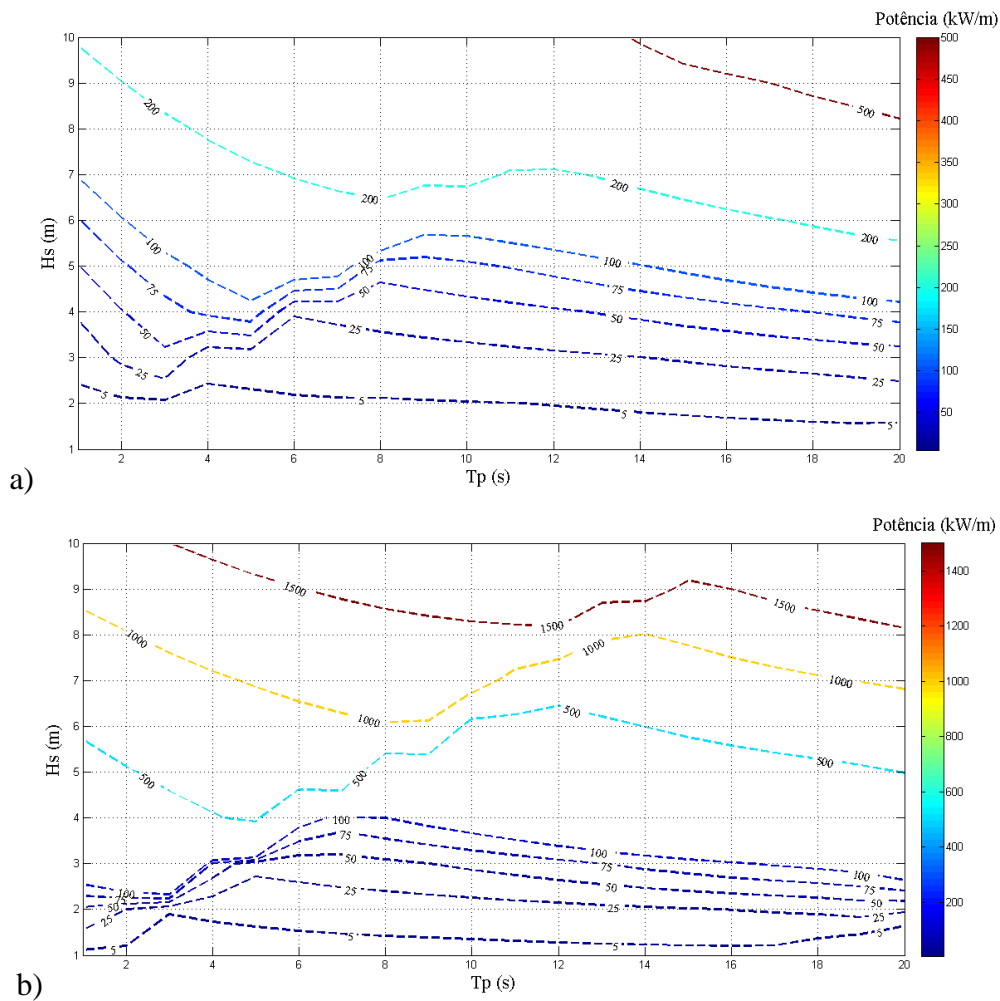


**Figura 5.57.** Diagrama de isolinhas de potência em função da altura significativa e período de pico para profundidades a 50 metros. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno.

No que diz respeito às batimétricas dos 25, 50 e 75 m, estas apresentam comportamentos similares. No Verão os valores de maior ocorrência de  $H_s$  (ver em anexo Figura A 4.2a, b e c) encontram-se entre os 0.5 e 1.5 m e no que diz respeito ao período

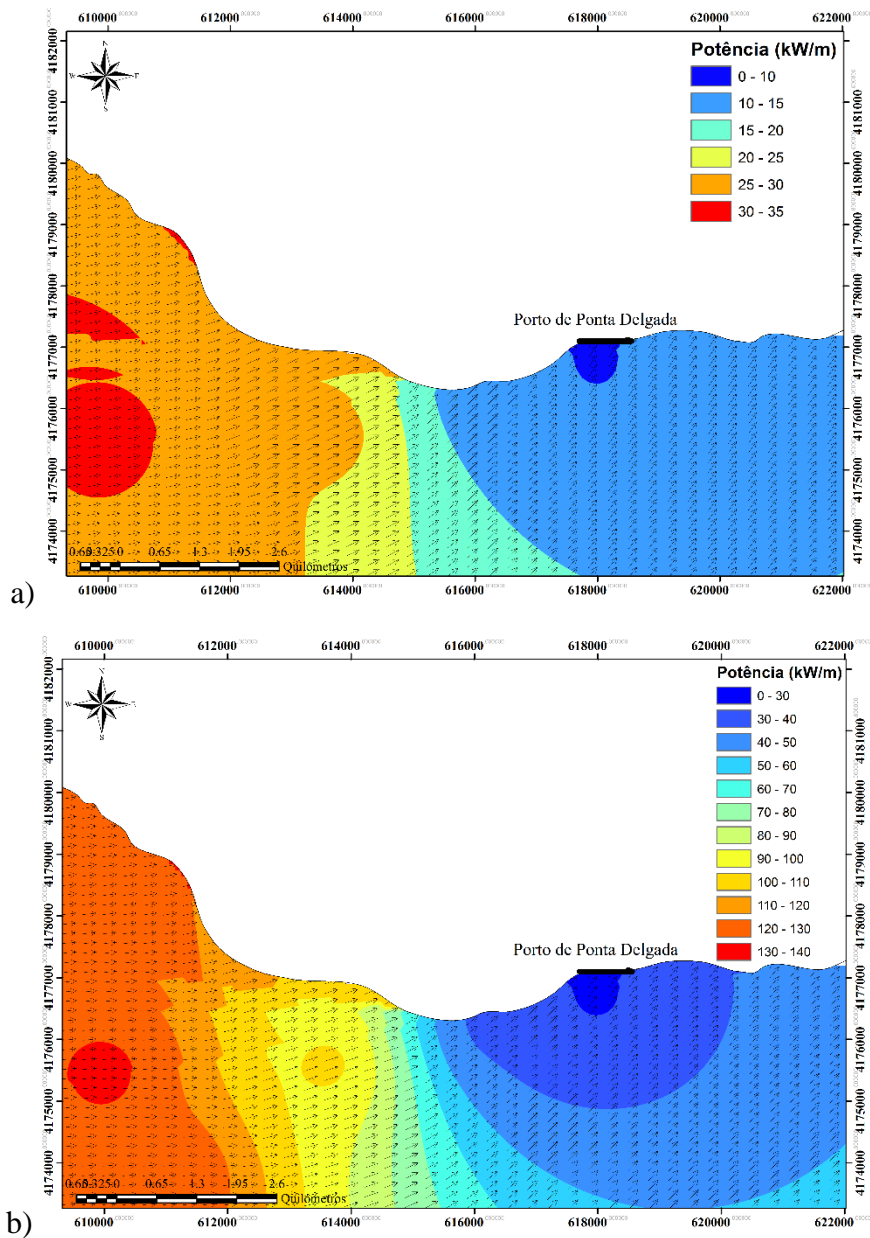
de onda os valores encontram-se com maior frequência nos intervalos de 3 a 4 s e 9 a 11 s. No Inverno a altura significativa de onda ocorre de forma mais distribuída, principalmente entre os 0.5 e 3.5 m e no que diz respeito ao período de onda, os valores mais ocorrentes encontram-se nos intervalos entre 10 a 14 s.

Deste modo, é permitido concluir que em relação às batimétricas dos 25, 50 e 75 m, no Verão, os valores da potência que ocorrem com mais frequência encontram-se abaixo dos 5 kW/m e no Inverno estes valores atingem gamas de 25, 50, 75 e 100 kW/m com frequência.



**Figura 5.58.** Diagrama de isolinhas de potência em função da altura significativa e período de pico para profundidades a 75 metros. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno.

É possível observar na Figura 5.59, a distribuição espacial ao largo de Ponta Delgada. No regime de Verão pode-se observar frente ao porto de Ponta Delgada valores médios a rondar os 15 kW/m. No regime de Inverno existe uma maior gama de valores médios para a potência, sendo que estes podem atingir os 30 kW/m frente ao porto e valores entre os 90 e 140 kW/m a Oeste do porto.



**Figura 5.59.** Distribuição espacial média da potência em conjunto com a direção de pico em Ponta Delgada. a) Meses de Verão. b) Meses de Inverno.

No Verão, os valores médios para a batimétrica dos 5 m variam 15 kW/m, para a batimétrica dos 25 m entre 15 a 25 kW/m, para a batimétrica dos 50 m entre 25 a 30 kW/m e para a batimétrica dos 75 m entre 20 a 30 kW/m. Em relação ao Inverno, os valores médios para a batimétrica dos 5 m variam entre 0 a 40 kW/m, 50 a 70 kW/m para a batimétrica dos 25 m, 100 a 130 kW/m para a batimétrica dos 50 m e 80 a 100 kW/m para a batimétrica dos 75 m.

## 6. Potencial Energético

Neste capítulo é abordada a disponibilidade energética para os três principais grupos (Ocidental, Central e Oriental) e para todo o Arquipélago dos Açores, assim como para as áreas de maior interesse do ponto de vista do aproveitamento energético. Os gráficos apresentados neste capítulo permitem uma melhor percepção do recurso energético disponível ao longo dos dez anos para as áreas de estudo em questão.

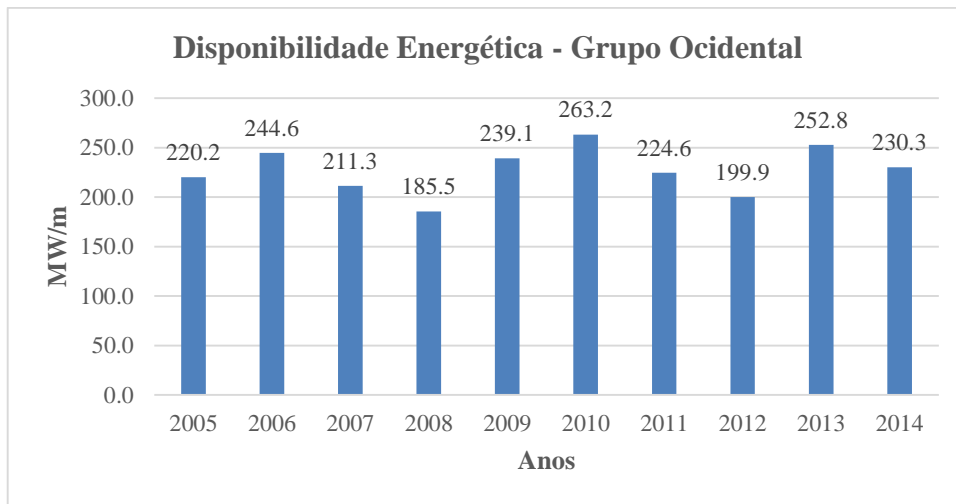
### 6.1. Comparação do Potencial entre os Grupos

No último capítulo (Capítulo V) foi possível observar a elevada disponibilidade do recurso ao largo da costa Açoriana, a partir de uma variada gama de representações gráficas de vários parâmetros, pelo que as figuras representadas a seguir vêm reforçar essa ideia.

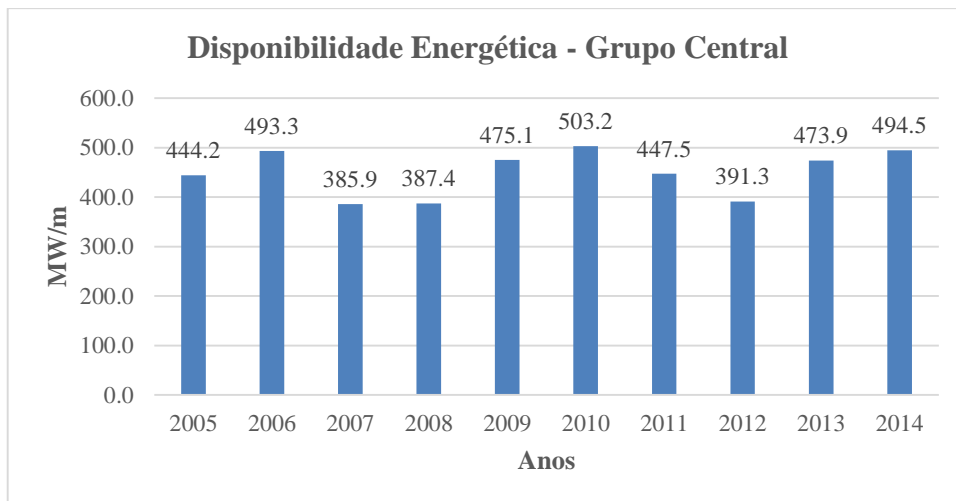
As Figura 6.1, Figura 6.2 e Figura 6.3 apresentam a disponibilidade energética (MW/m) ao longo dos dez anos para os grupos Ocidental, Central e Oriental. A partir da análise às mesmas, pode-se afirmar que têm comportamentos similares ao longo do tempo. O grupo Central (Figura 6.2) é o que apresenta maior disponibilidade energética do arquipélago, pelo facto de possuir uma maior área costeira, atingindo uma média anual de 449.6 MW/m.

No entanto, o grupo Ocidental (Figura 6.1) encontra-se numa área mais favorável para o aproveitamento da energia das ondas, visto que só a Ilha das Flores e o Corvo conseguem obter, anualmente, um valor médio de 227.15 MW/m.

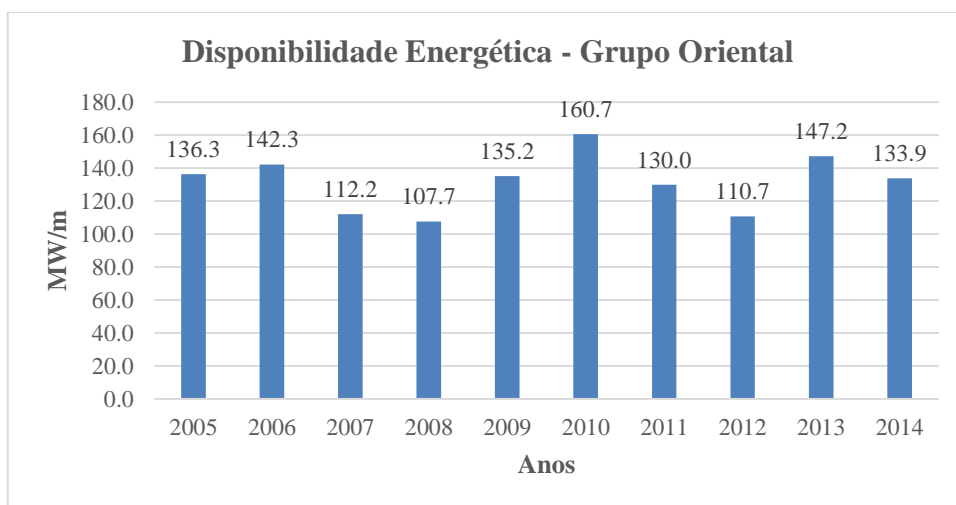
Em relação ao grupo Oriental (Figura 6.3), este apresenta os valores de potência mais baixos dos três grupos tal como era esperado. Através dos mapas de distribuição espacial média da potência observados no capítulo anterior para a o grupo Oriental, pôde-se observar que, em comparação com os valores observados nas regiões costeiras Oeste-Norte dos restantes grupos, a disponibilidade do potencial energético é mais reduzida devido ao impacto que as restantes ilhas têm sobre a agitação marítima. No entanto, não invalida que, principalmente na costa Norte, existam locais promissores para a extração do recurso.



**Figura 6.1.** Disponibilidade energética (MW/m) ao longo dos dez anos para o Grupo Ocidental.



**Figura 6.2.** Disponibilidade energética (MW/m) ao longo dos 10 anos para o Grupo Central.

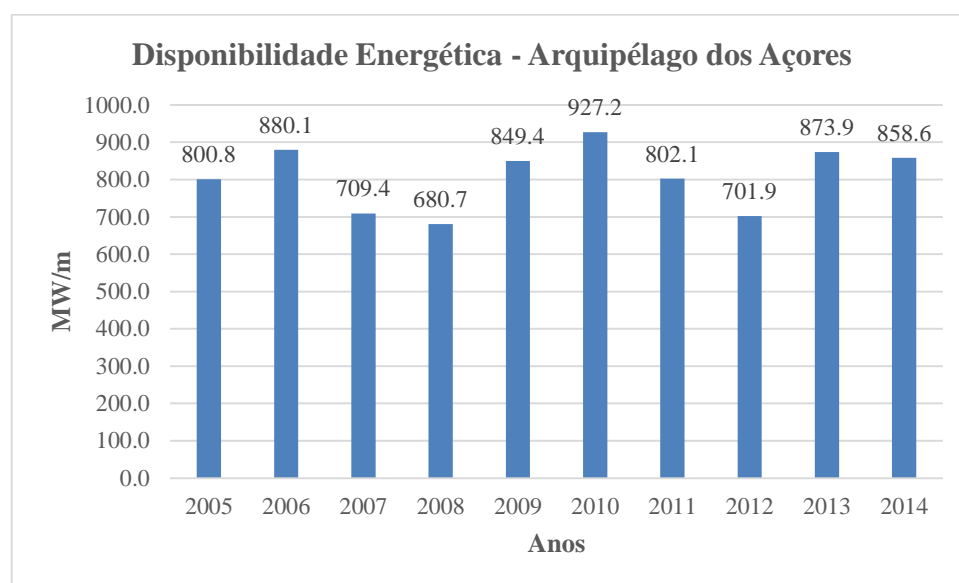


**Figura 6.3.** Disponibilidade energética (MW/m) ao longo dos 10 anos para o Grupo Oriental.

A Tabela 6.1 e a Figura 6.4 apresentam o total do recurso energético ao longo dos dez anos.

**Tabela 6.1.** Total do recurso energético ao fim de 10 anos.

Ano	Ocidental	Central	Oriental	Total (MW/m)
2005	220.230	444.199	136.348	<b>800.777</b>
2006	244.573	493.297	142.255	<b>880.125</b>
2007	211.339	385.916	112.163	<b>709.417</b>
2008	185.505	387.438	107.708	<b>680.651</b>
2009	239.059	475.096	135.223	<b>849.378</b>
2010	263.203	503.230	160.719	<b>927.152</b>
2011	224.626	447.550	129.959	<b>802.135</b>
2012	199.899	391.255	110.732	<b>701.887</b>
2013	252.796	473.893	147.218	<b>873.906</b>
2014	230.253	494.467	133.912	<b>858.633</b>
<b>Total</b>	<b>2271.483</b>	<b>4496.341</b>	<b>1316.237</b>	<b>8084.06</b>



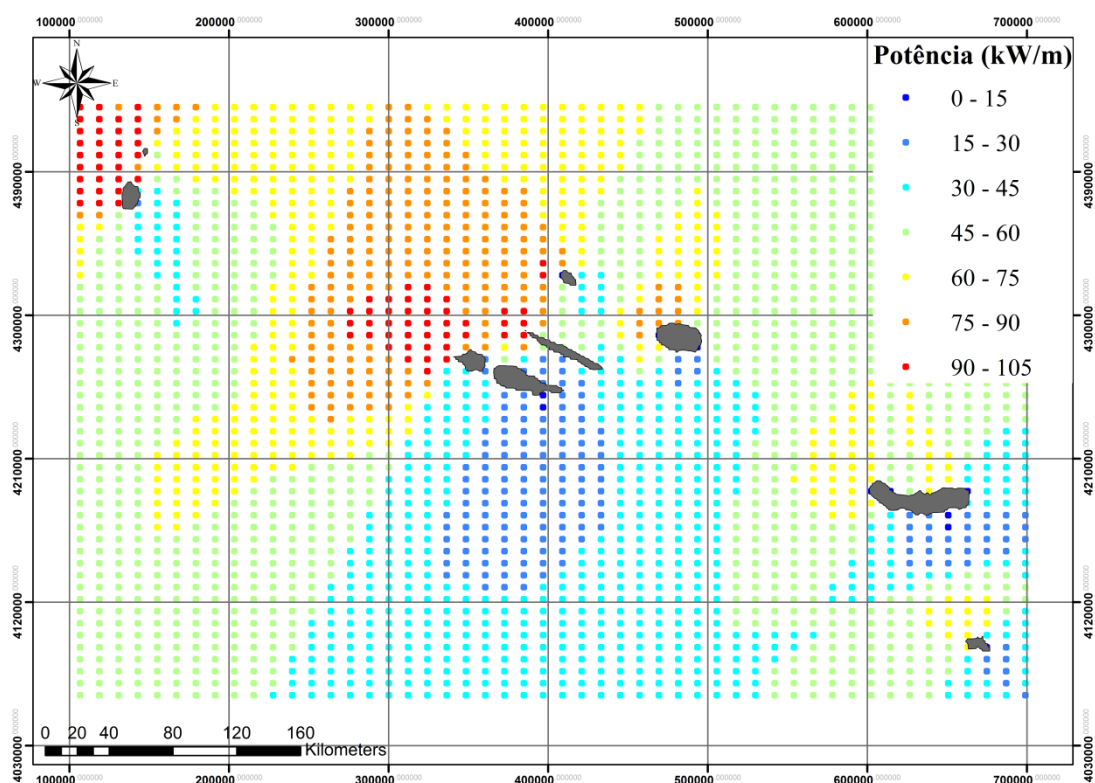
**Figura 6.4.** Disponibilidade energética (GW/m) ao longo dos 10 anos para o Arquipélago dos Açores.

A partir da sua observação, é permitido dizer que o valor médio anual da potência ronda os 808.41 MW/m e que a sua disponibilidade ao longo dos últimos dez anos foi de 8.1 GW/m. O ano de 2010 foi o que mais se aproximou de 1 GW/m, ao passo que o ano 2008 foi o mais baixo, atingindo um valor médio anual de 680.65 MW/m.

## **6.2. Avaliação das Zonas de Maior Potencial Energético**

O mapa que se encontra na Figura 6.5, permite observar a distribuição da potência anual para o Arquipélago dos Açores. Tal como já foi mencionado neste estudo, verifica-

se que as costas Norte-Oeste das ilhas são as mais apetecíveis para a extração da energia das ondas.



**Figura 6.5.** Mapa da distribuição espacial da potência para o Arquipélago dos Açores.

A análise à Figura 6.5 permite concluir que as zonas com maior disponibilidade energética encontram-se: nas costas Norte-Oeste das ilhas das Flores e do Corvo; na costa Norte da Ilha do Pico e nas regiões costeiras Norte-Oeste das ilhas do Faial, São Jorge e Graciosa; e por fim, ao largo das regiões costeiras Norte-Oeste das ilhas de São Miguel e Santa Maria.

No interior não só destas zonas, mas também de outras com disponibilidade de extração, existem algumas estruturas marítimas que podem alimentar o interesse no que diz respeito à instalação de dispositivos de extração de energia de onda. A Tabela 6.2 mostra os locais onde a sua extração poderá ser rentável. A localização destes portos podem ser observados em anexo (Figura A 6.1, Figura A 6.2, Figura A 6.3, Figura A 6.4, Figura A 6.5 e Figura A 6.6).

No entanto são locais que carecem de um estudo mais aprofundado sendo que estes, com exceção de Porto Cachorro e Ponta Delgada, são o resultado de uma análise efetuada na batimétrica dos 100 m tal como já foi mencionado neste estudo.

**Tabela 6.2.** Localização de potenciais zonas de interesse energético.

<b>Estruturas Marítimas</b>	<b>Região</b>	<b>Disponibilidade Energética (kW/m)</b>		
		<b>Verão</b>	<b>Inverno</b>	<b>Anual</b>
Corvo	Corvo	<b>15-20</b>	<b>90-100</b>	<b>50-60</b>
Calheta	São Jorge	<b>10-15</b>	<b>50-60</b>	<b>30-40</b>
Santa Cruz da Graciosa	Graciosa	<b>20-25</b>	<b>140-150</b>	<b>80-90</b>
Praia/Lagoa	Graciosa	<b>10-15</b>	<b>50-60</b>	<b>30-40</b>
Praia da Vitória	Terceira	<b>15-20</b>	<b>60-70</b>	<b>40-50</b>
Rabo de Peixe	São Miguel	<b>15-20</b>	<b>70-80</b>	<b>50-60</b>
Mosteiros	São Miguel	<b>10-15</b>	<b>50-60</b>	<b>40-50</b>
Vila do Porto	Santa Maria	<b>10-15</b>	<b>80-90</b>	<b>40-50</b>
Porto Cachorro	Pico	<b>26-28</b>	<b>65-70</b>	<b>45-50</b>
Ponta Delgada	São Miguel	<b>0-15</b>	<b>30-40</b>	<b>20-30</b>

## 7. Conclusões e Recomendações

O objetivo principal deste estudo era avaliar o potencial de energia das ondas em locais ao redor das ilhas do Arquipélago dos Açores e para zonas onde a existência de estruturas marítimas pudesse ser benéfica à instalação de dispositivos costeiros de extração. Para isso foi necessário dividir a área de estudo em três zonas de cálculo: grupo Ocidental que inclui as ilhas Flores e Corvo, grupo Central que engloba Terceira, Pico, Faial, Graciosa e São Jorge, e grupo Oriental que engloba as ilhas de São Miguel e Santa Maria.

Utilizaram-se os resultados da agitação marítima fornecidos pelo modelo WAM (WAMDI Group, 1988), os campos de ventos pelo ECMWF (European Centre Medium-Range Weather Forecast), a batimetria pelo Instituto Hidrográfico e os níveis de maré pelo modelo Xtide (Flatter, 1998). Estes parâmetros foram utilizados como condições de forçamento do modelo SWAN para o período de 2005 a 2014.

Definiu-se as malhas de cálculo do modelo SWAN e dos pontos em redor de cada uma das ilhas para obtenção dos resultados do modelo. O modelo foi executado em modo estacionário, pelo que o uso dos dados de correntes não foi necessário.

A comparação de resultados foi efetuada com recurso a um conjunto de dados reais obtidos através de três boias ondógrafas, situadas ao largo das regiões: Flores, Faial/Pico e Ponta Delgada. A comparação entre os dados reais das boias ondógrafas e os dados calculados pelo modelo SWAN, permitiu concluir sobre a validade dos resultados obtidos através do modelo desenvolvido. As comparações entre a altura significativa e o período de pico mostraram que, em relação ao primeiro parâmetro, o modelo produz resultados aceitáveis, enquanto para o período de pico, os resultados ficam aquém do esperado, subestimando em geral o período de pico.

A caracterização da agitação marítima realizada no Capítulo V mostrou a distribuição dos parâmetros: altura significativa, período de pico e direção de pico ao longo dos dez anos. A comparação entre os meses de Verão e os meses Inverno mostrou que existem diferenças significativas entre estas duas estações do ano. Para os meses de Verão viu-se que a altura significativa e o período de pico possuem valores máximos e médios mais baixos do que para os meses de Inverno. A distribuição da direção de pico apresenta uma maior frequência de ocorrência nos intervalos entre Oeste e Norte, sendo maior para a orientação de Noroeste, comprovando assim a predominância da ondulação de Oeste que se faz sentir no Arquipélago dos Açores.

Os resultados do SWAN permitiram os cálculos da potência de onda, para que fosse possível a criação de mapas que representassem as distribuições espaciais da potência das ondas nas costas dos grupos: Ocidental, Central e Oriental. A partir destes resultados, foi possível obter as zonas ao longo da costa com maior potencial energético, ou seja, zonas onde se pôde observar a distribuição da potência média. Daqui retirou-se que as costas Oeste-Norte, das nove ilhas que formam o arquipélago, são as que mais potencial apresentam. As regiões que possuem estruturas marítimas, tais como Corvo, Calheta, Santa Cruz da Graciosa, Praia/Lagoa, Praia da Vitória, Rabo de Peixe, Mosteiros e Vila do Porto, foram consideradas locais de interesse onde a inclusão de dispositivos costeiros tornar-se-ia uma hipótese real.

O estudo aplicado a Porto Cachorro (central do Pico) e a Ponta Delgada mostra que, no primeiro caso, existe condições para o funcionamento da central existente e no segundo caso, a inclusão de um dispositivo costeiro seria apenas rentável para os meses de Inverno.

Concluindo, este trabalho permitiu analisar a distribuição espacial da energia das ondas no arquipélago dos Açores e vai de acordo com a literatura ao confirmar-se o enorme potencial energético da região açoriana.

Convém lembrar que, a existência de estruturas marítimas associadas a zonas de elevada disponibilidade energética é um fator de motivação para se proceder a estudos mais detalhados, tendo em conta que a implementação de dispositivos de extração de energia é reforçada pelo facto de que eles podem contribuir para a autonomia energética das comunidades locais em zonas onde o preço da energia convencional possa ser elevado.

## 8. Referências Bibliográficas

André, R. A. A., 2010, *Modelação de um Sistema de Conversão de Energia das Ondas*, Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica.

Azevedo, E. B., Mendes, P., Gonçalo, V. (2008). Projects CLIMAAT and CLIMARCOST Climate and meteorology of the Atlantic archipelagos, maritime and coastal climate, in *I Workshop Internacional sobre Clima e Recursos Naturais nos Países de Língua Portuguesa – WSCRA08*, Agência CRIA e INMG-CV, Ilha do Sal, Cabo Verde.

Booij, N., R.C. Ris and L.H. Holthuijsen, 1999, A third-generation wave model for coast regions, Part I, Model description and validation, *J.Geoph.Research*, 104, C4, 7649-7666.

Bluebird Marine Systems, 2014. Disponível online: “[http://www.bluebird-electric.net/wave\\_power\\_energy\\_generation.htm](http://www.bluebird-electric.net/wave_power_energy_generation.htm)”.

Brito-Melo, A., 2000, *Modelação e Pré-Dimensionamento de Centrais de Coluna de Água Oscilante: Aplicação à Central de Energia das Ondas do Pico, Açores*, Dissertação para obtenção do Grau de Doutoramento em Engenharia Mecânica.

Caldeira, A. C. de O., 2014, *Modelação, Simulação e Otimização de um Sistema para Aproveitamento de Energia dos Oceanos*, Dissertação para obtenção do Grau de Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente.

Cruz, J. M. B. P., Sarmiento, A. J. N. A., 2004, *Energia das Ondas*, Instituto do Ambiente, Alfragide.

Faria, C. S. G., 2009, *Previsão da Agitação Marítima na Costa Noroeste Portuguesa: Previsão do Modelo SWAN*, Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Especialização em Hidráulica Recursos Hídricos e Ambiente.

Flater, D. (1998). *XTide Manual: Harmonic tide clock and tide predictor*. E.U.A.

Falcão, A. F. de O., 1987, *A Utilização da Energia das Ondas nos Açores*, LNETI, Departamento de Energias Renováveis, Lisboa, Portugal.

Falcão, A. F. de O., 2000, The shoreline OWC wave power plant at the Azores, 4<sup>th</sup> *European Wave Energy Conference*, Aalborg.

Falcão, A. F. de O., 2005, Aproveitamento da Energia das Ondas: Panorama e Perspectivas, *Energias Renováveis*.

Martins, M. D. S. S. B., 2009, *Sistemas de Aproveitamento da Energia do Mar*, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil.

Mollison, D., Pontes, M. T., 1992, Assessing The Portuguese Wave-Power Resource, *Energy*. 17:255-268.

Neumann, F., 2011, Pico OWC – The Frog Prince of Wave Energy? Recent autonomous operational experience and plans for an open real-sea test centre in semi-controlled environment, *EWTEC Southampton*, Sept. 5<sup>th</sup>.

Pereira, A. I., Rusu, L., Pilar, P., Guedes Soares., 2008, *Modelação da Agitação Marítima em Zonas Costeiras*, Unidade de Engenharia e Tecnologia Naval, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

Pinheiro, L., Santos, J. A., Fortes, C. J. E. M., Capitão, R., 2007, SOPRO - Pacote integrado de modelos para avaliação dos efeitos das ondas em portos. *Revista da Tecnologia da Água*, Edição I, março.

Pontes, M. T., 2006, Wave and Tidal Energy, *Renewable Energy 2006*, Makuhari Messe, Japan, 13<sup>th</sup> October.

Pontes, M. T., Athanassoulis, G. A., Barstow, S., Cavaleri, L., Holmes, B., Mollison, D., Oliveira-Pires, H., 1996, An Atlas of the Wave-Energy Resource in Europe, *ASME Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 118, p. 307-309

Poseiro, P. (2013). *Procedimentos para a execução do sistema HIDRALERTA: Desenvolvimento de aplicações em Python*. Relatório HIDRALERTA 05/2013, LNEC, Lisboa, novembro.

Rodrigues, J., 2014, *Avaliação do Risco e Aplicação do processo de Análise Hierárquica (AHP) na Avaliação das Consequências de Galgamento em Zonas Costeiras e Portuárias*, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Especialização em Hidráulica.

Rusu, E., Guedes-Soares, C., 2012, Wave energy assessments in the Azores islands. *Renewable Energy*, 45 September, pp. 183-196, DOI: 10.1016/j.renene.2012.02.027.

Sampaio, M., 2008, *Aplicação do modelo SWAN na caracterização da agitação marítima na zona adjacente a Pinheiro da Cruz*, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil.

Simões, A., Juliano, M., Barcelos, E., 2010, Evaluation of Wave Energy Potential in The Azores Region, *Green Islands Azores*, Angra do Heroísmo, 3<sup>th</sup> May.

SWAN Team., 2008, *Technical Documentation SWAN Cycle III version 40.51*. Delft University of Technology, The Netherlands.

Dias, J. M. A., Taborda, R., 1992, Tide-Gauge Data in Deducing Sea Level Rise and Crustal Movements Rates: The Portuguese Case, *Journal of Coastal Research*, n.º 8, p. 655-659.

Tolman, H. L., 1999a, User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18, *NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note 166*, 110 pp.

Torre-Enciso, Y., Ortubia, I., de Aguilera, L., Marqués, J., 2009, Mutriku Wave Power Plant: From the Thinking out to the Reality, *8<sup>th</sup> European Wave and Tidal Energy Conference*, Uppsala, Sweden.

WAMDI Group (1988). The WAM model - A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 18, 1775-1810.

Wave Energy Centre, 2004, Potencial e Estratégia para o Desenvolvimento da Energia das Ondas em Portugal. Disponível online: “[http://www.energiasrenovaveis.com/images/upload/Relatorio\\_DGGE\\_ondas.pdf](http://www.energiasrenovaveis.com/images/upload/Relatorio_DGGE_ondas.pdf)”

# **ANEXOS**

## ANEXO 1

**Tabela A 1.1.** Análise estatística da potência para os pontos: 1 (Occidental), 11 (Central) e 41 (Oriental).

	Occidental			Central			Oriental		
	Anual	Verão	Inverno	Anual	Verão	Inverno	Anual	Verão	Inverno
<b>Mediana</b>	62.79163	33.71315	115.5177	57.46657	31.78376	107.7094	38.86408	23.20221	71.25364
<b>Média</b>	105.3543	50.77164	160.2067	102.6285	48.8058	156.7172	69.69169	34.10205	105.4572
<b>Desvio Padrão</b>	124.8341	55.64888	148.759	132.02	55.0947	161.4233	91.78921	41.73563	112.2035
<b>Máximo</b>	1613.69	840.9172	1613.69	1853.611	739.7344	1853.611	1467.928	937.1486	1467.928
<b>Mínimo</b>	0.027959	0.027959	0.723826	0.066184	0.066184	0.777621	0.085615	0.215393	0.085615
<b>Contagem</b>	14604	7320	7284	14604	7320	7284	14604	7320	7284

**Tabela A 1.2.** Análise estatística da altura significativa (Hs) para os pontos: 1 (Occidental), 11 (Central) e 41 (Oriental).

	Occidental			Central			Oriental		
	Anual	Verão	Inverno	Anual	Verão	Inverno	Anual	Verão	Inverno
<b>Mediana</b>	2.43088	1.8641	3.09396	2.32552	1.80702	2.973705	1.9267	1.56216	2.48848
<b>Média</b>	2.656493	2.031711	3.284361	2.575545	1.970652	3.183428	2.152963	1.672273	2.63603
<b>Desvio Padrão</b>	1.18509	0.809648	1.170703	1.231853	0.823487	1.274251	1.055441	0.714933	1.119911
<b>Máximo</b>	9.86033	7.64361	9.86033	10.56795	7.32594	10.56795	8.81511	8.06975	8.81511
<b>Mínimo</b>	0.09272	0.09272	0.29354	0.15782	0.15782	0.4649	0.16225	0.28471	0.16225
<b>Contagem</b>	14604	7320	7284	14604	7320	7284	14604	7320	7284

**Tabela A 1.3.** Análise estatística da direção de pico ( $\theta_p$ ) para os pontos: 1 (Occidental), 11 (Central) e 41 (Oriental).

	Occidental			Central			Oriental		
	Anual	Verão	Inverno	Anual	Verão	Inverno	Anual	Verão	Inverno
<b>Mediana</b>	292.5	292.5	292.5	292.5	292.5	292.5	277.5	262.5	277.5
<b>Média</b>	312.3439	317.7602	306.9007	319.2122	322.1148	316.2953	316.819	325.957	307.6359
<b>Desvio Padrão</b>	107.8662	115.7717	98.70167	107.6745	115.8572	98.16564	124.1382	129.7595	115.5332
<b>Máximo</b>	352.5	352.5	352.5	352.5	352.5	352.5	322.5	322.5	322.5
<b>Mínimo</b>	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
<b>Contagem</b>	14604	7320	7284	14604	7320	7284	14604	7320	7284

**Tabela A 1.4.** Análise estatística do período de pico ( $T_p$ ) para os pontos: 1 (Occidental), 11 (Central) e 41 (Oriental).

	Occidental			Central			Oriental		
	Anual	Verão	Inverno	Anual	Verão	Inverno	Anual	Verão	Inverno
<b>Mediana</b>	11.1411	10.0705	12.3255	11.1411	10.0705	12.3255	11.1411	10.0705	12.3255
<b>Média</b>	10.90197	9.934486	11.87424	10.87451	9.941676	11.81195	10.8099	9.879533	11.74487
<b>Desvio Padrão</b>	2.001149	1.554452	1.92737	2.104251	1.628463	2.11172	2.116539	1.693002	2.08738
<b>Máximo</b>	18.4634	15.0854	18.4634	18.4634	15.0854	18.4634	18.4634	15.0854	18.4634
<b>Mínimo</b>	2.996	3.3145	2.996	2.7081	2.7081	3.6668	2.7081	2.7081	2.996
<b>Contagem</b>	14604	7320	7284	14604	7320	7284	14604	7320	7284

## ANEXO 2

**Tabela A 2.1.** Análise estatística da potência para os pontos: 1,2,3,4,5 e 6 de Ponta Delgada (Verão).

	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>
<b>Mediana</b>	1.861955	2.427171	3.165019	10.19649	15.65274	15.29386
<b>Média</b>	9.536894	10.96311	12.29124	26.27685	31.07	29.79072
<b>Desvio padrão</b>	18.37847	20.09944	21.50093	44.0108	49.25185	47.00391
<b>Máximo</b>	234.6884	241.1944	261.9657	605.9449	761.2498	769.7211
<b>Mínimo</b>	0.000168	0.000207	0.000208	0.00026	0.000234	0.000219
<b>Contagem</b>	7320	7320	7320	7320	7320	7320

**Tabela A 2.2.** Análise estatística da potência para os pontos: 1,2,3,4,5 e 6 de Ponta Delgada (Inverno).

	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>
<b>Mediana</b>	10.31212	13.06075	16.82555	56.02754	79.06032	75.86063
<b>Média</b>	28.20321	32.7338	37.54039	101.1568	131.8884	128.1233
<b>Desvio padrão</b>	42.85048	47.94816	52.4203	132.0039	164.6421	163.0692
<b>Máximo</b>	409.9802	470.7762	513.5314	1371.937	1898.891	1903.815
<b>Mínimo</b>	0.000343	0.000541	0.000875	0.010096	0.030812	0.025881
<b>Contagem</b>	7284	7284	7284	7284	7284	7284

**Tabela A 2.3.** Análise estatística da altura significativa (Hs) para os pontos: 1,2,3,4,5 e 6 de Ponta Delgada (Verão).

	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>
<b>Mediana</b>	0.583445	0.639755	0.699075	1.03569	1.26503	1.2816
<b>Média</b>	0.815805	0.885161	0.947196	1.227659	1.408835	1.425516
<b>Desvio padrão</b>	0.715646	0.747295	0.771687	0.885637	0.894419	0.895061
<b>Máximo</b>	5.10608	5.15002	5.33813	6.33904	6.55291	6.64785
<b>Mínimo</b>	0.00451	0.00508	0.0051	0.00528	0.00532	0.0052
<b>Contagem</b>	7320	7320	7320	7320	7320	7320

**Tabela A 2.4.** Análise estatística da altura significativa (Hs) para os pontos: 1,2,3,4,5 e 6 de Ponta Delgada (Inverno).

	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>
<b>Mediana</b>	1.16171	1.287145	1.427865	2.10922	2.496525	2.53464
<b>Média</b>	1.453727	1.574981	1.697844	2.308634	2.658927	2.691218
<b>Desvio padrão</b>	1.071815	1.129548	1.177523	1.44376	1.483893	1.493055
<b>Máximo</b>	6.55725	6.99375	7.30443	9.26386	10.34953	10.45507
<b>Mínimo</b>	0.00627	0.00787	0.01001	0.02919	0.05342	0.0506
<b>Contagem</b>	7284	7284	7284	7284	7284	7284

**Tabela A 2.5.** Análise estatística da direção de pico ( $\theta_p$ ) para os pontos: 1,2,3,4,5 e 6 de Ponta Delgada (Verão).

	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>
<b>Mediana</b>	247.5	262.5	262.5	277.5	292.5	292.5
<b>Média</b>	213.6045	217.5738	224.6107	245.2541	260.3238	259.1619
<b>Desvio padrão</b>	66.3785	69.70484	72.50673	77.24069	75.93595	77.23125
<b>Máximo</b>	292.5	292.5	307.5	322.5	352.5	337.5
<b>Mínimo</b>	67.5	82.5	82.5	97.5	97.5	82.5
<b>Contagem</b>	7320	7320	7320	7320	7320	7320

**Tabela A 2.6.** Análise estatística da direção de pico ( $\theta_p$ ) para os pontos: 1,2,3,4,5 e 6 de Ponta Delgada (Inverno).

	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>
<b>Mediana</b>	247.5	247.5	262.5	277.5	292.5	292.5
<b>Média</b>	217.5371	223.5111	230.0783	252.5927	265.0741	264.5284
<b>Desvio padrão</b>	59.96497	63.29533	65.05292	70.24625	68.9624	69.85787
<b>Máximo</b>	292.5	292.5	292.5	307.5	322.5	322.5
<b>Mínimo</b>	52.5	67.5	82.5	97.5	97.5	97.5
<b>Contagem</b>	7284	7284	7284	7284	7284	7284

**Tabela A 2.7.** Análise estatística do período de pico ( $T_p$ ) para os pontos: 1,2,3,4,5 e 6 de Ponta Delgada (Verão).

	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>
<b>Mediana</b>	8.2281	8.2281	8.2281	9.1028	9.1028	9.1028
<b>Média</b>	7.156312	7.292519	7.449505	8.319035	8.863942	8.802602
<b>Desvio padrão</b>	3.485023	3.430152	3.4025	3.127122	2.868494	2.921937
<b>Máximo</b>	15.0854	15.0854	15.0854	15.0854	15.0854	15.0854
<b>Mínimo</b>	2	2.2126	2.2126	2.2126	2.2126	2
<b>Contagem</b>	7320	7320	7320	7320	7320	7320

**Tabela A 2.8.** Análise estatística do período de pico ( $T_p$ ) para os pontos: 1,2,3,4,5 e 6 de Ponta Delgada (Inverno).

	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>
<b>Mediana</b>	10.0705	11.1411	11.1411	11.1411	11.1411	11.1411
<b>Média</b>	9.299743	9.432994	9.707216	10.52289	11.06752	11.03537
<b>Desvio padrão</b>	4.055472	3.983744	3.876811	3.402237	3.006216	3.04385
<b>Máximo</b>	18.4634	18.4634	18.4634	18.4634	18.4634	18.4634
<b>Mínimo</b>	2.2126	2.2126	2.2126	2.2126	2.2126	2.2126
<b>Contagem</b>	7284	7284	7284	7284	7284	7284

**Tabela A 2.9.** Média dos principais parâmetros estatísticos para o total dos pontos de cálculo (Ponta Delgada).

	<b>Ponta Delgada</b>											
	<b>Potência</b>			<b>Altura significativa</b>			<b>Período de pico</b>			<b>Direção</b>		
	Anual	Verão	Inverno	Anual	Verão	Inverno	Anual	Verão	Inverno	Anual	Verão	Inverno
<b>Média</b>	48.2	20.0	76.6	1.6	1.1	2.1	9.1	8.0	10.2	239.5	236.8	242.2
<b>Máximo</b>	1094.8	479.1	1094.8	8.5	5.9	8.5	18.5	15.1	18.5	317.5	317.5	305.0
<b>Contagem</b>	14604	7320	7284	14604	7320	7284	14604	7320	7284	14604	7320	7284

## ANEXO 3

**Tabela A 3.1.** Análise estatística da potência para os pontos de cálculo 1,2,3,4,5,6,7,8 e 9 do Pico (Verão).

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
<b>Mediana</b>	16.83952	15.72564	13.44245	17.41523	16.71852	13.97827	17.78924	17.71877	15.28829
<b>Média</b>	31.0473	28.32453	22.93353	31.88687	29.78179	23.47293	32.23483	30.98411	24.64752
<b>Desvio padrão</b>	43.89256	39.63299	30.73561	45.43959	41.74906	31.41983	46.06506	43.20529	32.51397
<b>Máximo</b>	653.7801	579.1941	464.7365	630.4341	586.8341	453.8828	607.8504	606.9923	480.8936
<b>Mínimo</b>	0.006014	0.005366	0.004712	0.009932	0.00925	0.00786	0.01401	0.013781	0.012249
<b>Contagem</b>	7320	7320	7320	7320	7320	7320	7320	7320	7320

**Tabela A 3.2.** Análise estatística da potência para os pontos de cálculo 1,2,3,4,5,6,7,8 e 9 do Pico (Inverno).

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
<b>Mediana</b>	47.43153	39.65544	30.66838	50.81963	43.59425	32.54981	52.90254	47.53385	35.20174
<b>Média</b>	83.62365	70.11433	52.2018	89.1954	76.31907	54.87638	92.04262	80.53736	57.13883
<b>Desvio padrão</b>	101.4566	85.37516	61.74353	109.6754	93.80727	65.56864	113.7741	97.91503	67.19961
<b>Máximo</b>	873.8617	702.408	516.8626	958.1919	784.9094	531.984	985.4685	818.6623	549.9658
<b>Mínimo</b>	0.009165	0.00663	0.003727	0.005688	0.009554	0.003695	0.009317	0.004775	0.003023
<b>Contagem</b>	7284	7284	7284	7284	7284	7284	7284	7284	7284

**Tabela A 3.3.** Análise estatística da altura significativa (Hs) para os pontos: 1,2,3,4,5,6,7,8 e 9 do Pico (Verão).

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
<b>Mediana</b>	1.307955	1.22086	1.166445	1.324165	1.254845	1.187725	1.33435	1.29252	1.23467
<b>Média</b>	1.426984	1.324908	1.268551	1.43486	1.350686	1.281008	1.436369	1.376982	1.316836
<b>Desvio padrão</b>	0.797725	0.766838	0.756682	0.818467	0.792627	0.770737	0.829919	0.808448	0.785219
<b>Máximo</b>	6.94987	6.60619	6.47187	6.97645	6.68984	6.39585	6.99347	6.80377	6.58341
<b>Mínimo</b>	0.02533	0.02282	0.02161	0.03255	0.02996	0.02791	0.03866	0.03657	0.03484
<b>Contagem</b>	7320	7320	7320	7320	7320	7320	7320	7320	7320

**Tabela A 3.4.** Análise estatística da altura significativa (Hs) para os pontos: 1,2,3,4,5,6,7,8 e 9 do Pico (Inverno).

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
<b>Mediana</b>	1.961675	1.78528	1.70623	2.018875	1.860605	1.75309	2.05421	1.927525	1.812485
<b>Média</b>	2.141897	1.947573	1.870032	2.187355	2.017902	1.910898	2.209405	2.072023	1.958018
<b>Desvio padrão</b>	1.134278	1.078498	1.073489	1.191789	1.140441	1.114999	1.22147	1.168373	1.12828
<b>Máximo</b>	7.26837	6.70932	6.63524	7.53347	7.00787	6.68795	7.62604	7.17459	6.78622
<b>Mínimo</b>	0.05873	0.04515	0.03379	0.04182	0.02853	0.01874	0.02937	0.02017	0.01695
<b>Contagem</b>	7284	7284	7284	7284	7284	7284	7284	7284	7284

**Tabela A 3.5.** Análise estatística da direção de pico ( $\theta_p$ ) para os pontos: 1,2,3,4,5,6,7,8 e 9 do Pico (Verão).

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
<b>Mediana</b>	307.5	307.5	307.5	292.5	307.5	307.5	292.5	307.5	307.5
<b>Média</b>	311.2227	317.3463	328.0533	310.9631	314.9283	320.123	310.2425	310.0922	313.1284
<b>Desvio padrão</b>	121.6074	124.1997	126.7313	122.1787	124.6711	127.7243	122.5751	123.6081	125.5251
<b>Máximo</b>	352.5	352.5	352.5	352.5	352.5	352.5	352.5	352.5	352.5
<b>Mínimo</b>	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
<b>Contagem</b>	7320	7320	7320	7320	7320	7320	7320	7320	7320

**Tabela A 3.6.** Análise estatística da direção de pico ( $\theta_p$ ) para os pontos: 1,2,3,4,5,6,7,8 e 9 do Pico (Inverno).

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
<b>Mediana</b>	307.5	307.5	307.5	307.5	307.5	307.5	307.5	307.5	307.5
<b>Média</b>	295.5907	301.2294	323.9904	294.0453	297.3283	304.3887	293.671	293.489	297.397
<b>Desvio padrão</b>	104.4311	107.4034	110.4791	104.657	108.4279	112.5124	104.9154	107.4882	110.6167
<b>Máximo</b>	352.5	352.5	352.5	352.5	352.5	352.5	352.5	352.5	352.5
<b>Mínimo</b>	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
<b>Contagem</b>	7284	7284	7284	7284	7284	7284	7284	7284	7284

**Tabela A 3.7.** Análise estatística do período de pico ( $T_p$ ) para os pontos: 1,2,3,4,5,6,7,8 e 9 do Pico (Verão).

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
<b>Mediana</b>	10.0705	10.0705	10.0705	10.0705	10.0705	10.0705	10.0705	10.0705	10.0705
<b>Média</b>	9.62336	9.48766	9.485693	9.595158	9.428847	9.337834	9.545558	9.273127	9.179452
<b>Desvio padrão</b>	2.059237	2.225275	2.289397	2.132846	2.311944	2.464375	2.201075	2.512565	2.596296
<b>Máximo</b>	15.0854	15.0854	15.0854	15.0854	15.0854	15.0854	15.0854	15.0854	15.0854
<b>Mínimo</b>	2.4478	2.4478	2.4478	2.4478	2.4478	2.4478	2.4478	2.4478	2.2126
<b>Contagem</b>	7320	7320	7320	7320	7320	7320	7320	7320	7320

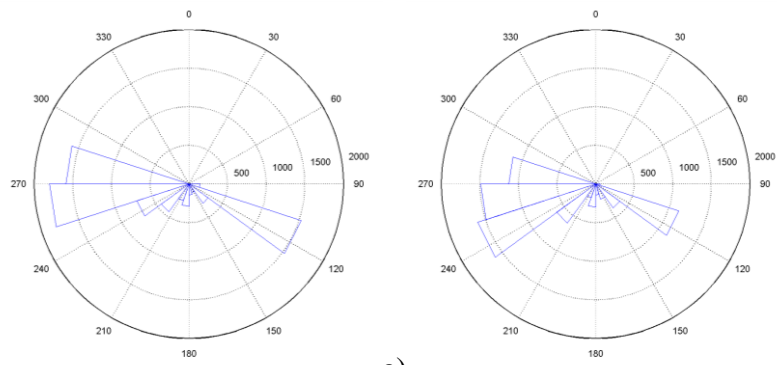
**Tabela A 3.8.** Análise estatística do período de pico ( $T_p$ ) para os pontos: 1,2,3,4,5,6,7,8 e 9 do Pico (Inverno).

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
<b>Mediana</b>	11.1411	11.1411	11.1411	11.1411	11.1411	11.1411	11.1411	11.1411	11.1411
<b>Média</b>	11.27364	11.14326	11.2536	11.30433	11.02818	10.99716	11.22419	10.93905	10.77331
<b>Desvio padrão</b>	2.628755	2.845689	2.796309	2.61759	2.977207	3.081082	2.759311	3.08122	3.264283
<b>Máximo</b>	18.4634	18.4634	18.4634	18.4634	18.4634	18.4634	18.4634	18.4634	18.4634
<b>Mínimo</b>	2.4478	2.4478	2.2126	2.2126	2.2126	2.4478	2	2	2.2126
<b>Contagem</b>	7284	7284	7284	7284	7284	7284	7284	7284	7284

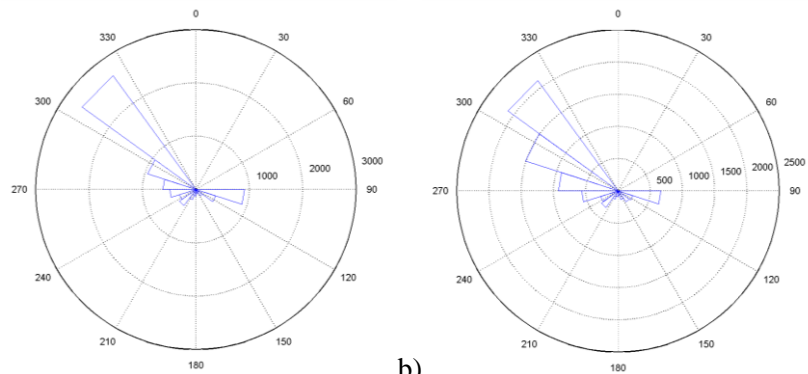
**Tabela A 3.9.** Média dos principais parâmetros estatísticos para o total dos pontos de cálculo (Pico).

	<b>Pico</b>											
	<b>Potência</b>			<b>Altura significativa</b>			<b>Período de pico</b>			<b>Direção</b>		
	Anual	Verão	Inverno	Anual	Verão	Inverno	Anual	Verão	Inverno	Anual	Verão	Inverno
<b>Média</b>	52.1	28.37	72.89	1.7	1.36	2.04	10.2	9.4	11.1	310.2	315.1	300.1
<b>Máximo</b>	736.4	562.73	746.92	7	6.72	7.1	18.5	15.1	18.5	352.5	352.5	352.5
<b>Contagem</b>	14604	7320	7284	14604	7320	7284	14604	7320	7284	14604	7320	7284

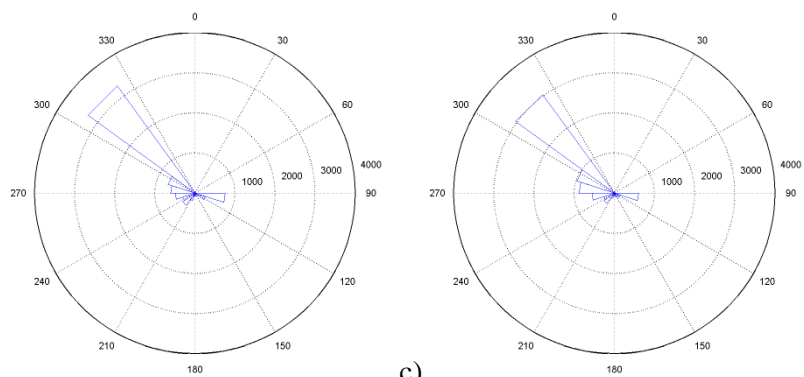
## ANEXO 4



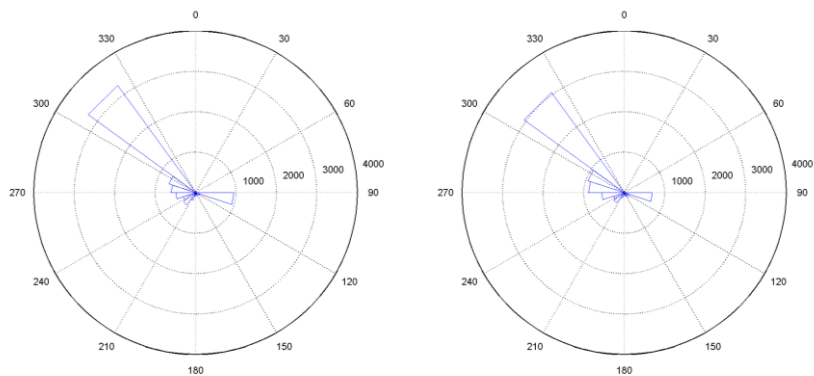
a)



b)

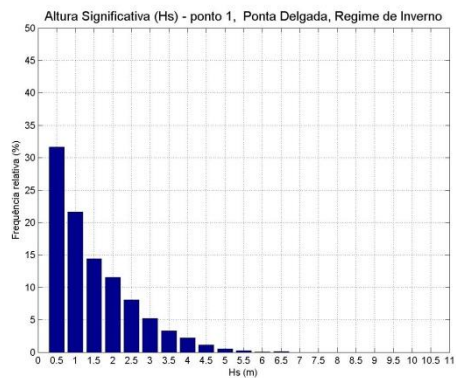
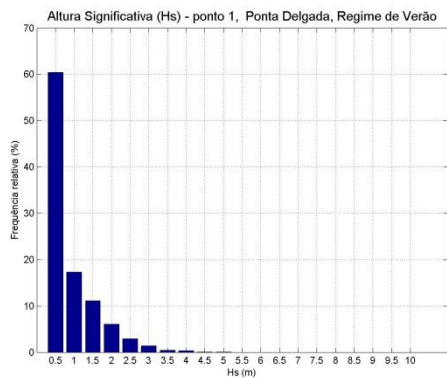


c)

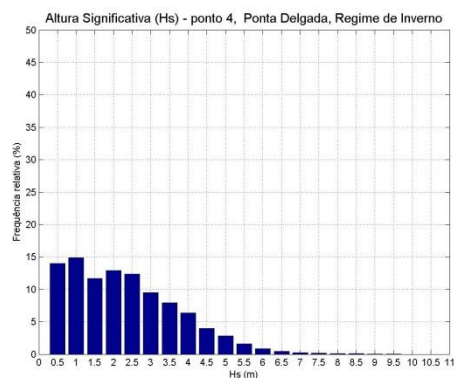
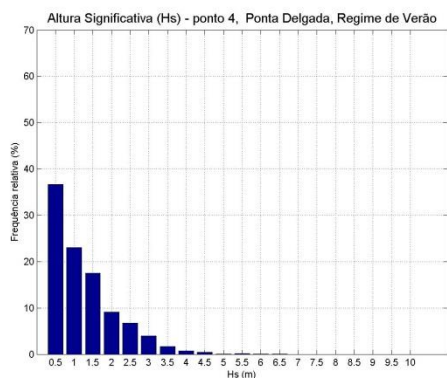


d)

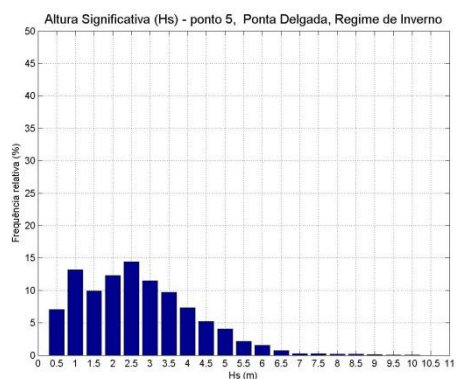
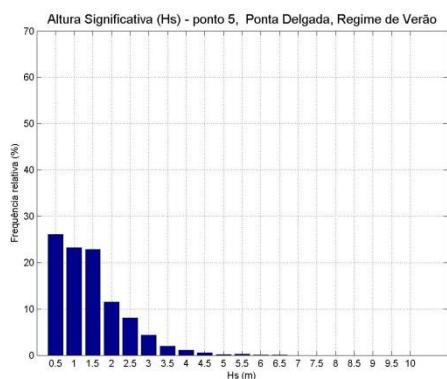
**Figura A 4.1.** Distribuição da direção de pico das ondas para os pontos 1,4,5 e 6 de Ponta Delgada. a) Profundidades a 5 metros. b) Profundidades a 25 metros. c) Profundidades a 50 metros. d) Profundidades a 75 metros. Verão (esquerda); Inverno (direita).



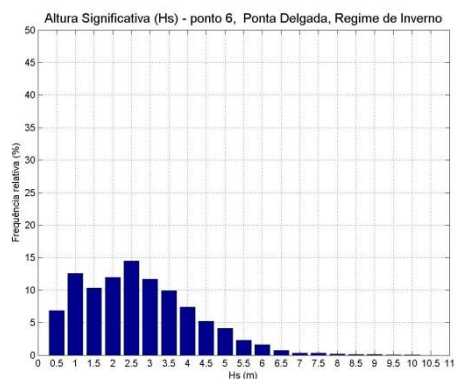
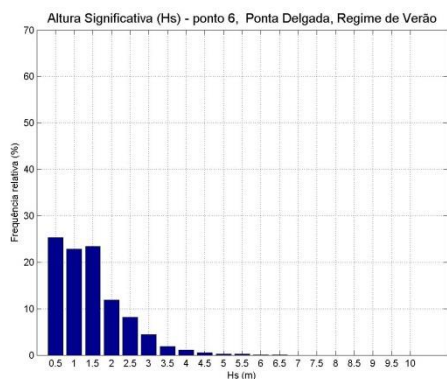
a)



b)

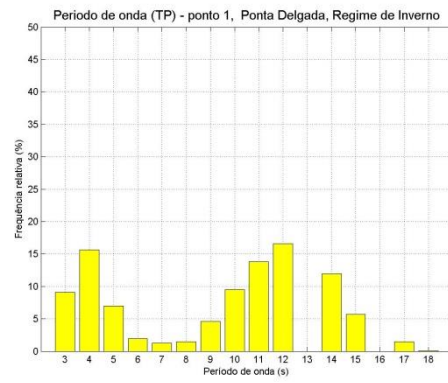
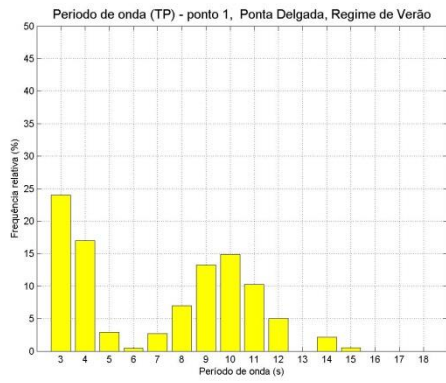


c)

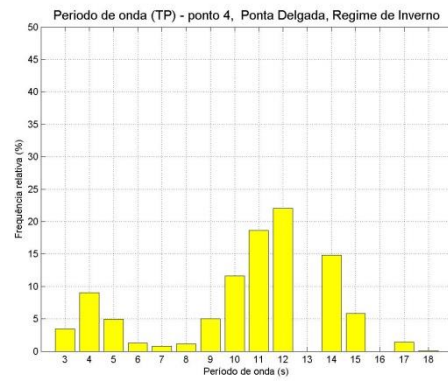
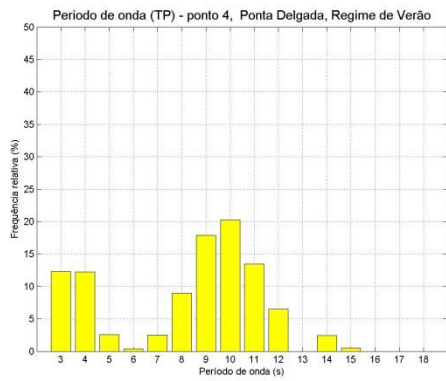


d)

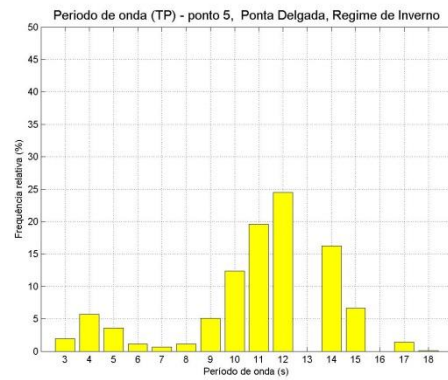
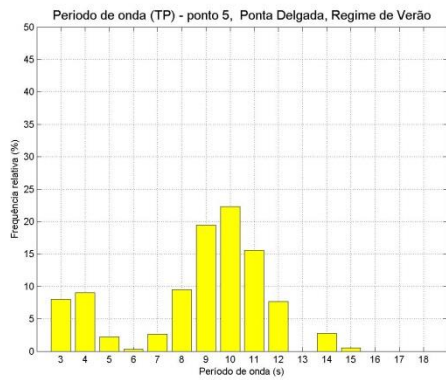
**Figura A 4.2.** Frequência relativa da altura significativa para os pontos 1,4,5 e 6 de Ponta Delgada. a) Profundidades a 5 metros (ponto 1). b) Profundidades a 25 metros (ponto 4). c) Profundidades a 50 metros (ponto 5). d) Profundidades a 75 metros (ponto 6). Verão (esquerda); Inverno (direita).



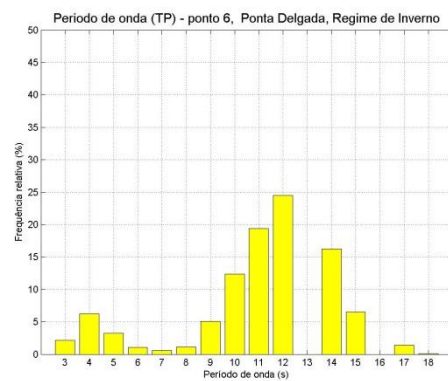
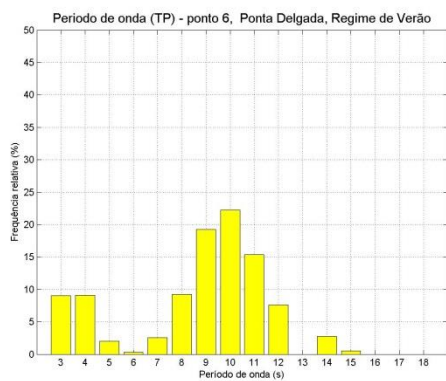
a)



b)



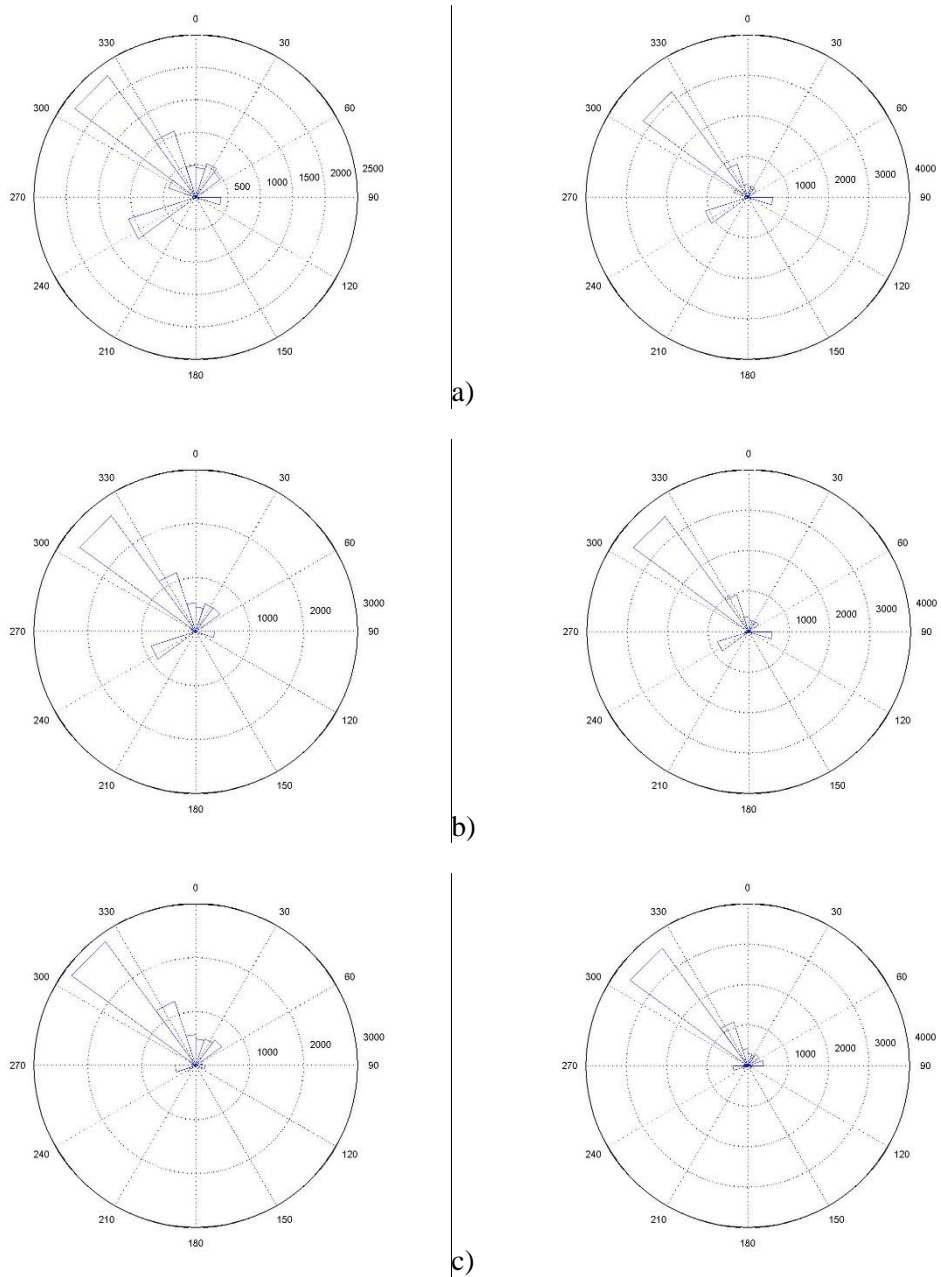
c)



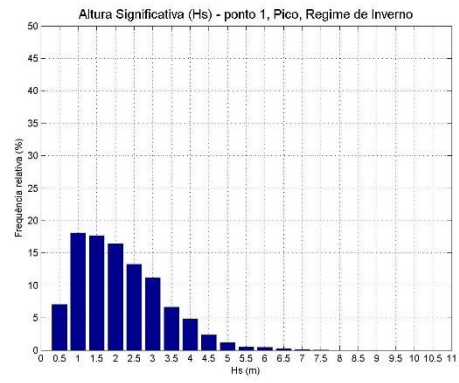
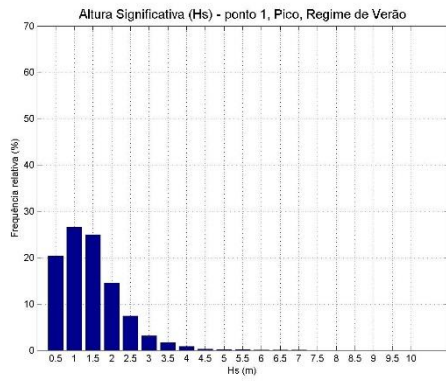
d)

**Figura A 4.3.** Frequência relativa do período de pico para os pontos 1,4,5 e 6 de Ponta Delgada. a) Profundidades a 5 metros (ponto 1). b) Profundidades a 25 metros (ponto 4). c) Profundidades a 50 metros (ponto 5). d) Profundidades a 75 metros (ponto 6). Verão (esquerda); Inverno (direita).

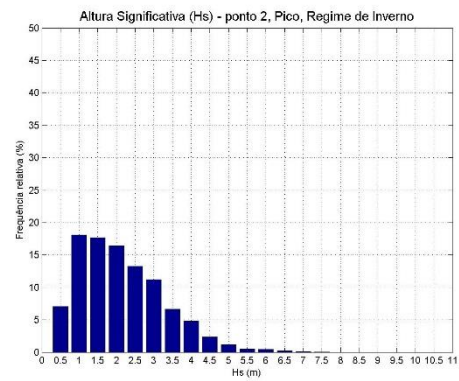
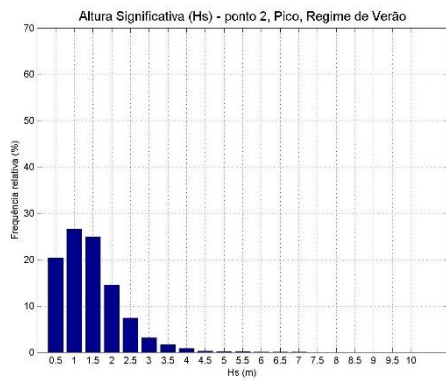
## ANEXO 5



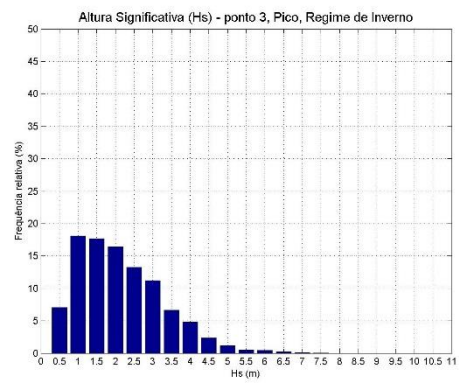
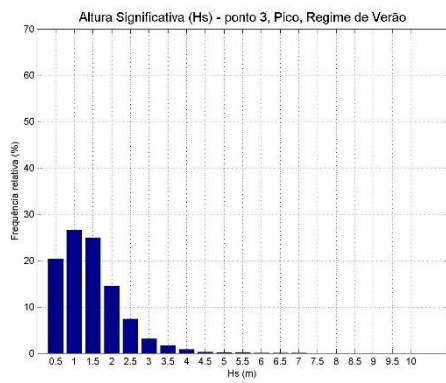
**Figura A 5.1.** Distribuição da direção de pico das ondas para os pontos 1,2 e 3 do Pico. a) Profundidades a 50 metros. b) Profundidades a 30 metros. c) Profundidades a 10 metros. Verão (esquerda); Inverno (direita).



a)

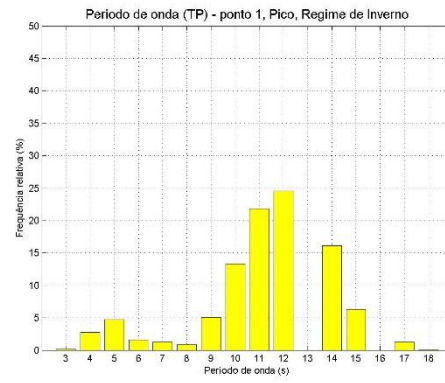
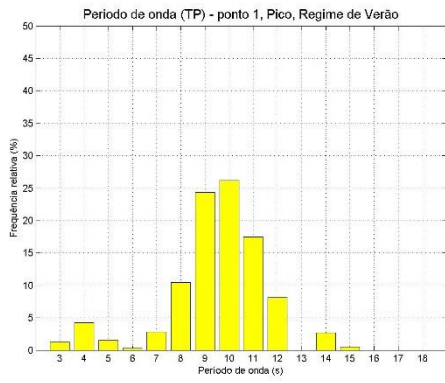


b)

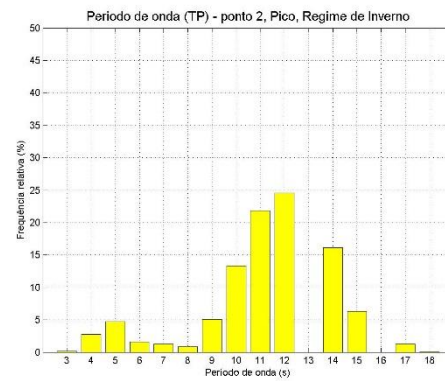
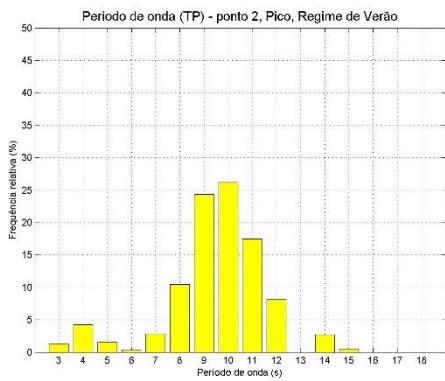


c)

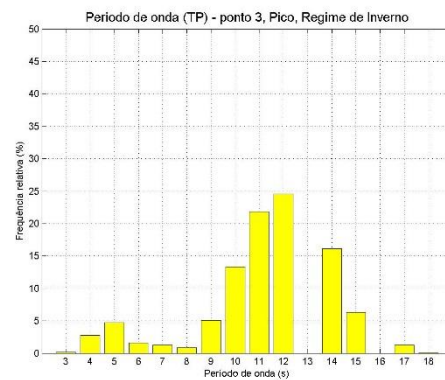
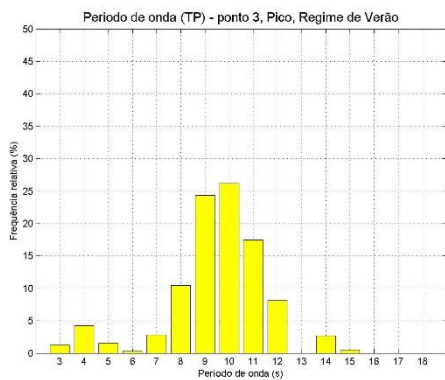
**Figura A 5.2.** Frequência relativa da altura significativa para os pontos 1, 2 e 3 do Pico. a) Profundidades a 50 metros (ponto 1). b) Profundidades a 30 metros (ponto 2). c) Profundidades a 10 metros (ponto 3). Verão (esquerda); Inverno (direita).



a)



b)



c)

**Figura A 5.3.** Frequência relativa do período de pico para os pontos 1,2 e 3 do Pico. a) Profundidades a 50 metros (ponto 1). b) Profundidades a 30 metros (ponto 2). c) Profundidades a 10 metros (ponto 3). Verão (esquerda); Inverno (direita).

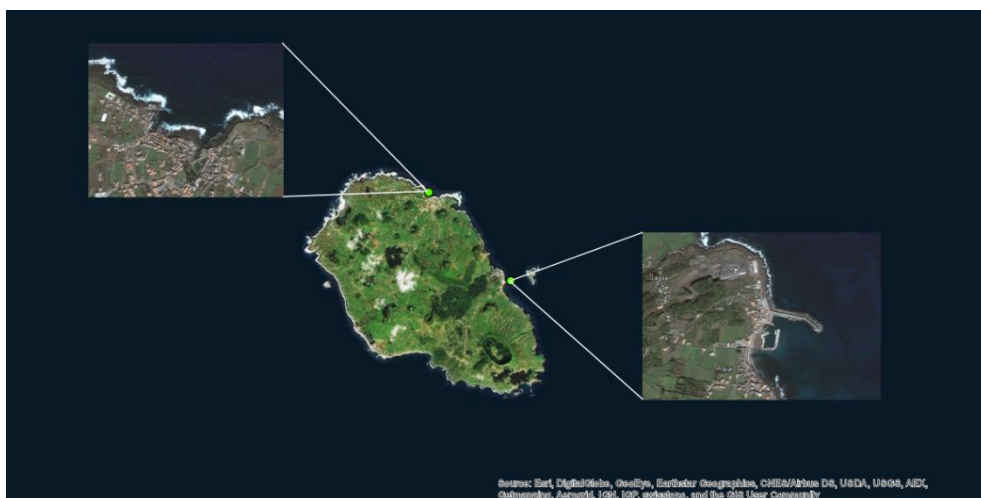
## ANEXO 6



**Figura A 6.1.** Localização da estrutura marítima do Corvo (Corvo).



**Figura A 6.2.** Localização da estrutura marítima da Calheta (São Jorge).



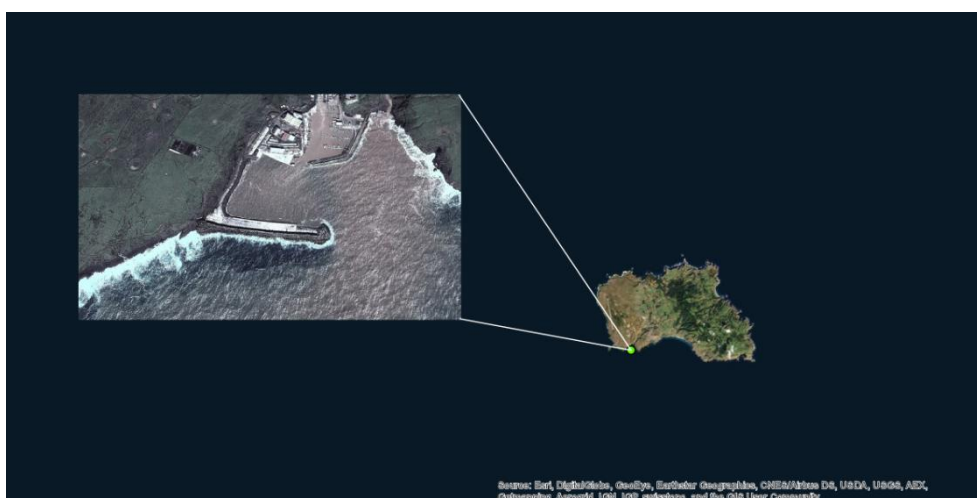
**Figura A 6.3.** Localização da estrutura marítima da Santa Cruz da Graciosa e Praia/Lagoa (da esquerda pra direita) (Graciosa).



**Figura A 6.4.** Localização da estrutura marítima da Praia da Vitória (Terceira).



**Figura A 6.5.** Localização da estrutura marítima dos Mosteiros e de Rabo de Peixe (da esquerda para a direita) (São Miguel).



**Figura A 6.6.** Localização da estrutura marítima de Vila do Porto (Santa Maria).