

**EFEITO DA EXTRAÇÃO DA ENERGIA DAS ONDAS NA
PROPAGAÇÃO DA AGITAÇÃO NA COSTA
PORTUGUESA**

NUNO MIGUEL MARINHO TEIXEIRA MONTEIRO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Doutor Paulo Alexandre de Avilez Rodrigues de Almeida Valente

Coorientador: Doutor Guilherme Moura Paredes

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017

SETEMBRO DE 2017

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Este trabalho de investigação foi desenvolvido no âmbito da linha de investigação ECOSERVICES integrada no Projeto Estruturado de I&D&I INNOVMAR—Innovation and Sustainability in the Management and Exploitation of Marine Resources (referência NORTE-01-0145- FEDER-000035), cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE 2020), através do Portugal 2020 e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

À minha Família

*A experiência nunca falha, apenas as nossas opiniões falham, ao esperar da
experiência aquilo que ela não é capaz de oferecer*

Leonardo da Vinci

AGRADECIMENTOS

Sendo a dissertação o culminar da minha vida académica não poderia deixar de agradecer a algumas pessoas que foram essenciais na realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Paulo Avilez-Valente, orientador deste trabalho, agradeço todos os conhecimentos transmitidos e toda a disponibilidade e acessibilidade demonstradas ao longo deste semestre. Sem o seu auxílio a realização deste trabalho teria sido impossível.

Ao Doutor Guilherme Paredes, coorientador, por toda a ajuda prestada e disponibilidade demonstrada ao longo do semestre e por todas as críticas construtivas que serviram de incentivo para melhorar e completar este trabalho.

A todos os colegas de curso que me acompanharam ao longo desta jornada e por todo apoio e toda a diversão.

À Cristiana, por ser um grande pilar na minha vida e por ter sido um grande apoio nesta etapa.

Um grande obrigado à minha família pois sem ela nada disto teria sido possível.

RESUMO

O objetivo do trabalho que aqui se apresenta é analisar o efeito da extração de energia das ondas na propagação da agitação na costa Portuguesa. A zona em estudo é a Aguçadoura, na Póvoa do Varzim, um local onde já estiveram instalados conversores de energia. Recolheram-se dados referentes à zona em estudo (batimetria e clima de ondas) e ao desempenho dos conversores de energia. Foram considerados conversores do tipo absorvedores pontuais axissimétricos, com 15 m de diâmetro e 4,5 m de calado, com movimento apenas na vertical, isto é, em *heave*. O estudo foi feito para um parque de conversores de energia das ondas, dispostos em três linhas paralelas entre si e perpendiculares à direção de origem da agitação predominante no local (Noroeste), com os conversores distantes entre si de 120 m, e com uma disposição hexagonal. Realizaram-se simulações para quatro dos estados de mar com maior potencial energético, com agitação proveniente de Norte, Noroeste e Oeste, com e sem a presença de conversores de energia. Para as simulações, recorreu-se ao modelo numérico SNL-SWAN, que se destaca por integrar nos seus algoritmos o cálculo automático dos coeficientes de transmissão de obstáculos na propagação da agitação. Os conversores foram introduzidos no modelo como linhas poligonais em forma de “L”, com os seus vértices separados de uma distância igual ao diâmetro do conversor. Uma “face” (segmento de reta que une dois dos vértices do conversor) virada a Norte e outra virada a Oeste. Por último, analisaram-se os resultados das simulações que mostram os efeitos da presença do parque na variação da altura significativa da agitação a sotamar dos conversores de energia das ondas e na variação da direção da propagação da agitação. Os resultados mostraram um impacto pouco significativo da presença do parque de dispositivos de aproveitamento de energia das ondas, tanto na altura significativa da agitação, como na direção de propagação da agitação.

PALAVRAS-CHAVE: Aguçadoura, conversor de energia das ondas, extração de energia das ondas, impactos de parque de energia das ondas, SNL-SWAN.

ABSTRACT

The purpose of the work presented herein is to analyse the effect of wave energy extraction on wave propagation in the Portuguese coast. The area under study is Aguçadoura, Póvoa do Varzim, where wave energy converters have already been installed. Data were collected concerning the location under study (bathymetry and wave climate) and the wave energy converters performance. Axisymmetric point absorbers oscillating in heave with a diameter of 15 m and a draft of 4,5 m were considered as wave energy converters. The study was carried out for a wave farm arranged in three parallel rows, perpendicular to the predominant local wave direction (Northwest), The converters, placed 120 m apart from each other, formed hexagonal shaped cells. Simulations were performed for four of the sea states with the highest energy potential, with waves from North, Northwest and West, with and without the presence of wave energy converters. For the simulations, the SNL-SWAN numerical model for wave propagation was used, which is notable for integrating in its algorithms the automatic calculation of the transmission coefficients for obstacles. The converters were introduced in the model as “L” shaped polygonal lines, whose vertices are at a distance from each other equal to the diameter of a converter. One side (line segment that joins two of the vertices) of the converter facing North and the other one facing West. Finally, the results of the simulations that show the effects of the presence of the wave farm on the significant wave height and on the wave direction were analysed. The results showed a very small impact of the presence of the wave farm on both the significant wave height and the wave direction.

KEY-WORDS: Aguçadoura, wave energy converter, wave energy extraction, wave farm impacts, SNL-SWAN.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	xi

ÍNDICE

1.INTRODUÇÃO	1
2.REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1. EXTRAÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS: INTRODUÇÃO E HISTÓRIA NO CONTEXTO PORTUGUÊS	3
2.2. O CONTEXTO INTERNACIONAL.....	3
2.3. O CONTEXTO PORTUGUÊS	5
3.TEORIA DAS ONDAS E CONVERSORES DE ENERGIA	7
3.1. TEORIA DAS ONDAS.....	7
3.1.1. Agitação Irregular.....	9
3.2. CONVERSORES DE ENERGIA.....	11
3.2.1. Respostas às Forças Exteriores	13
3.3. A CONVERSÃO DE ENERGIA	14
4.MODELO NUMÉRICO: SNL-SWAN	17
4.1. INTRODUÇÃO.....	17
4.2. SWAN.....	17
4.3. SNL-SWAN	19
4.3.1 Coeficientes de transmissão	19
4.3.2. Representação espacial dos obstáculos.....	21
5.METODOLOGIA E CASO DE ESTUDO	23
5.1. DESCRIÇÃO DO CAPÍTULO	23
5.2. AGUÇADOURA.....	23
5.2.1. Batimetria.....	23
5.2.2. Dados da Agitação.....	24
5.3. CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS.....	27
5.3.1. Características dos conversores	27
5.3.2. Disposição dos Conversores de Energia.....	30
5.4. DADOS E SIMULAÇÃO	31
5.4.1. Modelo	31

5.4.2. Simulação	32
6.RESULTADOS	35
6.1. EFEITOS NA ALTURA SIGNIFICATIVA DA AGITAÇÃO	36
6.1.1. Caso A - $HS = 2 m$ e $TP = 10 s$	36
6.1.2. Caso B - $HS = 3 m$ e $TP = 10 s$	38
6.1.3. Caso C - $HS = 3 m$ e $TP = 12 s$	39
6.1.4. Caso D - $HS = 4 m$ e $TP = 12 s$	41
6.2. EFEITOS NA DIREÇÃO DE PROPAGAÇÃO DA AGITAÇÃO	42
6.2.1. Caso A - $HS = 2 m$ e $TP = 10 s$	42
6.2.2. Caso B - $HS = 3 m$ e $TP = 10 s$	44
6.2.3. Caso C - $HS = 3 m$ e $TP = 12 s$	45
6.2.4. Caso D - $HS = 4 m$ e $TP = 12 s$	47
6.3. EFEITOS AO LONGO DA LINHA DE 10 M DE PROFUNDIDADE.....	48
6.3.1. Caso A - $HS = 2 m$ e $TP = 10 s$	49
6.3.2. Caso B - $HS = 3 m$ e $TP = 10 s$	50
6.3.3. Caso C - $HS = 3 m$ e $TP = 12 s$	52
6.3.4. Caso D - $HS = 4 m$ e $TP = 12 s$	54
6.4. COMPARAÇÃO ENTRE OS CASOS.....	56
7.CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	59
7.1. CONCLUSÕES.....	59
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Potência média anual das ondas a nível global [kW/m] (Cruz, 2002)	4
Figura 3.1 – Ondas de zero descendente (superior) e do zero ascendente (inferior)	9
Figura 3.2 – Movimentos possíveis de um corpo flutuante.....	12
Figura 4.1 - Aninhamento de grelhas	19
Figura 4.2 - Obstáculos definidos pelo utilizador (esquerda). Interpretação dos obstáculos pelo SWAN e nós afetados (direita)	22
Figura 5.1 - Local de estudo, Aguçadoura	24
Figura 5.2 – Modelo de um conversor de energia	27
Figura 5.3 - Massa adicionada para um conversor com movimento em heave	29
Figura 5.4 - Coeficiente de amortecimento por radiação para um conversor com movimento em heave	29
Figura 5.5 - Força de excitação para um conversor com movimento em heave	29
Figura 5.6 - Curva de Largura de Captura Relativa.....	30
Figura 5.7 – Disposição do parque de conversores de energia. Distâncias em metros.....	31
Figura 5.8 – Batimetria, grelhas utilizadas nas simulações e posicionamento dos WECs	32
Figura 5.9 – Esquema de um WEC introduzido no modelo.....	33
Figura 6.1 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=2$ m e $T_p=10$ s proveniente de N na altura significativa da agitação	37
Figura 6.2 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=2$ m e $T_p=10$ s proveniente de NW na altura significativa da agitação	37
Figura 6.3 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=2$ m e $T_p=10$ s proveniente de W na altura significativa da agitação.....	37
Figura 6.4 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=10$ s proveniente de N na altura significativa da agitação	38
Figura 6.5 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=10$ s proveniente de NW na altura significativa da agitação	38
Figura 6.6 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=10$ s proveniente de W na altura significativa da agitação.....	39
Figura 6.7 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=12$ s proveniente de N na altura significativa da agitação	40
Figura 6.8 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=12$ s proveniente de NW na altura significativa da agitação	40
Figura 6.9 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=12$ s proveniente de W na altura significativa da agitação.....	40
Figura 6.10 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=4$ m e $T_p=12$ s proveniente de N na altura com significativa da agitação.....	41

Figura 6.11 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=4$ m e $T_p=12$ s proveniente de NW na altura significativa da agitação	41
Figura 6.12 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=4$ m e $T_p= 12$ s proveniente de W na altura significativa da agitação.....	42
Figura 6.13 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=2$ m e $T_p=10$ s proveniente de N na direção de propagação da agitação	43
Figura 6.14 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=2$ m e $T_p=10$ s proveniente de NW na direção de propagação da agitação.....	43
Figura 6.15 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=2$ m e $T_p= 10$ s proveniente de W na direção de propagação da agitação	43
Figura 6.16 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=10$ s proveniente de N na direção de propagação da agitação	44
Figura 6.17 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=10$ s proveniente de NW na direção de propagação da agitação	44
Figura 6.18 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p= 10$ s proveniente de W na direção de propagação da agitação	45
Figura 6.19 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=12$ s proveniente de N na direção de propagação da agitação	46
Figura 6.20 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=12$ s proveniente de NW na direção de propagação da agitação.....	46
Figura 6.21 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p= 12$ s proveniente de W na direção de propagação da agitação	46
Figura 6.22 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=4$ m e $T_p=12$ s proveniente de N na direção de propagação da agitação	47
Figura 6.23 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=4$ m e $T_p=12$ s proveniente de NW na direção de propagação da agitação.....	47
Figura 6.24 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=4$ m e $T_p= 12$ s proveniente de W na direção de propagação da agitação	48
Figura 6.25 – Variação absoluta da altura significativa (m) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_s=2$ m e $T_p=10$ s.....	49
Figura 6.26 – Variação relativa da altura significativa (%) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_s=2$ m e $T_p=10$ s.....	49
Figura 6.27 – Variação da direção de propagação da agitação (°) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_s=2$ m e $T_p=10$ s.....	50
Figura 6.28 – Variação absoluta da altura significativa (m) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=10$ s.....	51
Figura 6.29 – Variação relativa da altura significativa (%) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=10$ s.....	51

Figura 6.30 – Variação da direção de propagação da agitação (°) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=10$ s.....	52
Figura 6.31 – Variação absoluta da altura significativa (m) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=12$ s.....	53
Figura 6.32 – Variação relativa da altura significativa (%) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=12$ s.....	53
Figura 6.33 – Variação da direção de propagação da agitação (°) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=12$ s.....	54
Figura 6.34 – Variação absoluta da altura significativa (m) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_s=4$ m e $T_p=12$ s.....	55
Figura 6.35 – Variação relativa da altura significativa (%) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_s=4$ m e $T_p=12$ s.....	55
Figura 6.36 – Variação da direção de propagação da agitação (°) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_s=4$ m e $T_p=12$ s.....	56

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Exemplo de um diagrama de probabilidades de ocorrência (%) de estados do mar no cabo Silleiro	10
Tabela 5.1 – Probabilidade de ocorrência (%) de estados de mar no cabo Silleiro, entre 1998 e 2016.....	25
Tabela 5.2 – Potência média por unidade de comprimento de crista da onda (kW/m) na zona do cabo Silleiro entre 1998 e 2016	26
Tabela 5.3 – Energia média anual por unidade de comprimento de crista da onda (kWh/m) no cabo Silleiro entre 1996 e 2016.....	26
Tabela 5.4 – Estados de mar usados nas simulações.....	27
Tabela 5.5 – Propriedades físicas do WEC estudado	28
Tabela 6.1 – Potência extraída em cada simulação	35
Tabela 6.2 – Comparação dos resultados das simulações	57

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

a – Massa adicionada

b – Coeficiente de amortecimento por radiação

b_{pto} – Coeficiente de amortecimento do PTO

$b_{pto-opt}$ – Coeficiente de amortecimento ótimo do PTO

b_{res} – Valor do amortecimento por radiação na frequência de ressonância

c – Coeficiente de rigidez hidrostática

c_x – Velocidade de propagação da ação da onda na direção OX

c_y – Velocidade de propagação da ação da onda na direção OY

c_θ – Velocidade de propagação no espaço de direções θ

c_σ – Velocidade de propagação no espaço de frequências σ

d – Profundidade

f – Frequência de onda

f_p – Frequência de pico

f_{pto} – Força aplicada pelo corpo no PTO

g – Aceleração da gravidade

k – Número de onda

m – Massa do WEC

t – Coordenada temporal

u – Amplitude da velocidade de oscilação do WEC

w – Dimensão característica do WEC

x – Coordenada horizontal

y – Coordenada horizontal

z – Coordenada vertical

- C – Celeridade de fase
- C_g – Celeridade de grupo
- E – Energia por unidade de comprimento da crista da onda
- \bar{E} – Energia média por unidade de área horizontal
- F_w – Força de excitação
- H – Altura de onda
- H_{SW} – Altura significativa da agitação com WECs
- H_{S0} – Altura significativa da agitação sem WECs
- $H_{1/3}$ – Altura significativa (parâmetro empírico)
- H_{m0} – Altura significativa (parâmetro espectral)
- H_S – Altura significativa (parâmetro empírico)
- H_u – Função de transferência da velocidade do WEC
- H_ξ – Função de transferência do deslocamento do WEC
- \bar{j} – Fluxo médio de energia da onda
- K_a – Coeficiente de absorção de um obstáculo
- K_r – Coeficiente de reflexão de um obstáculo
- K_t – Coeficiente de transmissão de um obstáculo
- L – Comprimento de onda
- \mathcal{L} – Largura de captura
- \mathcal{L}_{max} – Largura de captura máxima
- \mathcal{L}_r – Largura de captura relativa
- N – Densidade espectral de ação da onda
- P_a – Potência absorvida
- P_i – Potência presente na agitação incidente
- P_{pto} – Potência extraída pelo PTO
- \bar{P}_{pto} – Potência média extraída pelo PTO

- S – Termo de geração/dissipação/redistribuição da energia na equação de conservação da ação da onda
- S_η – Densidade espectral da elevação da superfície livre
- S_0 – Secção transversal do corpo ao nível da superfície livre
- S_ξ – Densidade espectral do deslocamento de um corpo flutuante
- T – Período de onda
- T_p – Período de pico
- T_Z – Período médio de zero (ascendente ou descendente)
-
- γ – Parâmetro de forma do espectro JONSWAP
- ϵ – Ângulo de fase da elevação da superfície livre
- η – Elevação da superfície livre em relação ao nível de repouso
- θ – Direção de propagação da agitação
- ξ – Valor escalar do deslocamento do WEC
- $\dot{\xi}$ – Valor escalar da velocidade do WE
- $\ddot{\xi}$ – Valor escalar da aceleração do WEC
- $\hat{\xi}$ – Escalar da amplitude de deslocamento do WEC
- ρ_w – Massa volúmica da água do mar
- σ – Frequência relativa da onda e parâmetro da expressão do espectro JONSWAP
- ϕ – Ângulo de fase do deslocamento do corpo
- χ – Coeficiente de força de onda
- ω – Frequência angular da onda
-
- ΔH_S – Variação da altura significativa da agitação (relativa e absoluta)
- $\Delta\theta$ – Variação da direção de propagação da agitação

- GEBSCO – *General Bathymetric Chart of the Oceans*
- JONSWAP – *Joint North Sea Wave Observation Project*
- NSSM – *Navy Standard Surf Model*
- OWC – *Coluna de Água Oscilante (Oscillating Water Column)*
- PTO – *Power Take-Off*
- ROMS – *Regional Ocean Modelling System*
- SNL-SWAN – *Sandia National Laboratories-SWAN*
- SWAN – *Simulating WAVes Nearshore*
- WEC – *conversor de energia das ondas (wave energy converter)*

1

INTRODUÇÃO

Em Falcao (2010), a energia das ondas é descrita como a forma mais óbvia de energia proveniente do mar. Os efeitos destrutivos nas estruturas costeiras produzidos pelas ondas são uma forma de observação do seu potencial. A energia das ondas tem vindo a ganhar relevância e vários são os países que a consideram um recurso importante e promissor.

Para que a extração de energia seja possível, haverá necessariamente a instalação de dispositivos capazes de transformar a energia contida nas oscilações (tanto a cinética, como a potencial) da superfície do mar em energia para a rede elétrica, os dispositivos de aproveitamento de energia das ondas. A localização de um conjunto de dispositivos poderá ter impacto a sotamar. A propagação da agitação pode sofrer alterações, assim como os padrões de circulação – afetando as atividades de recreio ou económicas – e, possivelmente, o transporte de sedimentos na linha da costa o que poderá conduzir a efeitos prejudiciais nos processos ecológicos, económicos e sociais (Gonzalez-Santamaria et al., 2013).

Em Smith et al. (2007), é estudado o impacto do projeto Wave Hub na região da Cornualha, em Inglaterra, que é uma zona onde a prática do surf tem grande relevância. Na realização desse projeto foi feita uma consulta pública de modo a explicar o modelo à comunidade de surfistas. Foram levantadas várias questões, e uma delas era a redução da altura das ondas na costa por absorção de energia pelos WECs. Este é um exemplo da importância do estudo que aqui se apresenta.

Este estudo tem como objetivo a análise dos efeitos da extração de energia na propagação da agitação marítima, tanto na altura significativa como na direção de propagação.

O presente trabalho focar-se-á nos efeitos ao largo da freguesia da Aguçadoura, na Póvoa de Varzim. Neste local esteve instalado, e em funcionamento, um parque de conversores de energia *Pelamis* que, entretanto, foi desmontado. Este é agora um local utilizado para testes de aproveitamento de energia com outros sistemas, como o projeto *Windfloat*, entretanto findado (Principle-Power, 2015, Expresso, 2016). É, portanto, uma zona da costa portuguesa que tem sido considerada como de elevado potencial energético, não tendo até agora sido objeto de um estudo dos efeitos da instalação de conversores de energia sobre a agitação marítima. Justifica-se então a escolha da zona de estudo.

Adotar-se-á como WECs (*wave energy converters*) absorvedores pontuais axissimétricos (cilindros perfeitos) com apenas liberdade de movimento vertical (*heave*). Os dispositivos serão otimizados para

os estados de mar locais e serão instalados em forma hexagonal alongada numa zona com 60 m de profundidade.

Para a realização das simulações recorrer-se-á ao modelo numérico SNL-SWAN (uma variação do modelo SWAN), que é um modelo capaz de ter em consideração as características de desempenho dos conversores de energia.

Atualmente, ainda não há experiência suficiente na operação de parques de conversores de energia das ondas, pelo que não há muita informação concreta sobre os efeitos dos mesmos ao longo da costa. Contudo, as simulações de modelos de agitação, com base em condições com maior probabilidade de ocorrência, podem colmatar esta falha e prever (ainda que com um grau de incerteza) o comportamento de WECs com diferentes características perante estes cenários.

Em Portugal, existem alguns trabalhos já realizados que abordam esta temática. Por exemplo, os trabalhos de Palha et al. (2010) e Rusu e Guedes Soares (2013) focam a Zona Piloto, que se situa ao largo de São Pedro de Moel, perto de Peniche. Nestes trabalhos são analisados os efeitos de parques de ondas compostos por *Pelamis*. Este assunto será melhor desenvolvido no capítulo 2, onde será abordado o estado da arte.

Neste trabalho, para o dimensionamento dos conversores de energia das ondas, parte-se dos conceitos base da teoria linear de ondas. É a partir desta teoria que se desenvolvem os conceitos teóricos fundamentais para a execução deste estudo e estes estão explicados no capítulo 3.

No capítulo 4, é descrito o modo de funcionamento do modelo numérico SNL-SWAN. Todas as suas limitações na leitura e processamento de dados fornecidos ao modelo são abordadas neste capítulo.

Toda a informação referente ao caso de estudo é explicada no capítulo 5. Os contratemplos encontrados e a maneira como foram ultrapassados são aqui incluídos.

Os resultados das simulações realizadas são apresentados no capítulo 6. Neste capítulo, far-se-á uma breve análise dos resultados obtidos através do modelo numérico.

Por último, no capítulo 7, far-se-ão as reflexões sobre os resultados obtidos e possíveis desenvolvimentos futuros do estudo.

2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1. EXTRAÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS: INTRODUÇÃO E HISTÓRIA NO CONTEXTO PORTUGUÊS

Na década de 70 do séc. XX assistiu-se a uma crise no petróleo. Isto levou a que houvesse um maior desenvolvimento na área das energias renováveis e, com ele, um maior desenvolvimento na tecnologia de extração de energia das ondas, tendo Stephen Salter sido um grande motivador e dinamizador da época (Salter, 1974, Cruz, 2008).

Mais recentemente, com a crescente consciencialização da população mundial para a preservação do meio ambiente e com a ideia de as reservas de petróleo se estarem a esgotar, assistiu-se a um novo impulso no desenvolvimento das energias renováveis que atraiu o interesse dos governos ocidentais, nos quais se incluía Portugal.

Portugal possui uma extensa linha de costa e situa-se num dos locais, a nível global, com maior potencial energético (conferir Figura 2.1), tendo, por isso, grande potencial de aproveitamento desta forma de energia. Nesse sentido, tem-se assistido à realização de diversos projetos ao longo dos anos: a Coluna de Água Oscilante (*Oscillating Water Column* – OWC) na ilha do Pico, nos Açores, em 1999 (Falcão, 2000); o parque de conversores de energia das ondas na Aguçadoura, utilizando dispositivos *Pelamis*, em 2008, que apenas funcionou 3 meses (Lusa, 2009, CM, 2012); o dispositivo *Waveroller*, em Peniche, que iniciou a sua fase de teste com protótipos em 2007 (AW-Energy, 2010). Em Peniche, fruto dos resultados dessa fase inicial, instalou-se um parque de ondas, composto por 3 unidades *Waveroller*, que está, desde 2012, a ser testado (Portal-Energia, 2016). Estes tratam-se apenas de alguns exemplos de projetos realizados em Portugal.

2.2. O CONTEXTO INTERNACIONAL

A energia das ondas é considerada uma fonte de energia renovável, no entanto, a sua extração tem efeitos no local onde ocorre. Um pouco por todo o mundo, foram já realizados estudos sobre a influência da extração de energia das ondas na propagação da agitação. Os locais de maior foco são, normalmente, aqueles onde o potencial de energia extraída é maior também, tais como, como a Baía de Monterrey, na Califórnia e a região da Cornualha, em Inglaterra (Figura 2.1).

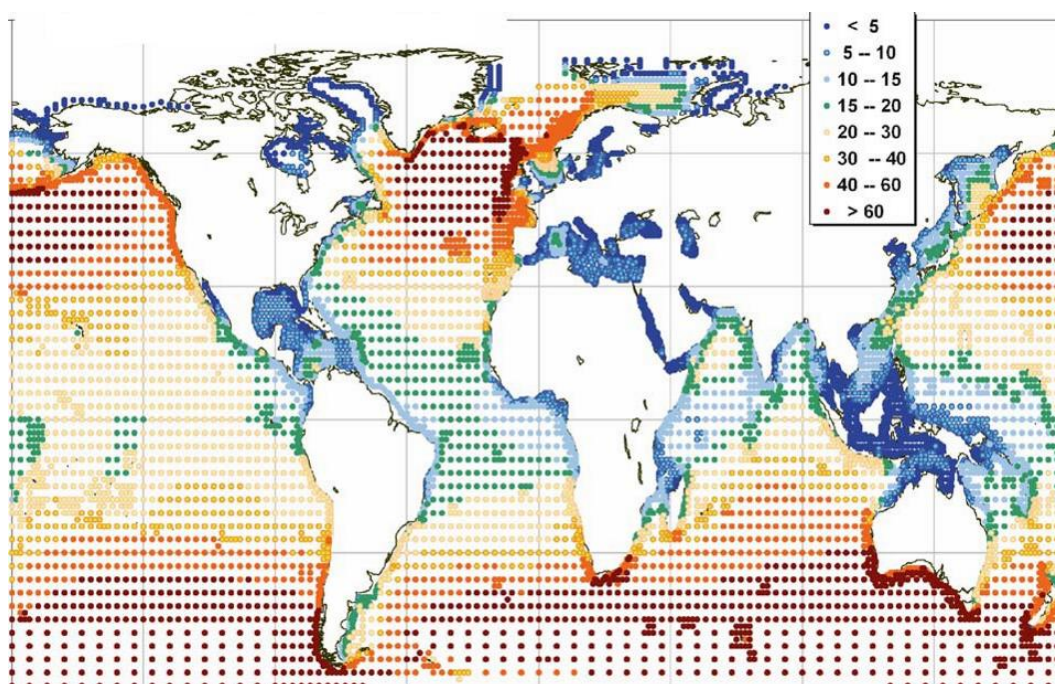


Figura 2.1 – Potência média anual das ondas a nível global (kW/m) (Cruz, 2008)

Na zona da Cornualha, Millar et al. (2007) recorre ao SWAN (Booij et al., 1996) para simular os impactos do projeto *Wave Hub* na região. No estudo, os dispositivos encontram-se à profundidade de 50 m a 60 m e são modelados como obstáculos aos quais são atribuídos os seguintes coeficientes de transmissão de energia: 0%, absorção completa da energia da ondulação incidente (cenário irreal, que apenas foi tomado em consideração para produzir os maiores impactos na costa); 70%, que representa um parque de ondas denso e de WECs grande eficiência (cenário otimista); 90%, que representa um parque de ondas de baixa eficiência (cenário realista); e 40%, que apenas foi incluído de modo a estabelecer uma linha de tendência (cenário altamente improvável). Para as várias alturas significativas, períodos médios e direções dos estados de mar da região, são analisadas as variações das alturas e direções médias das ondas na linha de costa estudada.

Conclui-se que o parque de ondas do estudo não produzirá grandes alterações na zona costeira. Por exemplo, para o cenário mais próximo da realidade (coeficiente de transmissão de 90%), a altura significativa das ondas na linha da costa terá, em média, uma variação de 1 cm, ou menor, nos estados de mar modelados. Considerando a convenção cartesiana, a agitação proveniente das direções entre os 330° e os 30° provocará um maior impacto dos WECs enquanto que, por outro lado, a agitação com origem nas direções entre 90° e os 240° provocará um impacto quase nulo.

Para o mesmo projeto na Cornualha, Gonzalez-Santamaria et al. (2011) estudam a influência do parque de ondas no transporte de sedimentos ao longo da costa, tendo em consideração a variação do nível da água provocada pelas marés. Para tal, foi aplicado um modelo do SWAN (para a simulação da agitação) que foi complementado com um modelo do ROMS (*Regional Ocean Modelling System*) (Shchepetkin e McWilliams, 2003) para o estudo da evolução morfológica da linha de costa.

É concluído que, a maior variação da altura das ondas (5 cm a 10 cm), ocorre para o caso de maré alta. Para o transporte de sedimentos, há uma variação de 0,002 kg/m³ na concentração de sedimentos quando se compara os resultados com e sem a presença do parque. Os efeitos da concentração de sedimentos

têm maior relevância no caso do nível de água mais elevado (maré alta), acumulando-se ao longo de 26 km; no caso de um nível de água mais baixo (maré baixa), os sedimentos concentram-se em zonas mais afastadas da costa.

Em Abanades et al. (2015), na praia de Perranporth (também na Cornualha), é estudado o modo como a distância à costa influencia os impactos do projeto *Wave Hub*. Com recurso aos modelos SWAN, para a interação ondulação-WECs, e XBeach (Roelvink et al., 2010), para a determinação dos efeitos na dinâmica da praia, avalia-se de que maneira a morfologia da praia é afetada. Dos resultados do estudo, observa-se que, com o aumento da proximidade do parque de ondas à costa, há uma diminuição da erosão (para o cenário de maior proximidade, a redução da erosão atingiu os 15%). Observa-se ainda que a presença do parque de ondas tem capacidade para alterar o carácter da praia de dominância de ondulação para dominância de maré.

Na Baía de Monterrey, na Califórnia, mais precisamente na costa de Santa Cruz, Roberts et al. (2015) estudam os efeitos de um parque de ondas composto por 50 WECs para três condições diferentes de agitação: de ocorrência média, *swell* com origem a sul e situação de tempestade. Os conversores apenas se podem deslocar em *heave*. As simulações que serviram de base ao trabalho foram realizadas no modelo SNL-SWAN (Ruehl et al., 2013), baseando-se na matriz de potência específica dos WECs, e a análise focou as alterações registadas na altura significativa das ondas.

Na mesma baía, na zona costeira da cidade de Monterrey, Chang et al. (2016) estudam a influência das dimensões e disposições dos WECs na propagação da agitação. Com recurso ao modelo SNL-SWAN, é executada a simulação das interações ondas-conversores e são analisados os resultados através da variação da altura significativa das ondas a sotamar dos parques. As matrizes de potência usadas nas simulações, bem como algumas das características dos conversores simulados no referido estudo foram retiradas de Babarit et al. (2012). Os vários dispositivos considerados são aplicados numa zona de 40 m de profundidade. O conversor F-2HB é um dos vários dispositivos considerados e destaca-se pelo facto de ter 20 m de diâmetro e 50 m de calado, o que revela uma inconsistência grave no estudo de Chang et al. (2016).

De Chang et al. (2016) conclui-se que, em média, houve uma variação da altura significativa de cerca de 15%, sendo que para dispositivos com menos de 10 m de diâmetro a variação foi inferior. No caso de uma configuração de 100 WECs com 26 m de diâmetro (boias B-OF), a variação da altura significativa a sotamar atingiu mesmo os 30% para uma agitação incidente com 1,7 m de altura (os valores da sua matriz de potência eram os maiores para esta altura de ondulação incidente). No entanto, foi para uma configuração de dispositivos com 50 m de diâmetro (boias F-OWC) que se verificou uma maior extensão de costa afetada. Tanto as direções como os períodos médios das ondas não apresentaram variações significativas.

2.3. O CONTEXTO PORTUGUÊS

Observando a Figura 2.1, verifica-se que Portugal se situa numa zona com elevado potencial energético. Em território nacional, os efeitos da conversão de energia na costa foram estudados por Palha et al. (2010) e Rusu e Guedes Soares (2013), por exemplo. Ambos os estudos focam os efeitos de um parque de ondas de conversores *Pelamis* na Zona Piloto portuguesa, ao largo de São Pedro de Moel, Peniche.

Em Palha et al. (2010), são analisadas cinco configurações diferentes para o parque de ondas. Cada configuração é composta por parques de ondas mais pequenos, a que chamaremos células. Em três das configurações, as células estão dispostas em linha reta, perpendicular à direção de propagação da agitação; nas restantes duas configurações, as células são dispostas em duas e três linhas, paralelas entre si e perpendiculares à direção de propagação da agitação. São realizadas simulações com dados de três diferentes condições de agitação representativas dos meses Janeiro, Julho e Outubro, e para dois cenários, com e sem WECs. Com recurso ao modelo REFDIF (Kirby e Dalrymple, 1983), foi simulada a agitação e, ao longo da linha batimétrica dos 10 m, foram registadas as diferenças nos parâmetros caracterizadores da agitação para os cenários referidos.

É concluído que: a extensão da linha de costa afetada pela presença do parque de ondas depende do comprimento deste na direção perpendicular à direção de propagação da agitação; o número de linhas de células terá influência na altura das ondas a sotamar do parque – quanto mais linhas, maior será o efeito; considerando o mesmo número de linhas de células na configuração de um parque de ondas e o mesmo comprimento do parque, o comprimento da linha de costa afetada será maior para o parque que possuir mais células; e a existência do parque não influencia, de maneira significativa, a direção da agitação próxima da costa.

Rusu e Guedes Soares (2013) estudam as consequências ao longo da costa do parque de ondas de dispositivos *Pelamis*, com duas configurações diferentes: uma primeira (P1), um parque de ondas de 5 *Pelamis* dispostos em uma linha, e uma segunda (P2), um parque de ondas de 10 *Pelamis* dispostos em duas linhas (5 em cada). Consideraram ainda uma terceira configuração, sem a presença de conversores, para comparação, e simularam-nas no SWAN. Depois, com recurso a um modelo NSSM (*Navy Standard Surf Model*) (Barron et al., 2007), analisaram-se as alterações na dinâmica da costa, nomeadamente, a velocidade da corrente ao longo da linha da costa.

Com isto, verificou-se que a altura significativa das ondas a sotamar do parque era afetada pelos conversores. A configuração P1 induz uma redução de 10% na altura significativa das ondas nas zonas imediatamente a sotamar dos WECs e uma redução de 2% a 3% na altura significativa das ondas nas zonas próximas da costa; a configuração P2, provoca uma redução superior a 20% da altura significativa imediatamente a sotamar dos WECs e uma redução inferior a 5%, em média. A configuração P2 afeta ainda uma maior extensão da costa em comparação com P1. Verifica-se também que P1 reduz a velocidade de corrente ao longo da linha da costa cerca de 5%; já P2, induz uma redução de, aproximadamente 8% na mesma velocidade. Conclui-se assim, que o parque de ondas tem um maior impacto direto nas correntes próximas da costa do que na ondulação.

3

TEORIA DAS ONDAS E CONVERSORES DE ENERGIA

3.1. TEORIA DAS ONDAS

Os trabalhos pioneiros acerca da modelação matemática dos conversores de energia das ondas basearam-se na teoria linear de ondas (ou teoria de Airy). Esta é uma teoria simples, e, portanto, de fácil aplicação na investigação inicial dos conversores de energia das ondas, e também era usada na arquitetura naval e engenharia *offshore*, o que permitiu, desde logo, aproveitar o trabalho desenvolvido até então acerca da hidrodinâmica de navios e de estruturas *offshore* (Cruz, 2008).

Segundo esta teoria, na agitação regular, as ondas têm um perfil sinusoidal repetitivo que é dado por:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t + \epsilon) \quad (3.1)$$

em que η representa a elevação da superfície livre acima do nível médio ou de repouso, H a altura da onda, k o número de onda, x a coordenada horizontal, ω a frequência angular, t o tempo e ϵ o ângulo de fase.

O número de onda é definido como:

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (3.2)$$

onde L é o comprimento de onda. O comprimento de onda pode ser determinado resolvendo a relação de dispersão implícita, expressa como (Holthuijsen, 2007):

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (3.3)$$

na qual g representa a aceleração da gravidade, T o período da onda e d a profundidade. Na agitação regular assume-se que, perpendicularmente à direção de propagação das ondas, estas têm um comprimento de crista infinitamente longo.

A frequência angular, ω , é definida como:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (3.4)$$

em que f é a frequência cíclica. A celeridade de fase das ondas lineares é definida como:

$$C = \frac{\omega}{k} = \frac{L}{T} \quad (3.5)$$

É possível usar a teoria linear na resolução de casos complexos, uma vez que os resultados que se obtêm são lineares e possíveis de se somar para alcançar as soluções pretendidas. Assim, quando duas ou mais ondas, com alturas e períodos diferentes entre si, se sobrepõem, o total da elevação da superfície livre será apenas a soma individual da elevação da superfície de cada onda. O mesmo princípio se aplica a outros parâmetros como a pressão, a posição, a velocidade e a aceleração.

A teoria linear é válida para ondas de pequeno declive, ou seja, ondas em que a sua altura, H , seja pequena relativamente ao seu comprimento, L . Assim, é uma teoria válida quando se analisa estados de mar moderados em água profundas. Porém, em condições extremas (de estados de mar) ou em águas pouco profundas, esta abordagem simplificada levará a resultados pouco exatos.

Segundo Newman (1978), o total de energia contida numa unidade de comprimento da crista de uma única onda com um comprimento L , é dado, por:

$$E = \frac{\rho_w g H^2 L}{8} \quad (3.6)$$

em que E é a energia por unidade de comprimento da crista da onda e ρ_w representa a massa volúmica da água da água salgada ($\rho_w = 1025 \text{ kg/m}^3$). Ao dividir a energia pelo comprimento da onda, obtém-se a densidade energética da onda (ou a média da energia por unidade de área horizontal ao longo da superfície livre), \bar{E} .

$$\bar{E} = \frac{\rho_w g H^2}{8} \quad (3.7)$$

A potência média por unidade de comprimento da crista, também conhecido como o fluxo médio de energia da onda, é:

$$\bar{J} = \bar{E} C_g \quad (3.8)$$

onde $C_g = n C$ é a celeridade de grupo, com n dado por

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\frac{4\pi d}{L}}{\sinh\left(\frac{4\pi d}{L}\right)} \right) \quad (3.9)$$

A celeridade de grupo é a velocidade de propagação de um grupo de várias ondas com períodos diferentes, mas aproximados. Também se pode considerar que C_g é a velocidade com que a energia é transportada durante a propagação da onda.

3.1.1. AGITAÇÃO IRREGULAR

Na realidade, as ondas não possuem um perfil sinusoidal repetitivo nem possuem um comprimento de crista infinitamente longo. Aproximam-se mais de oscilações aleatórias denominadas de agitação irregular ou estados de mar irregular.

Segundo Holthuijsen (2007), uma onda em agitação irregular é definida por dois zeros descendentes ou ascendentes consecutivos (ver Figura 3.1). Designa-se por zero descendente o ponto onde uma função cruza o eixo das abcissas e passa do quadrante positivo para o quadrante negativo (gráfico superior da Figura 3.1). O zero ascendente é o ponto onde uma função cruza o eixo das abcissas e passa do quadrante negativo para o quadrante positivo (gráfico inferior da Figura 3.1).

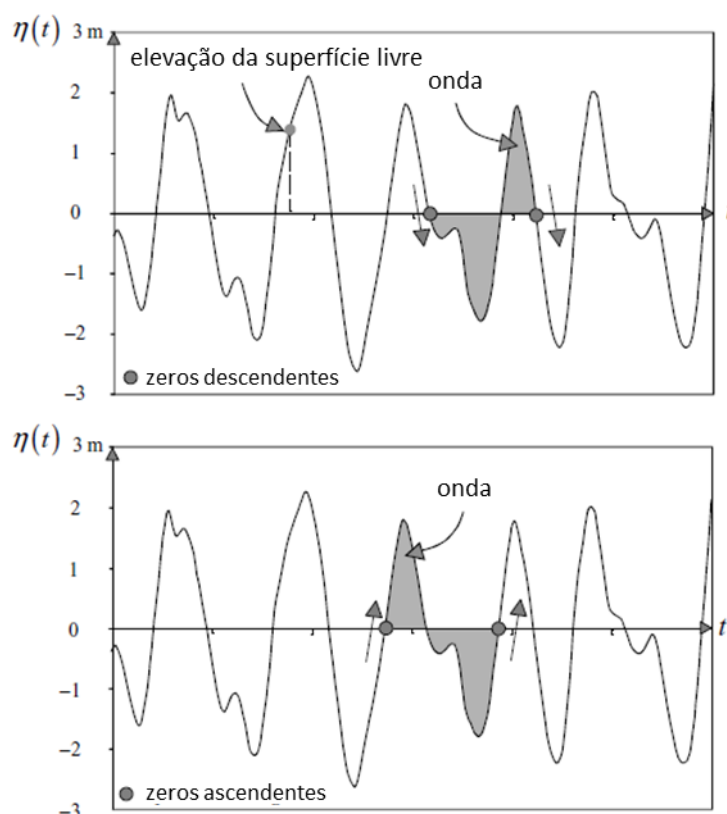


Figura 3.1 – Ondas de zero descendente (superior) e de zero ascendente (inferior)

O ponto mais elevado de uma onda é a sua crista e o mais baixo a sua cava. A diferença entre ambos é a altura da onda, H . Se a onda estiver a ser caracterizada em função do espaço, a distância entre os zeros consecutivos (descendentes ou ascendentes) que caracterizam a onda representa o seu comprimento L ; se estiver a ser caracterizada em função do tempo, então essa distância é o seu período T . Porém, estas definições apenas são válidas para registos de superfície livre que podem ser feitos num instante no tempo ao longo de uma direção no espaço, ou para um ponto no espaço durante um intervalo de tempo.

O que distingue um estado de mar irregular são as diferentes alturas, períodos e comprimentos de onda que o caracterizam. Assim, não é possível obter resultados com confiança se apenas se usar um período e uma altura de onda na modelação desse estado de mar, como é feito no caso da agitação regular. Pode, no entanto, modelar-se um estado de mar irregular com recurso a parâmetros empíricos que caracterizem

a variedade desse mesmo estado de mar. Entre os parâmetros empíricos mais comuns estão a altura significativa, H_S , o período médio de zero (ascendente ou descendente), T_Z , e o período de pico T_P .

A altura significativa, H_S , é a média da terça parte das ondas com maior altura registadas e, de modo a haver distinção entre este método de determinação e um método espectral, também se representa por $H_{1/3}$. T_Z é a média dos períodos de cruzamento de zeros (descendentes ou ascendentes) individuais das ondas e T_P é o período da altura de onda mais frequente do registo.

Uma das formas de obter estes dados é através de boias que registam informação acerca da agitação do local onde estão instaladas, num intervalo de tempo bastante longo. Esses dados são depois apresentados num diagrama de estados do mar.

Tabela 3.1 – Exemplo de um diagrama de probabilidades de ocorrência (%) de estados do mar no cabo Silleiro

		T_P [s]									
		4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	20,0	
H_s [m]	$\leq 1,0$	0,124	0,583	2,848	3,203	0,682	0,140	0,024	0,003		
	2,0	0,106	4,614	8,008	17,331	7,850	1,797	0,510	0,059	0,006	
	3,0		1,250	3,193	9,313	10,419	3,138	0,702	0,071	0,010	
	4,0		0,024	0,754	2,675	5,918	3,096	0,656	0,031	0,006	
	5,0			0,178	0,864	2,156	2,343	0,703	0,032	0,013	
	6,0			0,015	0,197	0,659	1,132	0,600	0,027	0,009	
	7,0			0,001	0,035	0,163	0,457	0,414	0,030	0,008	
	8,0				0,009	0,038	0,152	0,262	0,021		
	9,0				0,002	0,014	0,047	0,129	0,023	0,001	
	10,0					0,001	0,012	0,052	0,014		
	$> 10,0$						0,001	0,017	0,014		

Na Tabela 3.1 apresentam-se as probabilidades de ocorrência de estados de mar, na região do cabo Silleiro, com as alturas significativas e períodos de pico indicados.

A agitação irregular é geralmente descrita recorrendo a espectros. Um espectro paramétrico é um espectro que tenta reproduzir o conteúdo energético dos registos de agitação com base em parâmetros pré-definidos, como por exemplo H_S e T_P . Vários estudos de registos levaram a propostas de espectros paramétricos semi-empíricos. Um dos mais comuns, e que vai ser utilizado neste trabalho, é o espectro JONSWAP (Hasselmann et al., 1973). Este espectro é muito utilizado na caracterização de estados do mar, e pode ser escrito na forma (Holthuijsen, 2007);

$$S_{\eta}(f) = \frac{H_S^2 f_P^4}{B} f^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_P}\right)^{-4}\right) \gamma^{\exp\left(\frac{1}{2}\left(\frac{f}{f_P}-1\right)^2/\sigma^2\right)} \quad (3.10)$$

$$B = 16 (0,06533 \gamma^{0,8015} + 0,13467) \quad (3.11)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{se } f \leq f_P \\ 0,09 & \text{se } f > f_P \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\gamma = [1,10] \quad (3.13)$$

onde $S_\eta(f)$ é a densidade espectral, f a frequência da onda, $f_p = 1/T_p$ é a frequência de pico e γ é o parâmetro de forma do estado do mar que, em oceanos e grandes mares, toma o valor de 3,3.

Em Falnes (2002), é mostrado que a potência média por unidade de comprimento de crista, \bar{J} , em estados de mar irregulares, é dada por:

$$\bar{J} = \rho_w g \int_0^\infty C_g(f) S_\eta(f) df \quad (3.14)$$

3.2. CONVERSORES DE ENERGIA

Da interação entre uma onda sinusoidal e um corpo rígido flutuante resultam forças hidrodinâmicas e movimentos que podem ser representados num sistema de coordenadas cartesianas (Figura 3.2).

Um corpo flutuante possui 6 graus de liberdade de movimento: 3 de translação e 3 de rotação. Pressupondo que o eixo OZ é vertical, o eixo OX toma a direção da maior dimensão do corpo, ou, no caso de um corpo axissimétrico, a direção de propagação da agitação, e o eixo OY é perpendicular ao plano formado por aqueles dois. Os movimentos de translação designam-se de *heave*, *surge* e *sway*, quando se dão respetivamente na direção dos eixos OZ , OX e OY . Os movimentos de rotação ocorrem em torno de cada um desses eixos: *yaw* em torno de OZ , *roll* em torno de OX e *pitch* em torno de OY .

No centroide do volume submerso do corpo aplicam-se todas as forças hidrostáticas atuantes. Este centroide é o centro de impulsão.

No trabalho que aqui é apresentado, far-se-á o estudo de um corpo flutuante axissimétrico com um único grau de liberdade de movimento em *heave*. Assim, o funcionamento do conversor não dependerá da direção da agitação incidente. Neste estudo também não serão tidas em consideração as forças de amarração, a que um conversor de energia das ondas na realidade está sujeito.

O movimento de um corpo rígido flutuante, com movimento apenas possível em *heave*, e sujeito a agitação regular, é descrito pela equação

$$(m + a) \ddot{\xi}(t) + b \dot{\xi}(t) + c \xi(t) = F_w \quad (3.15)$$

onde m é o valor escalar da massa, a é o valor escalar da massa adicionada, b é o valor escalar do coeficiente de amortecimento por radiação, c é o valor escalar do coeficiente de rigidez hidrostática, F_w é a força de excitação produzida pela agitação, e ξ , $\dot{\xi}$ e $\ddot{\xi}$ são, respetivamente, os valores escalares do deslocamento, da velocidade e da aceleração.

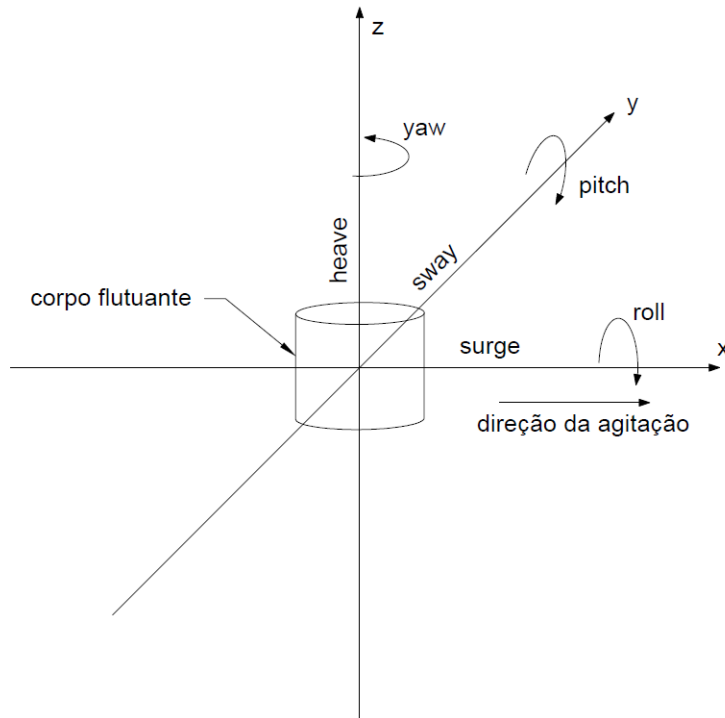


Figura 3.2 – Movimentos possíveis de um corpo flutuante

A massa adicionada de um corpo, a , é o coeficiente que quantifica uma força proporcional à aceleração do corpo, mas em sentido contrário a esta.

O amortecimento por radiação resulta da transmissão de energia entre o corpo e a água. Em caso de movimento do corpo flutuante, parte da energia que o faz mover é transmitida à água sob a forma de agitação. Por outro lado, quando a agitação incide no corpo flutuante, parte da energia presente na agitação é transmitida ao corpo flutuante. A quantidade de energia que é transmitida nos dois casos é quantificada pelo coeficiente de amortecimento por radiação, b .

A rigidez hidrostática é um parâmetro indicador da estabilidade do corpo flutuante. Nos corpos flutuantes com apenas liberdade de movimento em *heave*, o coeficiente de rigidez hidrostática é dado por:

$$c = \rho g S_0 \quad (3.16)$$

onde S_0 é a secção transversal do corpo ao nível da superfície do mar. O valor da força de excitação, provocada pela agitação, é dado por:

$$F_w(t) = \text{Re}(\chi \eta(t)) \quad (3.17)$$

em que χ é o coeficiente de força da onda e representa a amplitude complexa da força devida a uma onda incidente de amplitude unitária.

Os efeitos dinâmicos do fluido no corpo rígido devido ao movimento oscilatório são representados pelos coeficientes a , b e χ . Estes dependem da configuração geométrica do corpo e da sua frequência de

oscilação. Independentes da frequência são os valores escalares de c e m , cuja dependência é apenas da geometria e da distribuição da massa, respetivamente, num corpo flutuante com movimento em *heave*.

Normalmente, os coeficientes presentes na equação (3.15), só são passíveis de determinação através de métodos numéricos ou de métodos experimentais. Apenas para formas geométricas muito simples é possível determinar analiticamente esses coeficientes.

Segundo Paredes (2017), o corpo terá um movimento sinusoidal com a mesma frequência que a elevação da superfície livre, pelo que:

$$\xi(t) = \hat{\xi} \cos(\omega t + \phi) \quad (3.18)$$

$$\dot{\xi}(t) = -\omega \hat{\xi} \sin(\omega t + \phi) = -u \sin(\omega t + \phi) \quad (3.19)$$

$$\ddot{\xi}(t) = -\omega^2 \hat{\xi} \cos(\omega t + \phi) \quad (3.20)$$

em que $\hat{\xi}$ é o escalar da amplitude de deslocamento, u é o escalar da amplitude da velocidade e ϕ é o ângulo de fase do deslocamento do corpo.

3.2.1. RESPOSTAS ÀS FORÇAS EXTERIORES

Com o conhecimento dos coeficientes hidrodinâmicos de um corpo flutuante torna-se possível, com o auxílio de funções de transferência, representar a amplitude dos movimentos de resposta do corpo para uma de força de excitação de grandeza unitária, em várias frequências. As curvas de resposta são conhecidas como funções de transferência.

No estudo aqui apresentado, lida-se com um corpo flutuante apenas com movimento em *heave*, pelo que a sua função de transferência do deslocamento, H_{ξ} , é dada por:

$$H_{\xi}(f) = \left| \frac{1}{-(2\pi f)^2 m + j 2\pi f (b + b_{pto}) + c} \right| \quad (3.21)$$

em que b_{pto} é o coeficiente de amortecimento linear induzido pelo mecanismo de conversão de energia e $j = \sqrt{-1}$ é a unidade imaginária.

Segundo Chakrabarti (1994), o espectro do deslocamento de um corpo flutuante num dado estado de mar, S_{ξ} , pode ser determinado multiplicando o quadrado da função de transferência do deslocamento pela densidade espectral da agitação, S_{η} :

$$S_{\xi}(f) = H_{\xi}^2(f) S_{\eta}(f) \quad (3.22)$$

3.3. A CONVERSÃO DE ENERGIA

Na conversão de energia das ondas existem mecanismos ligados ao corpo flutuante que são responsáveis pela conversão da energia presente na agitação numa forma de energia útil. Estes mecanismos designam-se por sistemas de *Power Take-Off* (PTO).

Quando o corpo se move transferirá energia à sua envolvente. Assim, parte da energia dissipada no movimento do corpo será transferida para o mecanismo acoplado (PTO) que funcionará assim como um amortecedor.

O corpo provoca no PTO uma força, f_{pto} , capaz de gerar uma potência, P_{pto} , dada por:

$$P_{pto} = f_{pto} \dot{\xi}(t) \quad (3.23)$$

Neste trabalho, assume-se um funcionamento linear do PTO, pelo que a força induzida pelo mesmo é diretamente proporcional à velocidade de movimento do corpo:

$$f_{pto} = b_{pto} \dot{\xi}(t) \quad (3.24)$$

sendo b_{pto} o coeficiente de amortecimento do PTO. Assim:

$$P_{pto} = b_{pto} \dot{\xi}(t)^2 \quad (3.25)$$

Contudo, não é obrigatório que a força transmitida ao sistema PTO seja sempre linear. Para uma maximização da energia extraída, é necessário recorrer a mecanismos de funcionamento não-linear e a métodos de controlo complexos. Caso as forças não sejam lineares, a equação (3.14) deixa de ser válida. Este assunto é tratado com maior detalhe em Falnes (2002), e não será aqui abordado.

Um conversor de energia com movimentos sinusoidais, com um PTO linear, extrai uma potência média dada por:

$$\bar{P}_{pto} = \frac{b_{pto} u^2}{2} = \frac{b_{pto} (\omega \hat{\xi})^2}{2} \quad (3.26)$$

Um corpo oscilante tem uma frequência de vibração natural. Quando este é sujeito a uma força exterior com uma frequência próxima ou igual à sua frequência natural, dá-se um fenómeno denominado de ressonância. Pecher and Kofoed (2017) explicam que a frequência própria de ressonância depende da inércia e da rigidez do corpo. Haverá diferentes frequências de ressonância para os diferentes movimentos possíveis do corpo.

Falnes (2007) nota ainda que, na agitação regular, a extração de energia será ótima quando o conversor funcionar em ressonância. A situação de ressonância só é possível quando o coeficiente de amortecimento ótimo do PTO, $b_{pto-opt}$, é igual ao coeficiente de amortecimento de radiação associado à frequência de ressonância:

$$b_{pto-opt} = b_{res} \quad (3.27)$$

em que b_{res} é o valor do amortecimento por radiação na frequência de ressonância.

Na agitação irregular, a potência média extraída irá depender do espetro da agitação incidente. Assim, segundo Saulnier et al. (2009), \bar{P}_{pto} será:

$$\bar{P}_{pto} = \int_0^{\infty} b_{pto} H_u^2(f) S_{\eta}(f) df \quad (3.28)$$

onde H_u representa a função de transferência da velocidade do WEC. Para um conversor com um único grau de liberdade, Falnes (2002) indica que a função H_u é:

$$H_u(f) = \left| \frac{\chi(f)}{b + b_{pto} + j \left(2\pi f m - \frac{c}{2\pi f} \right)} \right| \quad (3.29)$$

Devido à imprevisibilidade da agitação, não existe nenhuma solução universal ótima para as forças aplicadas no corpo flutuante pelo PTO. Falnes (2002) diz que o ponto ótimo do amortecimento de PTO do conversor é a situação em que se aplica um amortecimento igual ao amortecimento de radiação na frequência de ressonância, quando o corpo se move na frequência de ressonância. No entanto, no caso da agitação irregular, o amortecimento ótimo do PTO será muito superior ao seu amortecimento em agitação regular.

Um parâmetro que permite avaliar o desempenho dos WECs é a largura de captura, \mathcal{L} . Segundo Cruz (2008), para uma dada frequência, a largura de captura é definida como sendo a razão entre a potência média extraída e a potência por unidade de comprimento de crista das ondas incidentes, i.e:

$$\mathcal{L} = \frac{\bar{P}_{pto}}{J} \quad (3.30)$$

Também se pode interpretar a largura de captura como sendo o comprimento de crista ou a largura da onda com a mesma potência média que aquela que o dispositivo é capaz de extrair.

Os absorvedores pontuais são dispositivos de dimensões significativamente menores do que o comprimento de crista da onda incidente. Esta característica é bastante apelativa do ponto de vista da modelação, uma vez que o campo de ondas difratadas pode ser negligenciado e as únicas forças atuantes no dispositivo são as da agitação incidente. Os absorvedores pontuais são capazes de extrair energia de uma onda incidente que tenha um comprimento de crista muito superior à dimensão do próprio dispositivo, ou seja, a largura de captura é potencialmente elevada. A este fenómeno dá-se o nome de efeito do ponto absorvedor (Cruz, 2008 e Paredes, 2017).

Como estes conversores são muito pequenos quando comparados com a dimensão das ondas incidentes, tornam-se insensíveis à direção de origem da agitação. Assim, o estudo e o projeto dos conversores são simplificados uma vez que é possível analisar com precisão o seu comportamento para uma agitação proveniente de uma qualquer direção desde que a onda tenha um comprimento de crista maior do que a dimensão característica do WEC e a direção de propagação seja única.

Segundo Falnes (2007), teoricamente o máximo valor de largura de captura para um absorvedor pontual axissimétrico, com apenas com movimento apenas possível em *heave*, e em agitação regular, é dado por:

$$\mathcal{L}_{max} = \frac{L}{2\pi} \quad (3.31)$$

Finalmente, a largura de captura relativa, \mathcal{L}_r , é um parâmetro calculado tendo em consideração uma dimensão característica do WEC, e é dada por

$$\mathcal{L}_r = \frac{\mathcal{L}_r}{w} = \frac{\bar{P}_{pto}}{w \bar{J}} \quad (3.32)$$

em que w é a dimensão característica do dispositivo. Esta dimensão é, geralmente, a largura do conversor na direção perpendicular à direção de propagação da agitação incidente.

Caso a largura de captura relativa seja conhecida, é possível fazer uma estimativa da potência média extraída por um WEC:

$$\bar{P}_{pto} = \mathcal{L}_r w \bar{J} \quad (3.33)$$

4

MODELO NUMÉRICO: SNL-SWAN

4.1. INTRODUÇÃO

O SNL-SWAN é uma extensão do modelo numérico de simulação espectral da agitação marítima SWAN, tendo sido desenvolvido com vista à realização de estudos do potencial energético de parques de extração da energia das ondas e do efeito do mesmo sobre as características locais da agitação marítima. A extensão é baseada na definição dos WECs como obstáculos à propagação da agitação, sendo a capacidade de extração da energia da onda de um WEC parametrizada em função das características do estado do mar, ou eventualmente em função da altura e de onda e do período de cada componente espectral

O desenvolvimento do SNL-SWAN baseia-se no trabalho de Ruehl et al. (2013). Para além das condições de agitação a sotamar dos WECs, o SNL-SWAN fornece ainda uma estimativa da energia extraída por cada WEC.

4.2. SWAN

O SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*) é um modelo numérico espectral de previsão da agitação desenvolvido pela Delft University of Technology. Trata-se de um modelo de código aberto, concebido para simular, especificamente, condições de agitação próxima da costa, mas que de facto permite a simulação dessas condições desde a escala oceânica à escala laboratorial (Booij et al., 1999). Este modelo é hoje usado de forma operacional por entidades como, por exemplo, o Office Naval Research, dos Estados Unidos da América, o Ministério das Infraestruturas e Ambiente, dos Países Baixos, e, em Portugal, o Instituto Hidrográfico.

O SWAN revela-se extramente importante pela sua capacidade de descrever o espectro da agitação como o somatório de um número de ondas, de diferentes frequências, numa determinada área. O espectro propaga-se livremente, sem quaisquer imposições quanto à sua forma, e é, por isso, considerado um modelo numérico de 3ª geração. O SWAN é um modelo de geração-propagação-transformação-dissipação do espectro da agitação. O SWAN modela o fenómeno de geração das ondas por transferência de energia do vento, enquanto a propagação-transformação inclui os efeitos da refração por interação com o fundo do mar e com as correntes, difração, empolamento, reflexão e transmissão através de obstáculos. A dissipação da energia da agitação é incluída através dos mecanismos de *white capping*

(Komen et al., 1984), atrito de fundo (Hasselmann et al., 1973) e rebentação por diminuição de profundidade (Battjes and Janssen, 1978). A interação onda-onda é modelada através do mecanismo de quadrupletos (Hasselmann et al., 1985), em águas profundas, e de tríades (Eldeberky, 1996), em águas pouco profundas.

Por incluir a interação onda-corrente, o SWAN é baseado na equação de conservação da ação da onda, dado que esta grandeza se conserva na presença de correntes, o que não acontece com a energia (Holthuijsen, 2007). A densidade espectral da ação da onda é definida como

$$N(\sigma, \theta) = \frac{S_{\eta}(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (4.1)$$

sendo $S_{\eta}(\sigma, \theta)$ a densidade espectral de energia, σ a frequência relativa, e θ a direção de propagação da agitação.

Para simulações de pequena escala a formulação da equação de conservação da ação da onda em coordenadas cartesianas é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_{\sigma} N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_{\theta} N = \frac{S}{\sigma} \quad (4.2)$$

O primeiro termo da equação (4.2), é representa a variação de N no tempo; o segundo e terceiro termos representam, respetivamente, a propagação de N nas direções OX e OY (espaço geográfico) com as componentes de velocidade c_x e c_y ; o quarto termo da equação representa o efeito da variação da frequência relativa da onda devida às variações da profundidade e à presença de correntes, sendo c_{σ} a velocidade de propagação no espaço de frequência σ ; e o último quinto termo contabiliza a variação da ação da onda por efeito da refração, sendo c_{θ} a velocidade de propagação no espaço de direções θ . O termo do lado direito da equação, $S(\sigma, \theta)$, contabiliza a energia gerada e dissipada pelos fenómenos físicos anteriormente enumerados que geram, dissipam ou redistribuem a energia da onda.

O modelo necessita em qualquer caso de informação batimétrica, condições iniciais, e condições de fronteira, e eventualmente de condições de forçamento atmosférico (campos de pressão e de vento) e de forçamento oceânico (campos de correntes). Para aumentar a precisão das previsões nas zonas de interesse, o SWAN recorre a um esquema de encaixe de malhas (*nesting*), em que os resultados obtidos para um domínio computacional de grandes dimensões são utilizados como condição fronteira para um domínio de dimensão mais reduzida, mas de maior resolução (Figura 4.1).

O SWAN tem capacidade para simular o efeito da existência de obstáculos na propagação e transformação da agitação. Os obstáculos naturais, como a linha de costa ou ilhas, por exemplo, estarão definidos nos dados da batimetria, havendo reflexão total da energia que sobre eles incida. Os obstáculos que não são naturais, como os quebramares ou outras estruturas de proteção marítima, são introduzidos como linhas poligonais e definidos pelas coordenadas dos seus vértices. A estes obstáculos não naturais são associados coeficientes de reflexão e de transmissão da energia incidente.

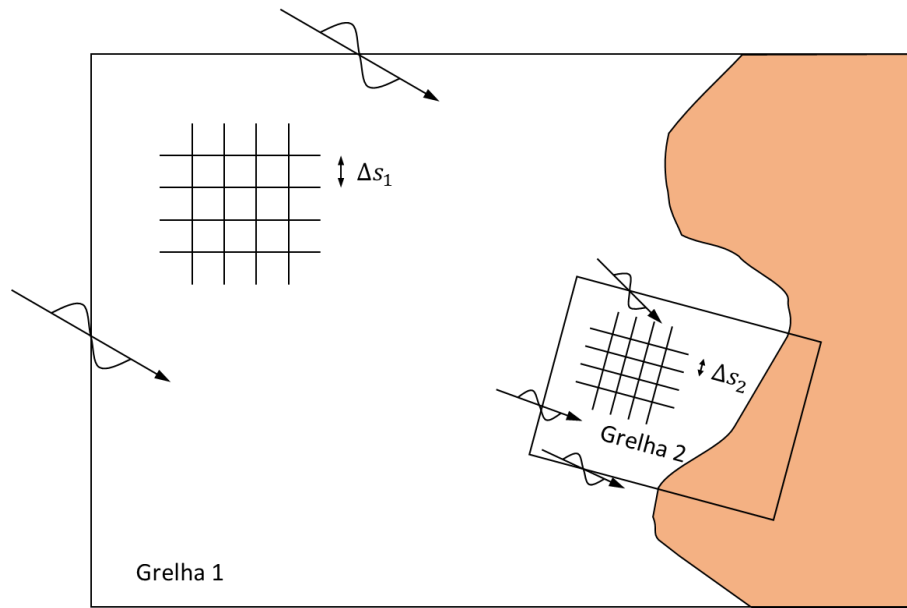


Figura 4.1 – Aninhamento de grelhas

A reflexão de energia é uma reflexão especular (o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão), afetando, portanto, o espectro energético direcional da agitação na região a sotamar do obstáculo. A transmissão de energia pelo obstáculo, pelo contrário, apenas altera a escala da energia, não tendo qualquer efeito nas componentes direcionais do espectro. A diferença entre a energia incidente e o somatório da energia transmitida e refletida, é a energia absorvida pelo obstáculo.

À razão entre a altura da onda refletida pelo obstáculo e a altura da onda incidente dá-se o nome de coeficiente de reflexão, K_r , enquanto à razão entre a altura da onda a sotamar do obstáculo e a altura de onda incidente no obstáculo dá-se o nome de coeficiente de transmissão, K_t , sendo que $K_r^2 + K_t^2 \leq 1$, pelo que $K_a^2 = 1 - (K_r^2 + K_t^2)$ representa a fração de energia absorvida ou dissipada pelo obstáculo.

4.3. SNL-SWAN

4.3.1 COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO

Quando se pretende simular o efeito de um WEC sobre a propagação da agitação marítima, este deve ser introduzido como se de um obstáculo se tratasse. Neste caso, o coeficiente de reflexão deverá ser considerado como nulo, i.e. $K_r = 0$, enquanto o coeficiente de transmissão deverá ser uma função do estado do mar local, da frequência espectral e da direção de propagação, i.e.

$$K_t = K_t(H_s, T_p, f, \theta) \quad (4.3)$$

No caso de um WEC com simetria axial, a direção de propagação será indiferente, pelo que se terá que

$$K_t = K_t(H_s, T_p, f) \quad (4.4)$$

No modelo SWAN original, os coeficientes de transmissão são atribuídos aos obstáculos, são constantes para todas as frequências do espetro, e não dependem do estado de mar local, resultante do estado do mar ao largo que se pretenda simular. Esta limitação é ultrapassada no SNL-SWAN (*Sandia National Labs – SWAN*), onde o coeficiente de transmissão é calculado com base nas características de absorção de energia dos WECs fornecidas pelo utilizador (Ruehl et al., 2015). Neste estudo, utilizou-se a versão v1.1 do SNL-SWAN que calcula os coeficientes de transmissão, K_t , como

$$K_t^2 = 1 - \frac{P_a}{P_i} = 1 - \mathcal{L}_r \quad (4.5)$$

onde P_a é a potência absorvida, P_i é a potência presente na agitação incidente a barlamar do WEC, e \mathcal{L}_r é a largura de captura relativa do WEC.

O SNL-SWAN permite que a introdução da informação sobre as características de absorção de energia dos WECs seja feita de 5 maneiras diferentes:

- Opção 0, em que um coeficiente de transmissão, K_t , constante é fornecido ao modelo. Trata-se do modo de funcionamento original do SWAN;
- Opção 1, em que o utilizador fornece ao modelo uma dimensão característica do WEC, w , e a matriz de potência do WEC, como uma função das características do estado do mar, i.e. $P_a = P_a(H_s, T_p)$. Neste caso, a largura de captura relativa do WEC é calculada localmente pelo modelo para cada ponto e para valores locais da altura de onda significativa, H_s^* , e do período de pico, T_p^* , como

$$\mathcal{L}_r^* = \frac{P_a^*(H_s^*, T_p^*)}{w \bar{J}(H_s^*, T_p^*)} \quad (4.6)$$

em que $P_a^*(H_s^*, T_p^*)$ é o valor da potência absorvida interpolando linearmente sobre a matriz de potência fornecida pelo utilizador e $\bar{J}(H_s^*, T_p^*)$ é o valor da potência média por unidade de comprimento da crista da onda incidente calculado pelo SWAN para as condições espectrais locais. Desta forma ter-se-á que localmente

$$K_t = K_t(H_s^*, T_p^*) \quad (4.7)$$

- Opção 2, em que o utilizador fornece ao modelo uma tabela com a largura relativa de captura do WEC em função do período de pico do estado mar, i.e. $\mathcal{L}_r = \mathcal{L}_r(T_p)$. Neste caso, a largura de captura relativa do WEC é calculada pelo modelo para cada ponto, por interpolação linear para o valor local do período de pico, T_p^* . Desta forma ter-se-á que localmente

$$K_t = K_t(T_p^*) \quad (4.8)$$

- Opção 3, em que o utilizador fornece ao modelo uma dimensão característica do WEC, w , e a matriz de potência do WEC, como uma função altura de onda H_i e do período T_i associados a cada componente espectral, $P_a = P_a(H_i, T_i)$. Neste caso, a largura de captura relativa do WEC é calculada localmente pelo modelo para cada ponto e para cada componente espectral como

$$\mathcal{L}_r^* = \frac{P_a^*(H_i^*, T_i^*)}{w \bar{J}(H_i^*, T_i^*)} \quad (4.9)$$

em que $P_a^*(H_i^*, T_i^*)$ é o valor da potência absorvida interpolando linearmente sobre a matriz de potência fornecida pelo utilizador e $\bar{J}(H_i^*, T_i^*)$ é o valor da potência média por unidade de

comprimento da crista da onda incidente calculado localmente pelo SWAN para cada componente espectral. Desta forma ter-se-á que localmente

$$K_t = K_t(H_s^*, T_p^*, f_i) \quad (4.10)$$

- Opção 4, em que o utilizador fornece ao modelo uma tabela com a largura relativa de captura do WEC em função do período associado a cada componente espectral, i.e. $\mathcal{L}_r = \mathcal{L}_r(T_i)$. Neste caso, a largura de captura relativa do WEC é calculada pelo modelo para cada ponto, por interpolação linear para cada componente espectral. Desta forma ter-se-á que localmente

$$K_t = K_t(T_i^*) \quad (4.11)$$

Parece óbvio que as opções 1 e 3 serão as mais interessantes, por permitirem o cálculo local pelo SWAN do valor da potência média por unidade de comprimento da crista da onda incidente, \bar{J} . No entanto, ao escolher uma opção, deve ter-se em conta a forma como a matriz de potência ou a curva de largura de captura relativa foi obtida. As opções 1 e 2 devem ser usadas quando a informação disponível foi obtida para agitação irregular caracterizada parametricamente. As opções 3 e 4 devem ser usadas quando a informação disponível foi obtida em ensaios com ondas regulares. Neste trabalho e por condicionamentos de tempo, foram apenas testadas as opções 1 e 2. Verificou-se que para vários casos ensaiados, incluindo os casos de teste que acompanham a versão de distribuição do SNL-SWAN, a opção 1 resultou sempre em coeficientes de transmissão unitários, pelo que a sua utilização foi abandonada.

4.3.2. REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DOS OBSTÁCULOS

No SWAN, os obstáculos são definidos pelos seus vértices e são tratados como linhas que atravessam a grelha computacional. Antes de calcular o fluxo da densidade de ação da onda de um ponto da grelha para os pontos mais próximos, o modelo verifica se existe alguma linha do obstáculo a intercepar a linha da grelha que une dois nós da mesma. Se essa interceção se verificar, é aplicado o coeficiente de transmissão ao fluxo entre os nós. Sendo o esquema de discretização do SWAN baseado em volumes finitos centrados nos nós da grelha, o tratamento dos obstáculos pode afetar de forma relevante o valor da potência absorvida pelo WEC, por alterar a sua forma e dimensão. Na Figura 4.1, observa-se a disposição de quatro diferentes obstáculos numa grelha computacional do SWAN.

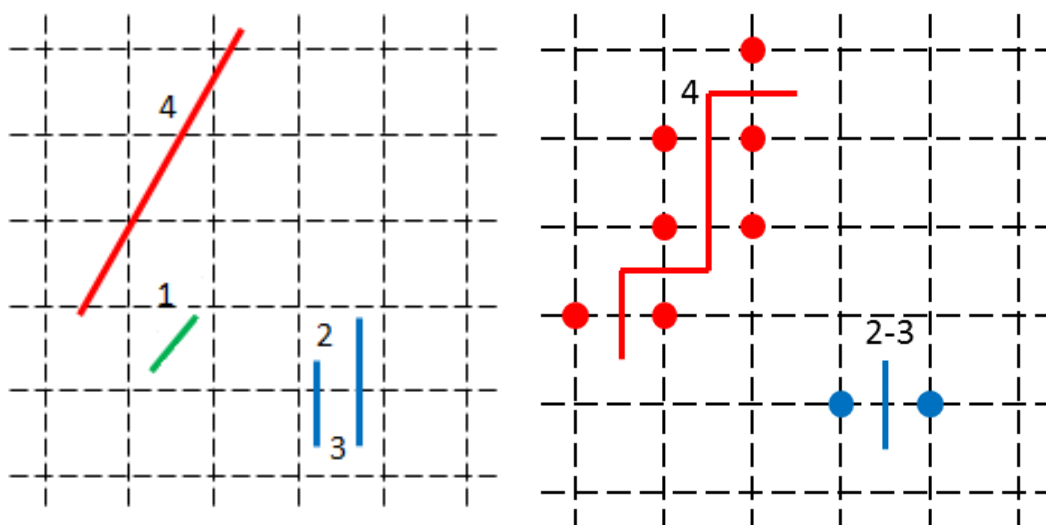


Figura 4.2 - Obstáculos definidos pelo utilizador (esquerda). Interpretação dos obstáculos pelo SWAN e nós afectados (direita)

O obstáculo 1 (verde) não irá influenciar a agitação simulada, uma vez que não interceta nenhuma linha da grelha computacional. Apesar de serem aproximadamente do mesmo tamanho, o obstáculo 2 irá ter uma influência maior do que o obstáculo 1 na simulação.

Os obstáculos 2 e 3 (azuis) têm notoriamente dimensões diferentes, mas irão ter a mesma influência na simulação realizada. Isto deve-se ao facto de ambos intercetarem a mesma linha computacional e, por conseguinte, a mesma face-fronteira inter-volumes finitos é afetada.

O obstáculo 4 (vermelho) é a demonstração de uma implementação com grande influência na propagação da agitação, onde o comprimento do obstáculo é muito superior à resolução da grelha. Isto significa que o obstáculo 4 irá intercetar várias linhas da grelha, influenciar os fluxos da densidade de ação da onda de movimento entre vários volumes finitos.

5

METODOLOGIA E CASO DE ESTUDO

5.1. INTRODUÇÃO

Este estudo consiste na avaliação dos efeitos da extração de energia das ondas na propagação da agitação ao largo da costa portuguesa. Neste capítulo, em primeiro lugar, descreve-se a zona da Aguçadoura, na Póvoa do Varzim, que foi o local escolhido devido ao seu potencial energético. Em segundo lugar, é descrita a origem e o critério dos dados utilizados nas simulações no modelo numérico. Depois, caracteriza-se o dispositivo usado e as suas especificações. De seguida, justifica-se a disposição dos conversores no parque de ondas e, por último, descreve-se algumas das limitações encontradas aquando da introdução de dados no modelo numérico.

5.2. AGUÇADOURA

5.2.1. BATIMETRIA

O local em estudo situa-se na costa oeste portuguesa, ao largo da Aguçadoura, na Póvoa do Varzim (ver Figura 5.1). com centro no ponto de coordenadas $41,44^\circ$ N, $8,85^\circ$ W (Portal-Energia, 2008). A informação batimétrica, com uma resolução de $30''$ de arco, foi retirada do *website* da GEBCO (2014) e interpolada para grelhas em coordenadas cartesianas, no formato PT-TM06/ETRS89 – *European Terrestrial Reference System 1989*.



Figura 5.1 – Local de estudo, Aguçadoura

5.2.2. DADOS DA AGITAÇÃO

De modo a que a análise dos efeitos do parque de conversores de energia das ondas seja o mais abrangente possível, optou-se por realizar simulações para diferentes estados de mar. Para a zona em questão, não havia registos disponíveis das condições de agitação. Numa primeira fase, foi equacionada a hipótese de adotar a tabela das probabilidades de ocorrência dos estados de mar para a Figueira da Foz de Costa et al. (2001); no entanto, os dados aí registados podem ter já algum efeito devido à refração da agitação. Para além disso, a boia da Figueira da Foz encontra-se desativada há vários anos, pelo que a informação poderá não estar atualizada. Optou-se então por considerar os dados da boia de cabo Silleiro, em Espanha, localizada no ponto de coordenadas $42,12^{\circ}$ N, $9,43^{\circ}$ W e 600 m de profundidade, para definição das condições de agitação. Os registos da Figueira da Foz presentes nos estudos de Costa et al. (2001) e Cerveira et al. (2013) foram utilizados para efeitos de dimensionamento dos conversores de energia.

O cabo Silleiro foi escolhido por ter um clima de ondas semelhante ao da Aguçadoura e por ter disponíveis dados reais da agitação, num local com uma profundidade suficientemente elevada de forma a que os efeitos da variação de fundo não influenciem significativamente a agitação. A Tabela 5.1 apresenta os dados da probabilidade de ocorrência de estados de mar no cabo Silleiro (Ministerio-de-Fomento, 2017).

Tabela 5.1 – Probabilidade de ocorrência (%) de estados de mar no cabo Silleiro, entre 1998 e 2016

		T_P [s]								
		4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	20,0
H_s [m]	$\leq 1,0$	0,124	0,588	2,874	3,194	0,657	0,140	0,025	0,002	0
	2,0	0,111	4,639	8,095	17,597	7,589	1,642	0,444	0,053	0,004
	3,0	0	1,267	3,227	9,543	10,431	3,044	0,630	0,059	0,005
	4,0	0	0,025	0,753	2,695	5,974	3,095	0,587	0,023	0,003
	5,0	0	0	0,177	0,864	2,170	2,378	0,685	0,013	0,009
	6,0	0	0	0,015	0,198	0,665	1,132	0,601	0,017	0,008
	7,0	0	0	0,001	0,038	0,164	0,459	0,418	0,026	0,006
	8,0	0	0	0	0,009	0,038	0,152	0,263	0,020	0
	9,0	0	0	0	0,002	0,014	0,047	0,129	0,023	0,001
	10,0	0	0	0	0	0,001	0,012	0,052	0,014	0
	$> 10,0$	0	0	0	0	0	0,001	0,017	0,014	0

Neste estudo assume-se que o espectro JONSWAP é um modelo preciso dos estados de mar apresentados na Tabela 5.1.

Segundo Paredes (2017), para conversores de energia absorvedores pontuais e em águas profundas, cujos estados de mar sejam definidos pelo espectro JONSWAP (com $\gamma = 3,3$), a potência média por unidade de comprimento de crista de onda, dada pela equação (3.14), pode ser calculada analiticamente como:

$$\bar{J} = 1,162 \frac{\rho_w g^2 T_Z H_{m0}^2}{64\pi} \quad (5.1)$$

onde H_{m0} é a altura significativa de onda estimada através do espectro. Segundo Holthuijsen (2007):

$$H_{m0} \approx H_s \quad (5.2)$$

$$T_P = 1,287 T_Z \quad (5.3)$$

A potência média para cada estado de mar da Tabela 5.1 foi calculada recorrendo à equação (5.1). Dessa operação resultou a Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Potência média por unidade de comprimento de crista da onda (kW/m) na zona do cabo Silleiro entre 1998 e 2016

		T _P [s]								
		4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	20,0
H _s [m]	1,0	1,8	2,8	3,7	4,6	5,5	6,4	7,4	8,3	9,2
	2,0	7,4	11,0	14,7	18,4	22,1	25,8	29,5	33,1	36,8
	3,0	16,6	24,9	33,1	41,4	49,7	58,0	66,3	74,6	82,9
	4,0	29,5	44,2	58,9	73,6	88,4	103,1	117,8	132,6	147,3
	5,0	46,0	69,0	92,1	115,1	138,1	161,1	184,1	207,1	230,1
	6,0	66,3	99,4	132,6	165,7	198,8	232,0	265,1	298,3	331,4
	7,0	90,2	135,3	180,4	225,5	270,6	315,8	360,9	406,0	451,1
	8,0	117,8	176,7	235,7	294,6	353,5	412,4	471,3	530,2	589,2
	9,0	149,1	223,7	298,3	372,8	447,4	522,0	596,5	671,1	745,7
	10,0	184,1	276,2	368,2	460,3	552,3	644,4	736,4	828,5	920,6
	> 10,0	184,1	276,2	368,2	460,3	552,3	644,4	736,4	828,5	920,6

A energia média anual disponível em cada estado de mar é dada pelo produto da potência média por unidade de crista da onda na zona do cabo Silleiro, pelo número de horas médio anual (8766 h) e pela probabilidade de ocorrência do estado de mar (ver Tabela 5.3).

Tabela 5.3 – Energia média anual por unidade de comprimento de crista da onda (kWh/m) no cabo Silleiro entre 1996 e 2016

		T _P [s]								
		4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	20,0
H _s [m]	≤ 1,0	20,0	142,3	927,7	1288,7	318,1	79,1	16,1	1,5	0
	2,0	71,7	4492,2	10451,8	28400,2	14697,7	3710,1	1146,5	154,0	12,9
	3,0	0	2760,5	9374,6	34653,8	45454,1	15475,3	3660,4	385,6	36,3
	4,0	0	96,8	3888,9	17398,1	46279,6	27972,5	6063,2	267,3	38,7
	5,0	0	0	1428,3	8715,2	26266,6	33581,7	11055,4	236,0	181,6
	6,0	0	0	174,3	2876,0	11591,2	23019,7	13967,5	444,5	232,4
	7,0	0	0	15,8	751,3	3890,8	12704,6	13222,6	925,3	237,2
	8,0	0	0	0	232,4	1177,5	5495,1	10866,2	929,6	0
	9,0	0	0	0	65,4	549,1	2150,5	6745,6	1353,0	65,4
	10,0	0	0	0	0	48,4	677,8	3357,0	1016,8	0
	> 10,0	0	0	0	0	0	56,5	1097,5	1016,8	0

Com base na Tabela 5.3, foram seleccionados quatro dos cinco estados de mar mais energéticos (ver Tabela 5.4).

Tabela 5.4 – Estados de mar usados nas simulações

Caso	T_p [s]	H_s [m]
A	10,0	2,0
B	10,0	3,0
C	12,0	3,0
D	12,0	4,0

A análise da Tabela 5.3 mostra que o estado de mar com $H_s = 5,0$ m e $T_p = 14,0$ s possui maior energia média anual que $H_s = 2,0$ m e $T_p = 10,0$ s. No entanto, optou-se por simular o segundo caso para que o estudo pudesse conter os efeitos da variação da altura significativa para dois períodos de pico distintos.

Em Costa et al. (2001) verifica-se que as três principais direções de origem da agitação são: Norte (N), Noroeste (NW) e Oeste (W). Assim, para cada estado de mar selecionado realizaram-se simulações com agitação proveniente destas três direções principais. Para ser possível a análise por comparação dos efeitos do parque de conversores de energia das ondas, foram executadas duas simulações: uma sem a presença de WECs e outra com a presença de WECs.

5.3. CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS

5.3.1. CARACTERÍSTICAS DOS CONVERSORES

Para se proceder à análise dos efeitos da extração de energia das ondas na propagação da agitação na costa portuguesa recorreu-se à modelação numérica de um conversor de energia das ondas cilíndrico, que se move apenas em *heave* (Figura 5.2).

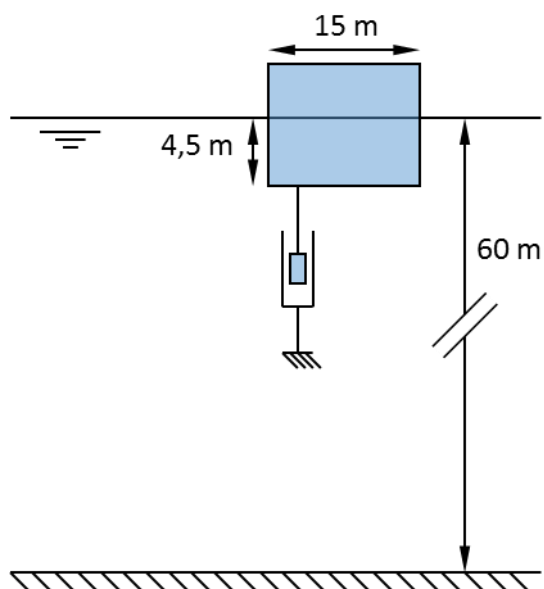


Figura 5.2 – Modelo de um conversor de energia

Nas simulações realizadas adotou-se uma profundidade de 60 m. Esta profundidade não é muito elevada, caso contrário dificultaria a amarração do conversor; mas, por outro lado, é ainda uma zona em que a dissipação de energia por atrito no fundo é desprezável, pelo que a agitação é ainda bastante energética. As características geométricas do WEC foram adaptadas de Paredes (2017).

Tabela 5.5 – Propriedades físicas do WEC estudado

Propriedade	Valor
Diâmetro [m]	15,00
Altura [m]	10,00
Calado [m]	4,50
Deslocamento [m ³]	795
Massa [kg]	815096
Secção transversal [m ²]	177

Para o cálculo do coeficiente de amortecimento linear ótimo do PTO recorreu-se à tabela de probabilidade de ocorrência de estados de mar apresentada em Cerveira et al. (2013). Tanto este estudo como o de Costa et al. (2001) apresentam uma tabela de ocorrência de estados de mar relativos à zona ao largo da Figueira da Foz com base nos registos da boia ondógrafo ali localizada e para o mesmo período do tempo (Julho de 1990 a Janeiro de 1996). Porém, o estudo de Cerveira apresenta os estados de mar com maior detalhe.

As características hidrodinâmicas foram obtidas através de três códigos de MATLAB disponibilizados por G. M. Paredes ¹. O primeiro código, aplica o método descrito em Johansson (1986) para o cálculo dos coeficientes de massa adicionada e de amortecimento por radiação, e a força de excitação. O segundo código calcula o coeficiente de amortecimento linear do PTO otimizado para o máximo aproveitamento da energia disponível no local em função dos estados de mar característicos e da respetiva probabilidade de ocorrência. O terceiro código calcula a matriz de potência e a curva da largura de captura relativa do WEC em função dos parâmetros característicos da agitação, H_S e T_P .

Com base nas características do WEC apresentadas na Tabela 5.5, calcularam-se os coeficientes de massa adicionada (ver Figura 5.3), os coeficientes de amortecimento por radiação (ver Figura 5.4) e a força de excitação (ver Figura 5.5), em função da frequência espectral, f .

¹ Comunicação privada.

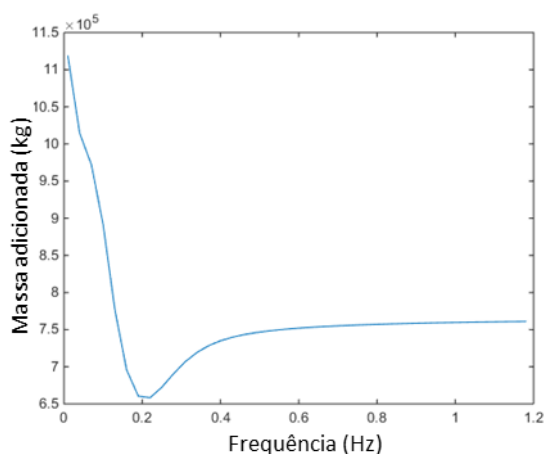


Figura 5.3 – Massa adicionada para um conversor com movimento em *heave*

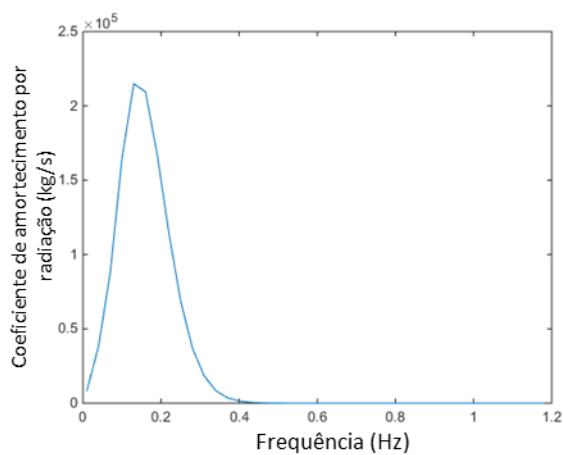


Figura 5.4 – Coeficiente de amortecimento por radiação para um conversor com movimento em *heave*

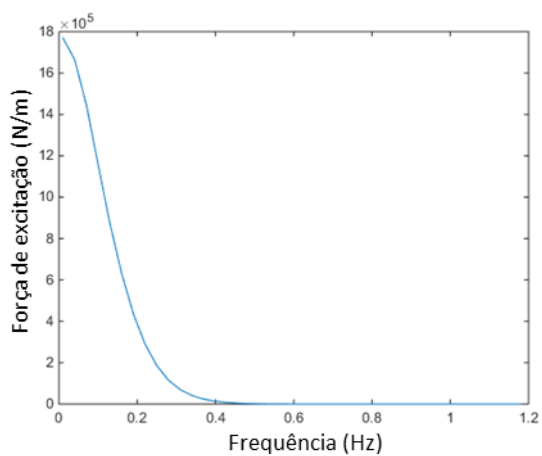


Figura 5.5 – Força de excitação para um conversor com movimento em *heave*

Para os estados do mar da Figueira da Foz (Cerveira et al., 2013), foi calculado o coeficiente de amortecimento linear do PTO, que maximiza a energia extraída anualmente por um WEC, admitindo que a agitação é caracterizada por um espectro JONSWAP, tendo-se obtido $b_{pto} = 1969018 \text{ kg/s}$.

Finalmente, foi calculada a curva de largura de captura relativa característica do WEC, em função do período de pico (ver Figura 5.6).

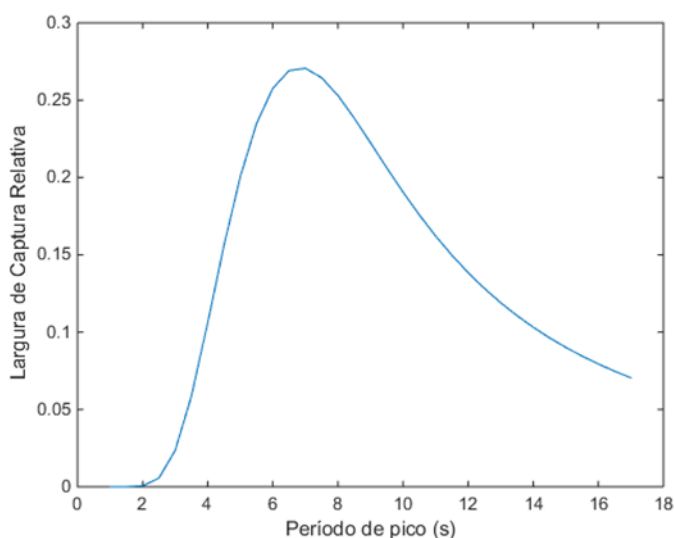


Figura 5.6 – Curva de Largura de Captura Relativa

5.3.2. DISPOSIÇÃO DOS CONVERSORES DE ENERGIA

A instalação de parques de ondas ao largo da costa afetará o ambiente envolvente a vários níveis: alterará padrões de propagação de agitação, padrões de circulação e processos do ecossistema local. Diferentes configurações do parque poderão, portanto, produzir diferentes impactos nesse ambiente.

Na realização deste trabalho, optou-se por um parque de conversores de energia das ondas simples, composto por 49 WECs, dispostos em três linhas paralelas e formando células hexagonais com os WECs separados 120 m (8 vezes o diâmetro) uns dos outros, como se pode observar na Figura 5.7.

O parque de conversores de energia está orientado perpendicularmente à direção Noroeste (NW) dado ser esta a direção predominante de origem da agitação, de acordo com os registos da boia ondógrafo da Figueira da Foz (Costa et al., 2001).

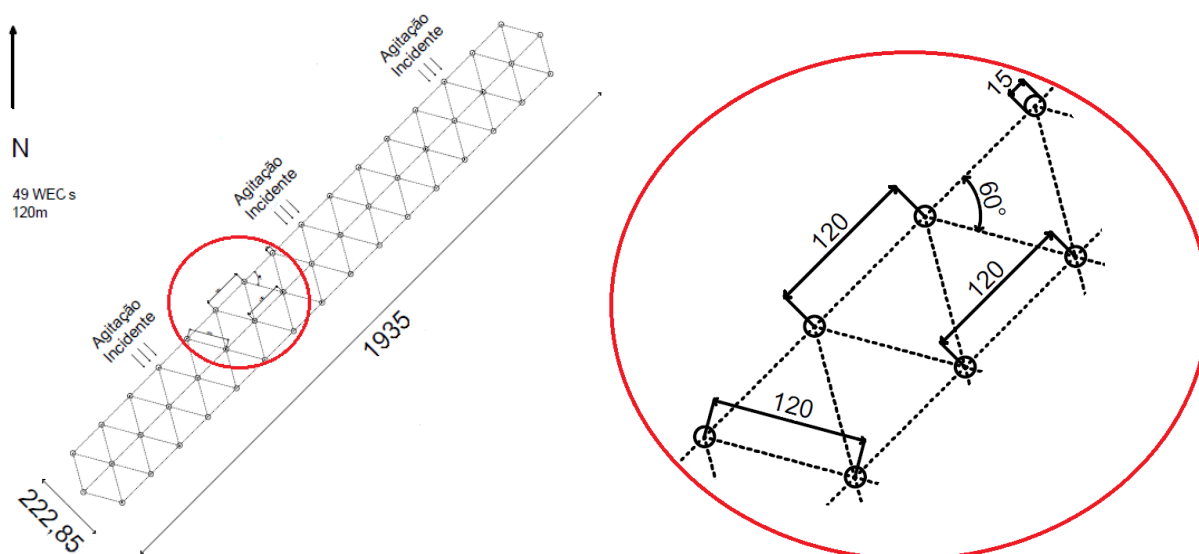


Figura 5.7 – Disposição do parque de conversores de energia. Distâncias em metros.

5.4. DADOS E SIMULAÇÃO

5.4.1. MODELO

Para a realização das simulações foram consideradas duas grelhas. Uma grelha exterior, com comprimento de 45 km na direção Oeste-Este e 38 km na direção Sul-Norte, com uma resolução de 100 m × 100 m; e uma grelha interior, com um comprimento de 15 km na direção Oeste-Este e 18 km na direção Sul-Norte, com uma resolução de 15 m × 15 m. Com a inclusão de uma grelha interior, num esquema de aninhamento de grelhas (*nesting*), procura-se melhorar a precisão dos resultados das simulações.

Na Figura 5.8 está representada a zona de estudo com coordenadas no sistema PT-TM06/ETRS89.

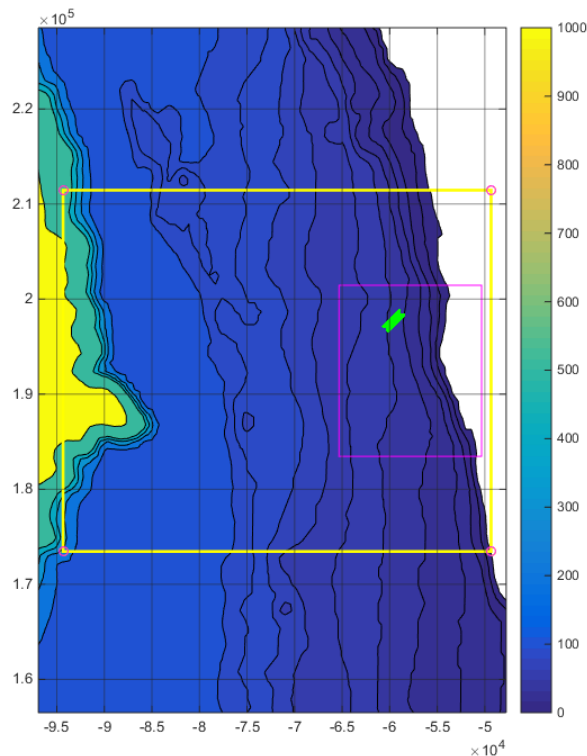


Figura 5.8 – Batimetria, grelhas utilizadas nas simulações e posicionamento dos WECs

Pode observar-se, na Figura 5.8, a grelha exterior (a amarelo), a grelha interior (a rosa), e os conversores de energia que constituem o parque de conversores de energia das ondas (a verde).

O modelo da grelha exterior foi executado no modo estacionário. As condições do espectro direcional de energia da agitação calculadas no modelo da grelha exterior foram aplicadas como condições de fronteira para o modelo da grelha interior, que foi também executado em modo estacionário.

5.4.2. SIMULAÇÃO

5.4.2.1. Grelha Exterior

A grelha computacional tem uma resolução de $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$. Os dados batimétricos usados para as simulações nesta grelha, foram interpolados de GEBCO (2014), com $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ de resolução. É considerado, em todas elas, o espectro JONSWAP, com $\gamma = 3.3$, e uma resolução direcional de 5° . Os fenómenos de reflexão e difração não foram tidos em consideração para simplificação das simulações, uma vez que não afetam de modo significativo os resultados.

Foram consideradas as interações triplas onda-onda (*triplets*) e, para a dissipação de energia da agitação, consideraram-se o atrito de fundo e a rebentação por diminuição da profundidade. Foi utilizado um valor de 0,067 para o coeficiente de atrito no fundo para uma zona de transição entre águas profundas e águas costeiras para um espectro JONSWAP (Silva (2009)). Foi, no entanto, desativada a computação de *quadruplets*.

As simulações na grelha exterior ocorreram com a opção 0 do SNL-SWAN, com coeficientes de transmissão unitários.

5.4.2.2. Grelha Interior

As simulações na grelha interior, com uma resolução de $15\text{ m} \times 15\text{ m}$, foram realizadas com a opção 2 do SNL-SWAN, tendo sido fornecida ao programa a curva de largura de captura relativa característica dos WECs. O SNL-SWAN interpola linearmente os valores de captura relativa em relação ao valor local do período de pico da agitação e calcula o coeficiente de transmissão, aplicando-o de forma constante a todas as frequências do espectro.

As condições de fronteira foram obtidas por aninhamento (*nesting*) a partir das simulações na grelha exterior. A batimetria considerada neste caso, foi interpolada de GEBCO (2014), com uma resolução de $20\text{ m} \times 20\text{ m}$.

Para otimizar a modelação do comportamento dos WECs pelo SNL-SWAN, a resolução da grelha computacional deverá ser igual ao diâmetro dos WECs, como no caso em estudo, ou um seu submúltiplo. Os WECs foram introduzidos no modelo como um obstáculo definido por uma linha poligonal em “L”, com a introdução das coordenadas dos vértices que os constituem.

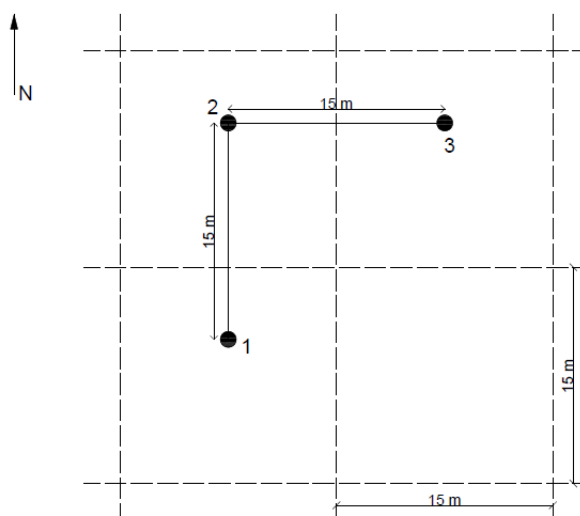


Figura 5.9 – Esquema de um WEC introduzido no modelo

Na Figura 5.9 está representado o desenho usado no modelo de simulação SNL-SWAN de um conversor. Os vértices que constituem o WEC estão numerados pela ordem de leitura do modelo e observa-se a disposição dos WECs em relação ao Norte geográfico. Desta forma procura-se reproduzir com a maior precisão possível a extração de energia da ondulação proveniente do quadrante N-NW-W.

O SNL-SWAN atribui um coeficiente de transmissão a cada obstáculo que intersepte o fluxo de energia entre dois pontos vizinhos da grelha. Se se introduzisse um conversor como uma linha poligonal fechada, ligando por exemplo os vértices 1 e 3 através de um segmento de reta, o modelo poderia eventualmente

aplicar duas vezes o coeficiente de transmissão para um só conversor, caso um terceiro segmento da grelha computacional fosse intersetado.

Desta forma, garantiu-se garante-se que o WEC interseta sempre e apenas duas linhas da grelha de diferentes direções. Isto é importante pois, tendo em consideração as direções de origem da agitação simuladas (Norte, Noroeste e Oeste), também se garante que o conversor tem uma dimensão de 15 m, dado esta coincidir com a resolução da grelha, para as agitações provenientes de Norte e Oeste. Para a agitação proveniente de Noroeste a sua dimensão será ligeiramente superior, esperando-se que isso não afete de forma relevante os resultados.

5.4.2.3. Problemas com o modelo numérico

As simulações dos estados de mar realizaram-se com recurso à opção 2 do SNL-SWAN, onde se forneceu ao modelo a curva de largura de captura relativa anteriormente calculada (ver Figura 5.6), para o cálculo dos coeficientes de transmissão. No entanto, inicialmente, pretendia-se usar o método de cálculo descrito na opção 1, isto é, o cálculo dos coeficientes de transmissão com recurso a uma matriz de potência. Essa matriz de potência foi calculada com base na equação (3.28).

O SNL-SWAN processou a leitura da matriz e realizou todas as simulações sem qualquer problema aparente. Porém, na visualização dos resultados, foi possível verificar que a influência do parque de conversores de energia na propagação da agitação era praticamente nula em qualquer caso. Além deste aspeto, verificou-se que os conversores extraíam exatamente a mesma energia da agitação qualquer que fosse a sua localização e dimensão, e que a quantidade de energia extraída era residual.

Executaram-se vários ensaios com o objetivo de alcançar resultados de confiança para este método de cálculo dos coeficientes de transmissão, porém sem sucesso. Deste modo, foi necessário alterar o método de determinação dos coeficientes de transmissão, pelo que se adotou o método descrito como opção 2 do SNL-SWAN.

6

RESULTADOS

Foram realizadas simulações para os quatro estados de mar da região do cabo Silleiro com maior interesse (ver Tabela 5.4): $H_S = 2$ m e $T_P = 10$ s; $H_S = 3$ m e $T_P = 10$ s; $H_S = 3$ m e $T_P = 12$ s; $H_S = 4$ m e $T_P = 12$ s. Foram ainda, para cada estado de mar, considerados três cenários: um com agitação com origem a Norte, outro com agitação com origem a Noroeste e um terceiro com origem a Oeste. O SNL-SWAN, numa simulação, realiza o cálculo dos coeficientes de transmissão, mas é capaz também de estimar a potência extraída pelos conversores de energia.

Tabela 6.1 – Potência extraída em cada simulação

	Condições de agitação	Direção de origem	Potência Extraída [kW]	
			Por WEC (média)	Total
Caso A	$H_S = 2,0$ m $T_P = 10$ s	N	12,3	605
		NW	33,4	1638
		W	50,0	2450
Caso B	$H_S = 3,0$ m $T_P = 10$ s	N	27,5	1345
		NW	73,9	3620
		W	110	5397
Caso C	$H_S = 3,0$ m $T_P = 12$ s	N	27,7	1357
		NW	69,6	3409
		W	101	4949
Caso D	$H_S = 4,0$ m $T_P = 12$ s	N	49,0	2399
		NW	123	6009
		W	178	8706

Na Tabela 6.1 mostram-se os resultados da potência extraída em cada simulação no SNL-SWAN. Observa-se que a potência extraída pelos WECs aumenta com o aumento da altura significativa da agitação incidente. Isto deve-se ao facto de a potência extraída ser dependente do quadrado da altura significativa. Por outro lado, o aumento do período de pico leva à diminuição da potência extraída. No entanto, esta variação não é muito relevante.

Tendo como base de comparação o caso de maior extração de potência (caso D), verifica-se uma diminuição de potência extraída de, em média: 73% para o caso A; 40% para o caso B; e 43% para o caso C.

Observa-se também que é para a agitação proveniente de Oeste (W) que se verificam as maiores quantidades de potência extraída, em cada uma das condições de agitação simuladas, enquanto as menores são para a agitação proveniente de Norte (N). Este facto poderá ser explicado pela eventual refração da agitação proveniente de Norte e Noroeste, reduzindo a energia disponível por unidade de comprimento da crista.

6.1. EFEITOS NA ALTURA SIGNIFICATIVA DA AGITAÇÃO

Para cada uma das direções de origem da agitação, foram realizadas duas simulações: uma com a presença dos WECs e outra sem a sua presença. As Figuras 6.1 a 6.12 representam a comparação dos dois casos, para cada condição da agitação, através de:

$$\Delta H_S = \frac{(H_{SW} - H_{S0})}{H_{S0}} \times 100 \quad (6.1)$$

onde ΔH_S é a variação relativa percentual da altura significativa da agitação, H_{SW} é a altura significativa da agitação com a presença de WECs na área da simulação e H_{S0} é a altura significativa da agitação sem a presença de WECs na área da simulação.

Em todas as figuras deste subcapítulo (6.1) apresenta-se a escala dos valores da variação da altura significativa da agitação até -14%. É importante referir que este valor em nenhum dos casos tem relevância, uma vez que se trata de valores muito pontuais (possivelmente em pontos próximos da costa)

6.1.1. CASO A – $H_S = 2 \text{ m}$ e $T_P = 10 \text{ s}$

As Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 representam a variação da altura significativa da agitação quando simuladas as condições de agitação $H_S = 2,0 \text{ m}$ e $T_P = 10 \text{ s}$ com origem a Norte, Noroeste e Oeste, respetivamente.

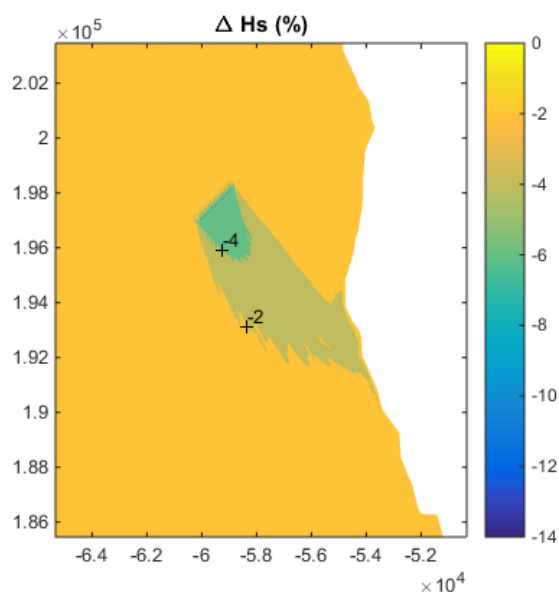


Figura 6.1 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=2$ m e $T_p=10$ s proveniente de N na altura significativa da agitação

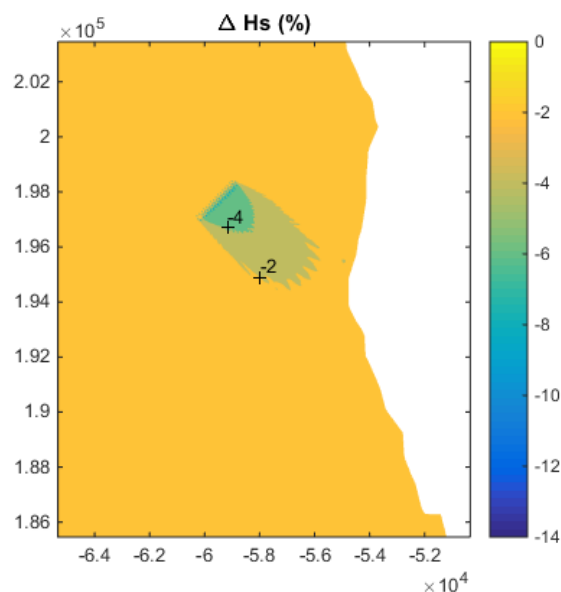


Figura 6.2 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=2$ m e $T_p=10$ s proveniente de NW na altura significativa da agitação

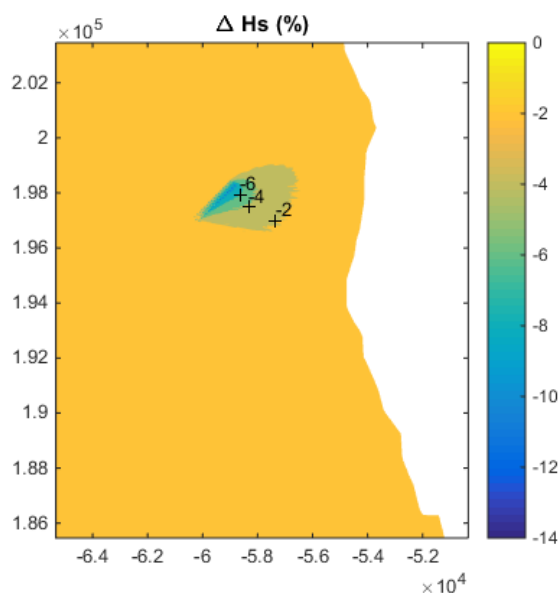


Figura 6.3 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=2$ m e $T_p=10$ s proveniente de W na altura significativa da agitação

Observando as figuras, verifica-se que a maior variação da altura da onda significativa ocorre para a agitação proveniente de W (cerca de 8%, a sotamar dos WECs), enquanto que para as direções de N e NW a variação é semelhante (próxima dos 4%).

Analisando a propagação dos efeitos do parque de conversores de energia das ondas na altura significativa da agitação, verifica-se que é para a agitação vinda de N que o parque tem maior impacto na linha de costa (diminuição de cerca de 2% na altura significativa da agitação). Nas restantes direções, os efeitos na altura da onda significativa não atingem a costa.

Tendo em consideração a Tabela 6.1, observa-se que a maior extração de potência para as condições de agitação do caso A, ocorre para a agitação proveniente de W que é aquela que também apresenta a maior diminuição da altura da onda significativa. Comparando este cenário com as restantes direções de origem da agitação, verifica-se que para as simulações com agitação de N e NW, há uma diminuição de cerca de 75% e 33%, respetivamente, na potência extraída.

6.1.2. CASO B – $H_S = 3 \text{ m}$ e $T_p = 10 \text{ s}$

Os gráficos das Figuras 6.4, 6.5 e 6.6 representam a variação da altura significativa da agitação quando simuladas as condições de agitação $H_S = 3,0 \text{ m}$ e $T_p = 10 \text{ s}$ com origem a Norte, Noroeste e Oeste, respetivamente.

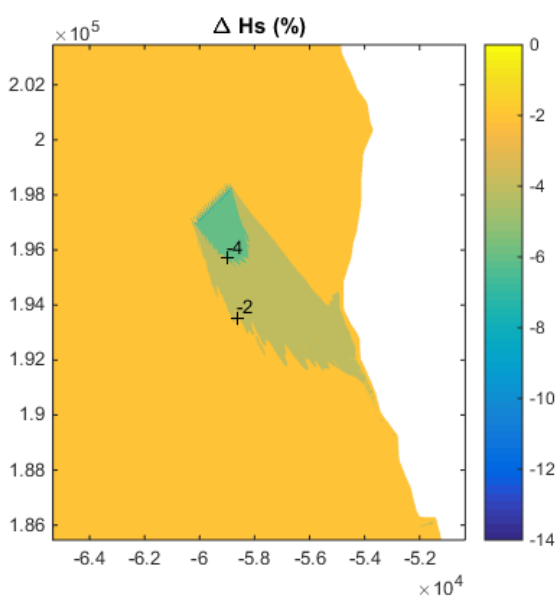


Figura 6.4 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_S=3 \text{ m}$ e $T_p=10 \text{ s}$ proveniente de N na altura significativa da agitação

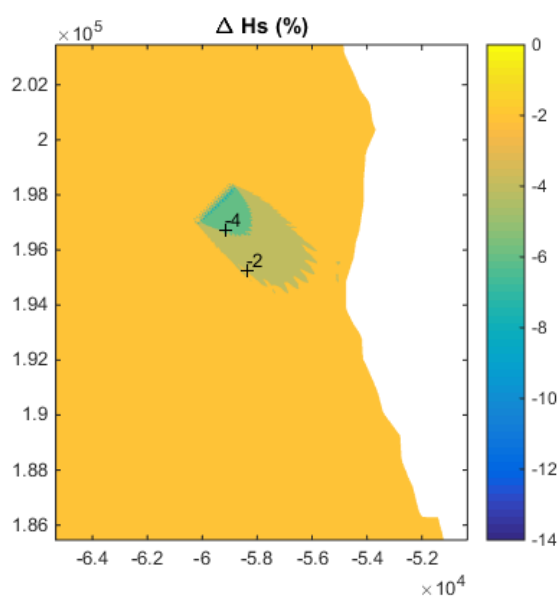


Figura 6.5 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_S=3 \text{ m}$ e $T_p=10 \text{ s}$ proveniente de NW na altura significativa da agitação

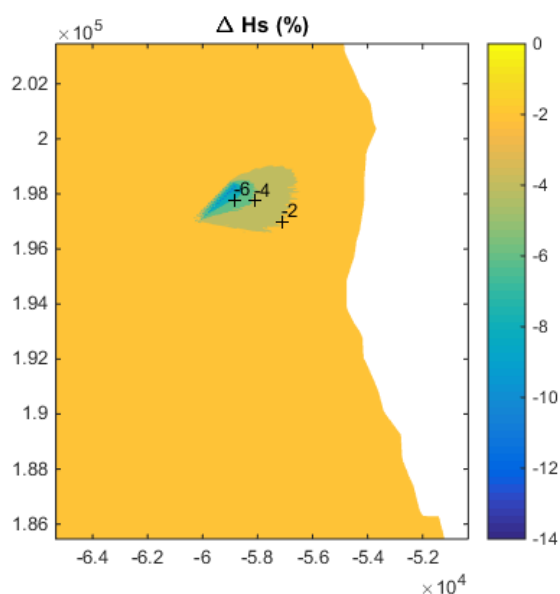


Figura 6.6 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=10$ s proveniente de W na altura significativa da agitação

Observando as figuras verifica-se que a maior variação da altura da onda significativa ocorre para a agitação proveniente de W (cerca de 8%, logo depois dos WECs), enquanto que para as direções de N e NW a variação é semelhante (aproximadamente 4%).

Analisando o alcance dos efeitos do parque de conversores de energia das ondas na altura significativa da agitação, verifica-se que é para a agitação vinda de N que o parque tem maior impacto na linha de costa (diminuição de cerca de 4% na altura da agitação). Nas restantes, os efeitos na altura da onda significativa não atingem a costa.

Tendo em consideração a Tabela 6.1, observa-se que a maior extração de potência para estas condições de agitação ocorre para a agitação proveniente de W que é aquela que também apresenta a maior diminuição da altura da onda significativa. Comparando os resultados da agitação com origem a W com as restantes direções, verifica-se que para as simulações com agitação de N e NW, há uma diminuição de cerca de 75% e 33%, respetivamente, na potência extraída.

6.1.3. CASO C – $H_s = 3$ m e $T_p = 12$ s

As Figuras 6.7, 6.8 e 6.9 representam a variação da altura significativa da agitação quando simuladas as condições de agitação $H_s = 3,0$ m e $T_p = 12$ s com origem a Norte, Noroeste e Oeste, respetivamente.

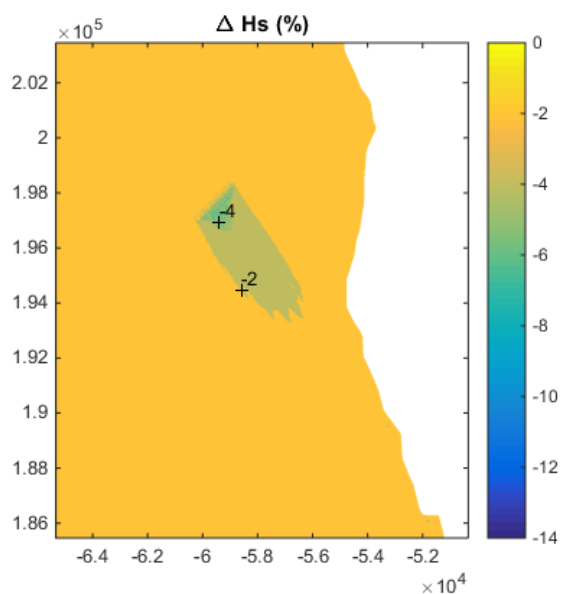


Figura 6.7 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=12$ s proveniente de N na altura significativa da agitação

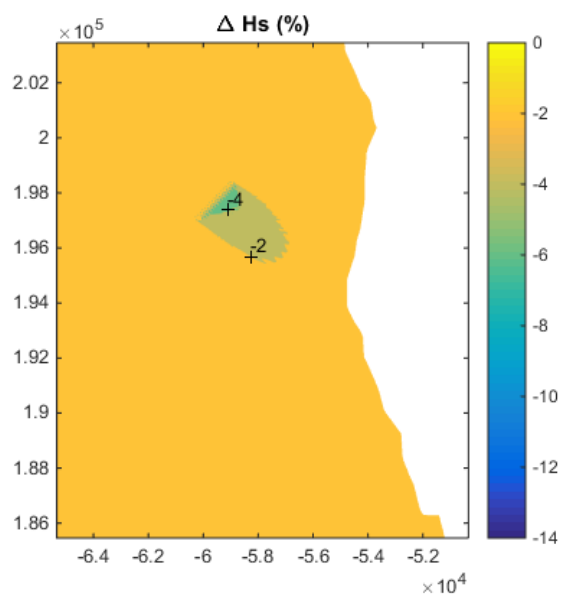


Figura 6.8 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=12$ s proveniente de NW na altura significativa da agitação

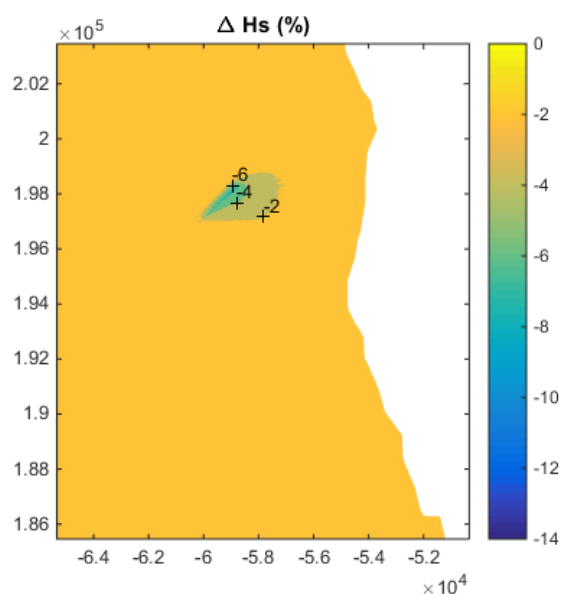


Figura 6.9 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=12$ s proveniente de W na altura significativa da agitação

Observando as figuras e comparando-as aos casos anteriores, verifica-se uma variação semelhante entre os três cenários. A agitação proveniente de N e NW sofre uma diminuição de cerca de 4% e a agitação de W uma diminuição de 6%.

Analisando a propagação dos efeitos do parque de conversores de energia das ondas na altura significativa da agitação, verifica-se também que os resultados não variam muito com a origem da agitação. Apesar disso, é para a agitação proveniente de N que os efeitos do parque têm um maior alcance. Porém, a costa não é atingida significativamente. Nesta análise, destaca-se facto de, com o

aumento do período de pico da agitação (comparativamente às condições de agitação anteriores), diminuir o impacto dos efeitos dos WECs na costa, uma vez que a agitação próxima da linha de costa aparenta não ter sofrido alterações relevantes nas suas alturas significativas.

Tendo em consideração a Tabela 6.1, observa-se que a maior extração de potência para estas condições de agitação ocorre para a agitação proveniente de W. Comparando este cenário com as restantes direções de origem da agitação, verifica-se que para as simulações com agitação de N e NW, há uma diminuição de cerca de 73% e 31%, respetivamente, na potência extraída.

6.1.4. CASO D – $H_s = 4 \text{ m}$ e $T_p = 12 \text{ s}$

Nos gráficos das Figuras 6.10, 6.11 e 6.12, está representada a variação da altura significativa da agitação quando simuladas as condições de agitação $H_s = 4,0 \text{ m}$ e $T_p = 12 \text{ s}$ com origem a Norte, Noroeste e Oeste, respetivamente.

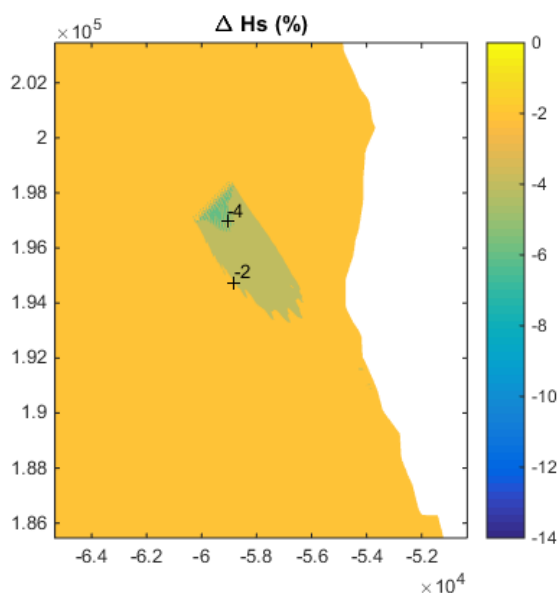


Figura 6.10 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=4 \text{ m}$ e $T_p=12 \text{ s}$ proveniente de N na altura significativa da agitação

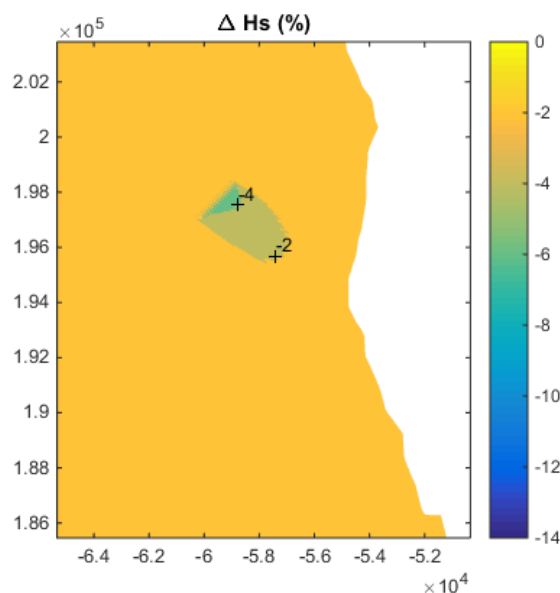


Figura 6.11 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=4 \text{ m}$ e $T_p=12 \text{ s}$ proveniente de NW na altura significativa da agitação

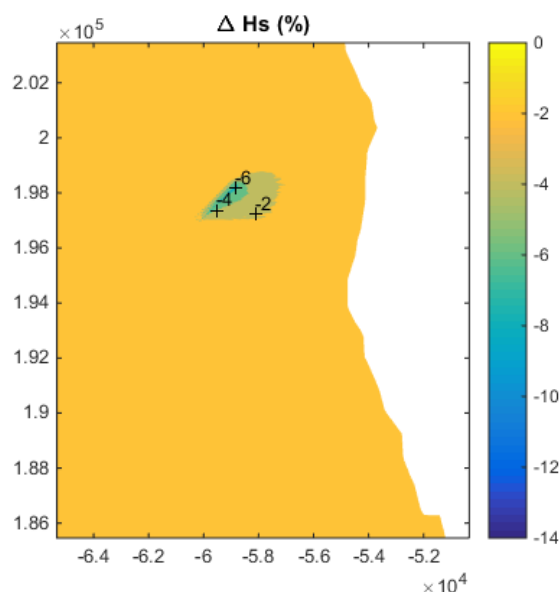


Figura 6.12 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=4$ m e $T_p=12$ s proveniente de W na altura significativa da agitação

Observando as figuras e comparando-as aos casos anteriores, verifica-se que há uma variação semelhante entre os três cenários. A agitação proveniente de N e NW sofre uma diminuição de cerca de 4% e a agitação de W uma diminuição de 6%.

Analisando a propagação dos efeitos do parque de conversores de energia das ondas na altura significativa da agitação, verifica-se que não há uma variação relevante no potencial alcance dos efeitos do parque na altura significativa. É, no entanto, no cenário de uma agitação proveniente de N que se observa um maior alcance dos efeitos do parque na costa.

Tendo em consideração a Tabela 6.1, observa-se que a maior extração de potência para estas condições de agitação, ocorre para a agitação proveniente de W. Comparando este cenário com as restantes direções de origem da agitação, verifica-se que para as simulações com agitação de N e NW, há uma diminuição de cerca de 73% e 31%, respetivamente, na potência extraída.

6.2. EFEITOS NA DIREÇÃO DE PROPAGAÇÃO DA AGITAÇÃO

6.2.1. CASO A – $H_s = 2$ m e $T_p = 10$ s

Apresentam-se, nas Figuras 6.13 a 6.21, os efeitos do parque de conversores de energia das ondas na direção da propagação da agitação. As Figuras 6.13, 6.14 e 6.15 são, respetivamente, o resultado das simulações da agitação proveniente de Norte, Noroeste e Oeste, com $H_s = 2$ m e $T_p = 10$ s.

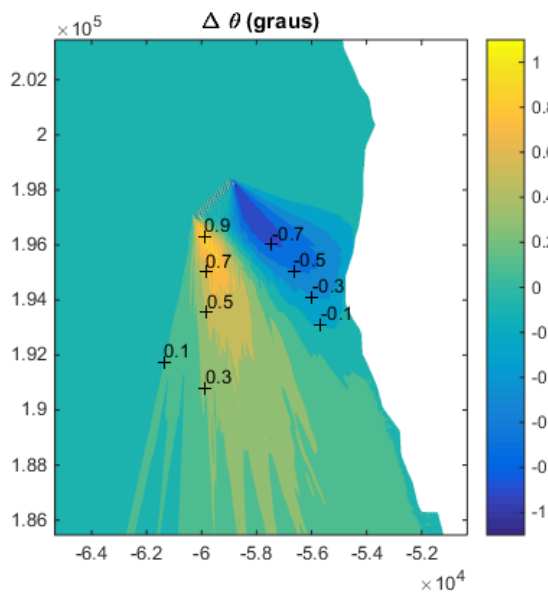


Figura 6.13 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=2$ m e $T_p=10$ s proveniente de N na direção de propagação da agitação

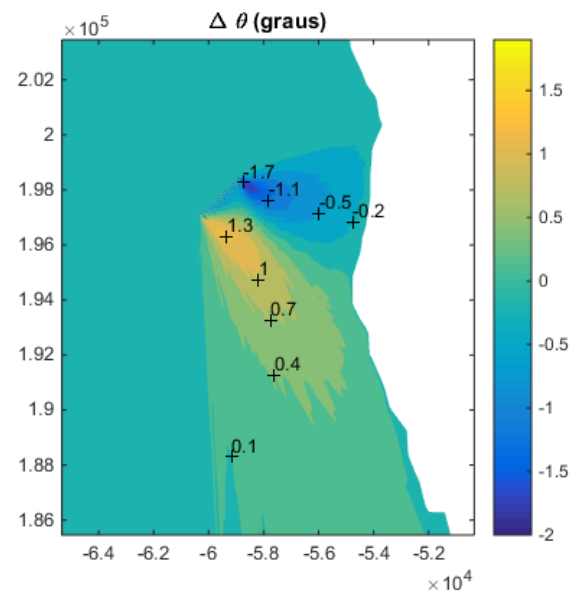


Figura 6.14 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=2$ m e $T_p=10$ s proveniente de NW na direção de propagação da agitação

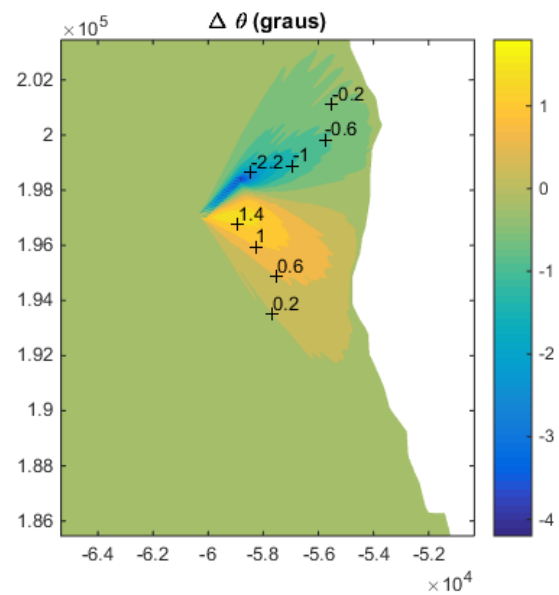


Figura 6.15 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=2$ m e $T_p=10$ s proveniente de W na direção de propagação da agitação

Nas figuras, observa-se que a agitação com origem a W sofre a maior alteração na direção de propagação da agitação. Tomando como sentido positivo o sentido anti-horário, verifica-se que, do lado mais a sul do parque, há uma variação máxima de $+1,4^\circ$ e, no lado mais a norte, uma variação mínima inferior a $-2,2^\circ$. Esta é a simulação com maior amplitude na variação da direção da agitação. Verifica-se ainda que a agitação proveniente de NW sofre um maior impacto que a proveniente de N, tendo a primeira um

máximo na variação da direção de propagação superior a $+1,3^\circ$ e um mínimo inferior a $-1,7^\circ$ e a segunda um máximo na variação da direção de propagação superior a $+0,9^\circ$ e um mínimo inferior a $-0,7^\circ$.

Comparando as três simulações desta secção, observa-se também que para as simulações com as direções de origem N e NW os efeitos do parque se propagam, maioritariamente, para sul. Por outro lado, para a simulação com direção de origem de W, os efeitos tendem a propagar-se para E do parque com maior amplitude de dispersão.

6.2.2. CASO B – $H_S = 3 \text{ m}$ e $T_P = 10 \text{ s}$

Os efeitos do parque de conversores de energia das ondas na direção da propagação da agitação, apresentam-se nas Figuras 6.16, 6.17 e 6.19. Estas são, respetivamente, o resultado das simulações da agitação proveniente de Norte, Noroeste e Oeste, com $H_S = 3 \text{ m}$ e $T_P = 10 \text{ s}$.

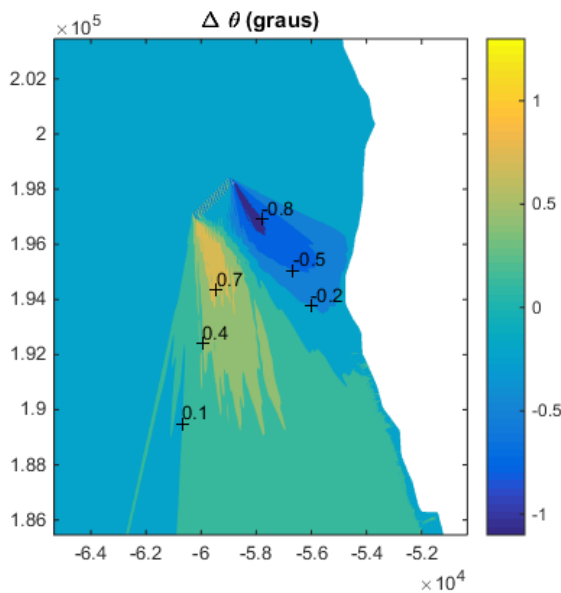


Figura 6.16 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_S=3 \text{ m}$ e $T_P=10 \text{ s}$ proveniente de N na direção de propagação da agitação

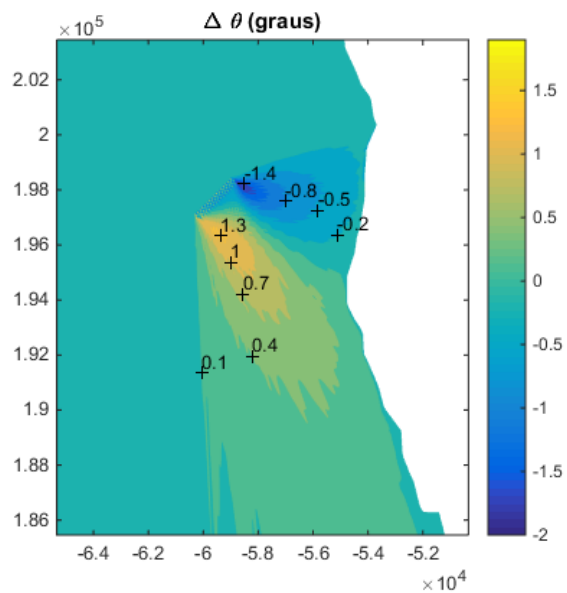


Figura 6.17 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_S=3 \text{ m}$ e $T_P=10 \text{ s}$ proveniente de NW na direção de propagação da agitação

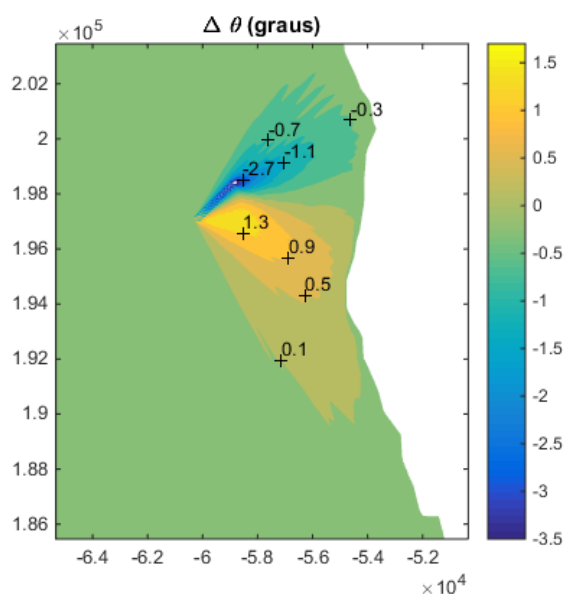


Figura 6.18 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=10$ s proveniente de W na direção de propagação da agitação

Nas figuras, observa-se que a agitação com origem a W sofre a maior alteração na direção de propagação da agitação. Tomando como sentido positivo o sentido anti-horário, verifica-se que, do lado mais a sul do parque, há uma variação da direção de propagação máxima superior a $+1,3^\circ$ e, no lado mais a norte, uma variação mínima inferior a $-2,7^\circ$. Neste gráfico, observa-se ainda uma pequena região em branco em que os valores da variação são inferiores a $-3,5^\circ$ (valor mínimo da escala). Esta é uma área relativamente pequena quando comparada com a área da simulação, pelo que estes valores não têm significado na análise dos resultados.

A simulação com a agitação de origem de W é a que possui maior amplitude na variação da direção da agitação. Verifica-se ainda que a agitação proveniente de NW provoca um maior impacto que a proveniente de N, tendo a primeira um máximo na variação da direção de propagação superior a $+1,3^\circ$ e um mínimo inferior a $-1,4^\circ$ e a segunda um máximo na variação da direção de propagação superior a $+0,7^\circ$ e um mínimo inferior a $-0,8^\circ$.

Comparando as três simulações desta secção, observa-se também que para as simulações com as direções de origem N e NW os efeitos do parque se propagam, maioritariamente, para sul. Por outro lado, para a simulação com direção de origem de W, os efeitos tendem a propagar-se para E do parque com maior amplitude de dispersão.

6.2.3. CASO C – $H_s = 3$ m e $T_p = 12$ s

As Figuras 6.19, 6.20 e 6.21 apresentam, respetivamente, o resultado das simulações para a agitação proveniente de Norte, Noroeste e Oeste, com $H_s = 3$ m e $T_p = 12$ s.

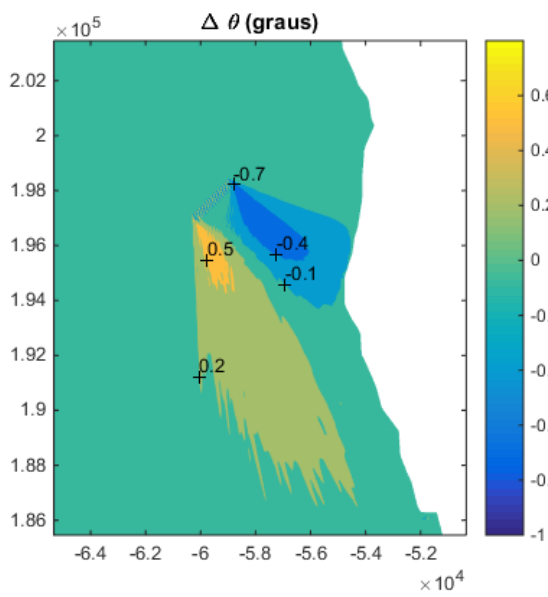


Figura 6.19 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=12$ s proveniente de N na direção de propagação da agitação

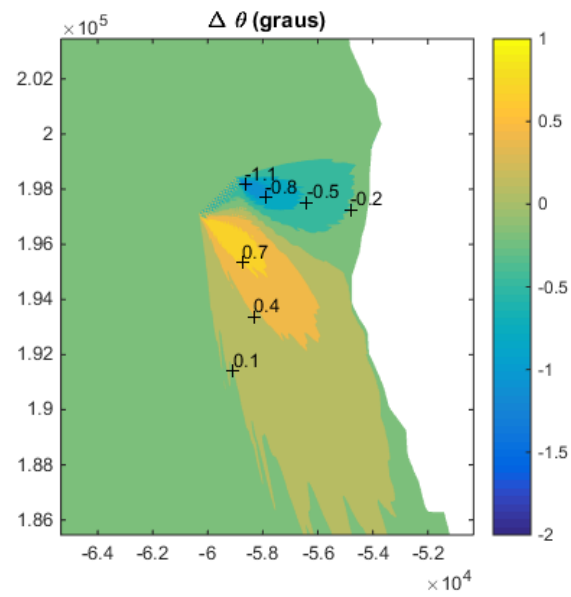


Figura 6.20 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=12$ s proveniente de NW na direção de propagação da agitação

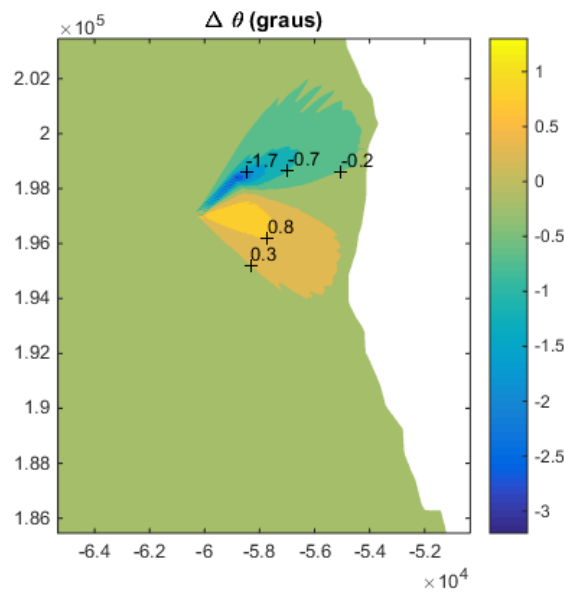


Figura 6.21 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=12$ s proveniente de W na direção de propagação da agitação

Nas figuras, observa-se que a agitação com origem a W sofre a maior alteração na sua direção de propagação. Tomando como sentido positivo o sentido anti-horário, verifica-se que, do lado mais a sul do parque, há uma variação da direção de propagação máxima superior a $+0,8^\circ$ e, no lado mais a norte, uma variação mínima inferior a $-1,7^\circ$. Esta é a simulação com maior amplitude na variação da direção da agitação. Verifica-se ainda que a agitação proveniente de NW sofre um maior impacto que a proveniente de N, tendo a primeira um máximo na variação da direção de propagação superior a $+0,7^\circ$ e um mínimo inferior a $-1,3^\circ$ e a segunda um máximo na variação da direção de propagação superior a $+0,5^\circ$ e um mínimo inferior a $-0,7^\circ$.

Verifica-se também que o efeito do parque de conversores de energia das ondas na direção da propagação da agitação reduz-se ou anula-se com o aumento do período. Quando comparado com o caso B ($H_S = 3$ m e $T_P = 10$ s), para mesma altura significativa ($H_S = 3$ m) e para um período de pico superior ($T_{P,C} = 12$ s > $T_{P,B} = 10$ s), pela observação direta, há uma redução dos impactos provocados pela presença dos conversores na direção da propagação da agitação junto à costa em todas as direções de origem da agitação.

Comparando as três simulações desta secção observa-se também que para as direções de origem N e NW os efeitos do parque se propagam, maioritariamente, para sul. Por outro lado, para a simulação com direção de origem de W, os efeitos tendem a propagar-se para leste do parque com uma maior amplitude de dispersão.

6.2.4. CASO D – $H_S = 4$ m e $T_P = 12$ s

As Figuras 6.22, 6.23 e 6.24 representam os efeitos do parque de conversores de energia das ondas na direção da propagação da agitação e são, respetivamente, o resultado das simulações da agitação proveniente de Norte, Noroeste e Oeste, com $H_S = 4$ m e $T_P = 12$ s.

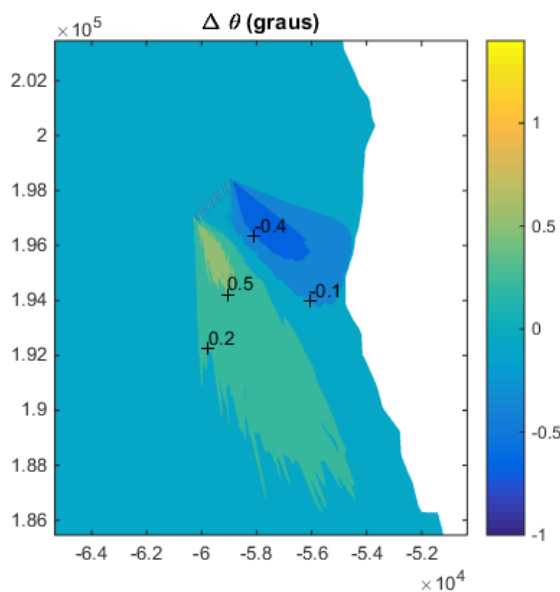


Figura 6.22 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_S=4$ m e $T_P=12$ s proveniente de N na direção de propagação da agitação

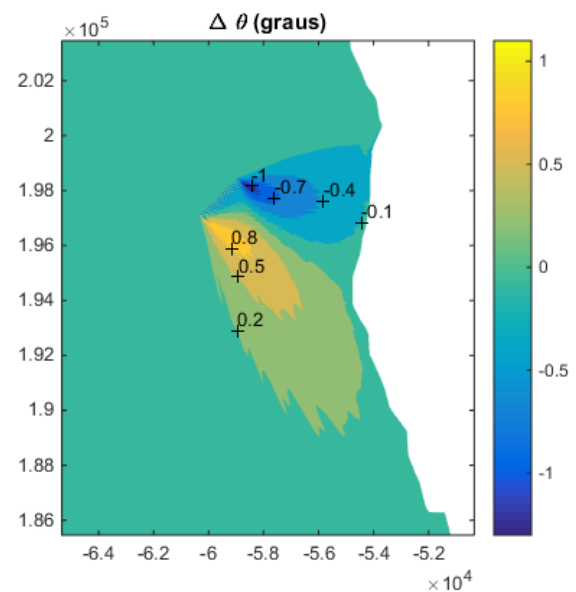


Figura 6.23 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_S=4$ m e $T_P=12$ s proveniente de NW na direção de propagação da agitação

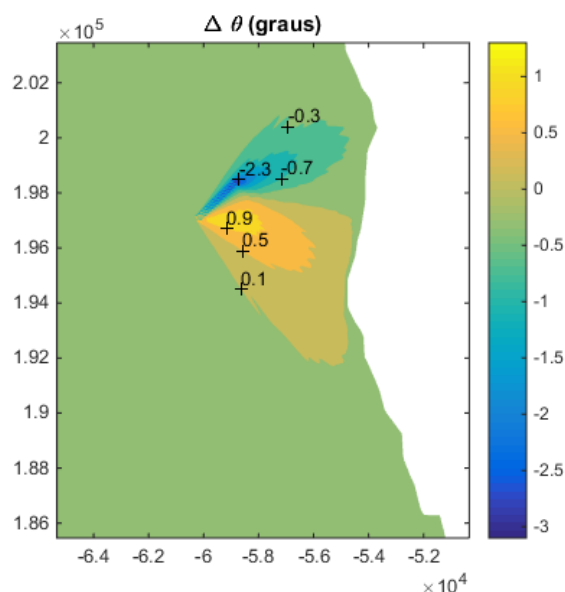


Figura 6.24 – Influência do parque de conversores de energia das ondas para uma agitação com $H_s=4$ m e $T_p=12$ s proveniente de W na direção de propagação da agitação

Nas figuras, observa-se que a agitação com origem a W sofre a maior alteração na direção de propagação da agitação. Tomando como sentido positivo o sentido anti-horário, verifica-se que, do lado mais a sul do parque, há uma variação da direção de propagação máxima de $+0,9^\circ$ e, no lado mais a norte, uma variação mínima inferior a $-2,3^\circ$. Esta é a simulação com maior amplitude na variação da direção da agitação. Verifica-se ainda que a agitação proveniente de NW provoca um maior impacto do que a proveniente de N, tendo a primeira um máximo na variação da direção de propagação superior a $+0,8^\circ$ e um mínimo inferior a $-1,0^\circ$ e a segunda um máximo na variação da direção de propagação superior a $+0,5^\circ$ e um mínimo inferior a $-0,4^\circ$.

Comparando as três simulações desta secção, observa-se também que para as simulações com as direções de origem N e NW os efeitos do parque se propagam, maioritariamente, para sul. Por outro lado, para a simulação com direção de origem de W, os efeitos tendem a propagar-se para leste do parque com uma maior amplitude de dispersão.

6.3. EFEITOS AO LONGO DA BATIMÉTRICA DE 10 M DE PROFUNDIDADE

Para uma avaliação mais precisa dos efeitos do parque de conversores de energia das ondas na costa, foram também retirados dados da altura da onda significativa e da direção da agitação ao longo da linha batimétrica dos 10 m. Os dados são de pontos ao longo de 18 km (comprimento da grelha interior), espaçados de 30 m. Os valores da variação da altura significativa da agitação foram calculados usando a equação (6.1).

6.3.1. CASO A – $H_S = 2 \text{ m}$ e $T_P = 10 \text{ s}$

As Figuras 6.25 a 6.27 comparam os resultados dos efeitos da presença do parque de conversores de energia das ondas nas simulações do caso A ($H_S = 2 \text{ m}$ e $T_P = 10 \text{ s}$), para as diferentes direções de origem da agitação.

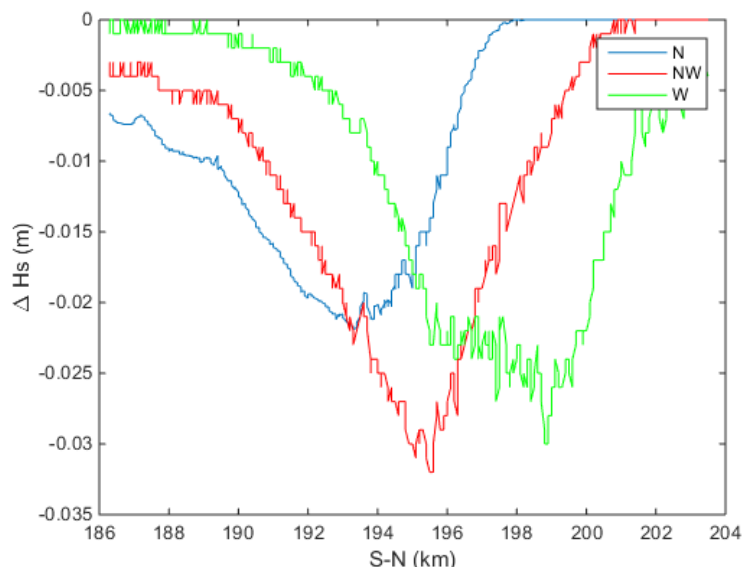


Figura 6.25 – Variação absoluta da altura significativa (m) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_S=2 \text{ m}$ e $T_P=10 \text{ s}$

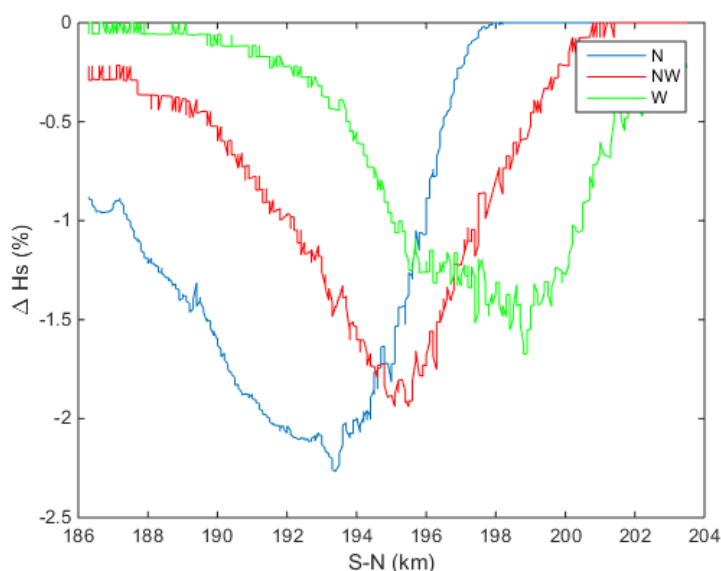


Figura 6.26 – Variação relativa da altura significativa (%) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_S=2 \text{ m}$ e $T_P=10 \text{ s}$

As Figuras 6.25 e 6.26 representam as variações na altura da onda significativa ao longo da linha batimétrica dos 10 m. Na Figura 6.25, verifica-se que é para a agitação com origem a NW que há uma maior variação, em valores absolutos, da altura significativa na costa, passando ligeiramente os 0,03 m.

A presença do parque de conversores de energia das ondas provoca, na agitação de W, uma diminuição de pouco menos de 0,03 m e, na de N, uma diminuição de, aproximadamente, 0,02 m.

Quando se analisa as variações da altura da onda significativa em termos relativos, Figura 6.26, observa-se que o estado de mar que regista maiores alterações é a de N, diminuindo cerca de 2,25%, no seu pico. As agitações provenientes de NW e W registam uma redução máxima de cerca de 1,8% e 1,6%, respetivamente.

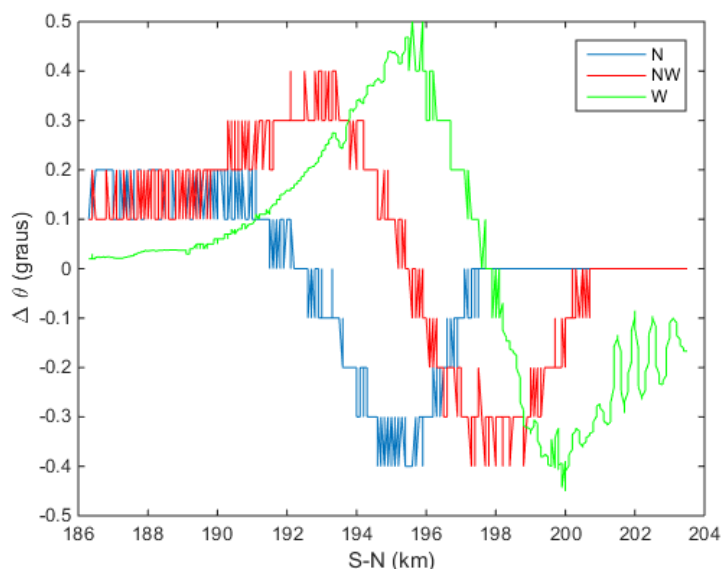


Figura 6.27 – Variação da direção de propagação da agitação ($^{\circ}$) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_s=2$ m e $T_p=10$ s

A Figura 6.27 mostra a variação da direção da propagação da agitação na linha batimétrica dos 10 m, ao longo dos 18 km da linha de costa estudados. Como nas figuras da variação da direção de propagação da agitação na grelha interior, toma-se como sentido positivo o sentido anti-horário para a determinação dos valores.

Observando o gráfico, verifica-se que é a agitação de W que sofre mais alterações com a presença do parque de conversores de energia das ondas. É para esta agitação que há uma maior amplitude na variação da direção da agitação, oscilando entre $+0,5^{\circ}$ e $-0,45^{\circ}$, aproximadamente. A agitação proveniente de NW sofre uma variação entre $+0,4^{\circ}$ e $-0,4^{\circ}$ e, a de N, uma variação entre $+0,2^{\circ}$ e $-0,4^{\circ}$.

6.3.2. CASO B – $H_S = 3$ m e $T_P = 10$ s

Nas Figuras 6.28 a 6.30, são comparados os resultados dos efeitos da presença do parque de conversores de energia das ondas nas simulações do caso B ($H_S = 3$ m e $T_P = 10$ s), para as diferentes direções de origem da agitação.

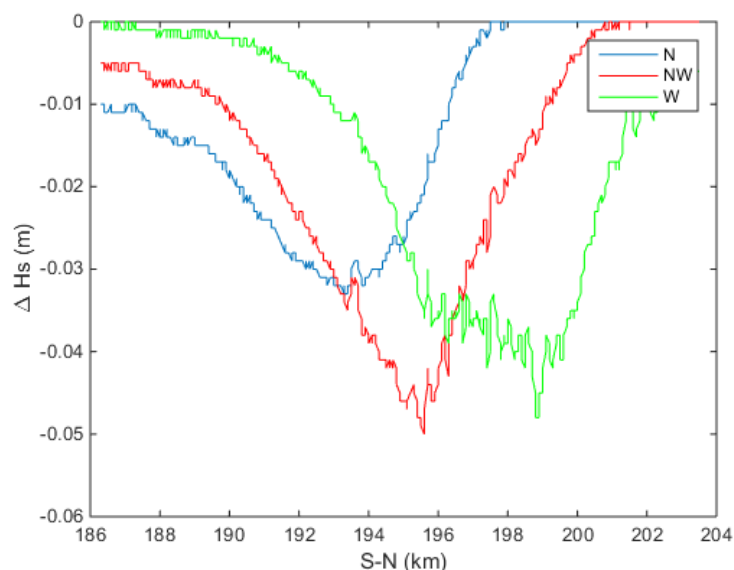


Figura 6.28 – Variação absoluta da altura significativa (m) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=10$ s

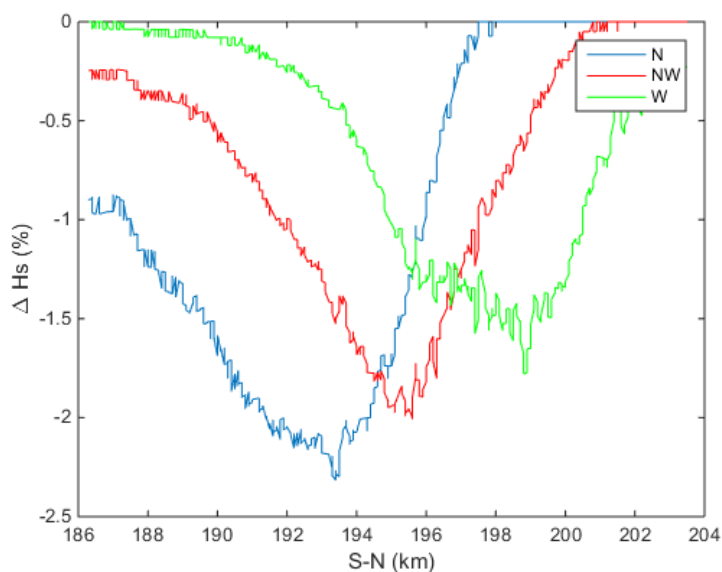


Figura 6.29 – Variação relativa da altura significativa (%) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=10$ s

As Figuras 6.28 e 6.29 representam as variações na altura significativa da agitação ao longo da linha batimétrica dos 10 m. Observando a Figura 6.28, verifica-se que as agitações com origem a NW e W sofrem, em valores absolutos, uma diminuição da altura da onda significativa na costa semelhante, aproximadamente, 0,05 m. A presença do parque de conversores de energia das ondas provoca, na agitação de N, uma diminuição ligeiramente acima dos 0,03 m.

Quando se analisa as variações da altura significativa em termos relativos, Figura 6.29, observa-se que o estado de mar que regista maiores alterações é a de N, tendo uma redução de cerca de 2,25%, no seu

pico. As agitações provenientes de NW e W registam uma redução máxima de cerca de 2% e 1,8%, respetivamente.

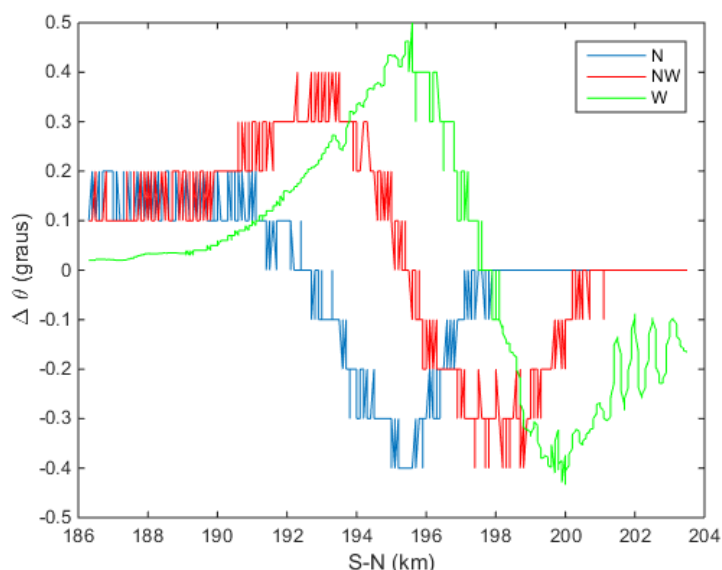


Figura 6.30 – Variação da direção de propagação da agitação ($^{\circ}$) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=10$ s

A Figura 6.30 mostra a variação da direção da propagação da agitação na linha batimétrica dos 10 m, ao longo dos 18 km da linha de costa estudados. Como nas figuras da variação da direção de propagação da agitação na grelha interior, toma-se como sentido positivo o sentido anti-horário para a determinação dos valores.

Observando o gráfico, verifica-se que é a agitação de W que sofre mais alterações com a presença do parque de conversores de energia das ondas. É para esta agitação que há uma maior amplitude na variação da direção da agitação, oscilando entre $+0,5^{\circ}$ e $-0,4^{\circ}$, aproximadamente. A agitação proveniente de NW sofre uma variação entre $+0,4^{\circ}$ e $-0,4^{\circ}$ e, a de N, uma variação entre $+0,2^{\circ}$ e $-0,4^{\circ}$.

6.3.3. CASO C – $H_S = 3$ m e $T_P = 12$ s

As Figuras 6.31 a 6.33 comparam os resultados dos efeitos da presença do parque de conversores de energia das ondas nas simulações do caso C ($H_S = 3$ m e $T_P = 12$ s), para as diferentes direções de origem da agitação.

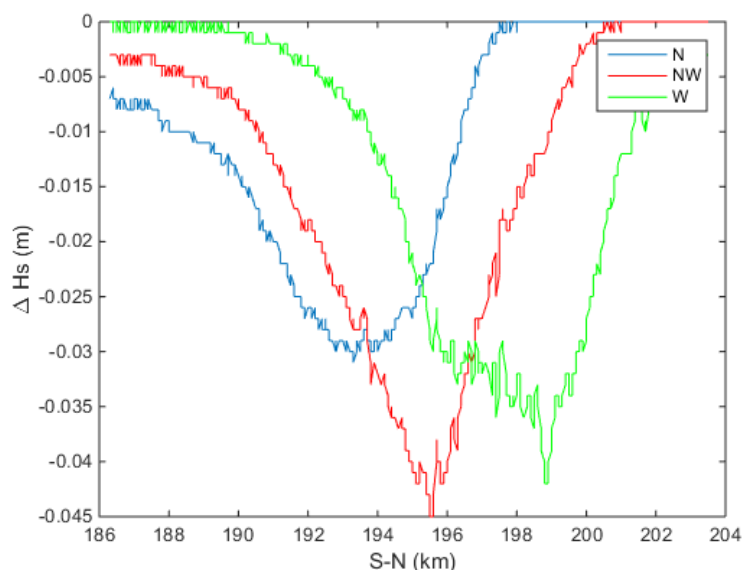


Figura 6.31 – Variação absoluta da altura significativa (m) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=12$ s

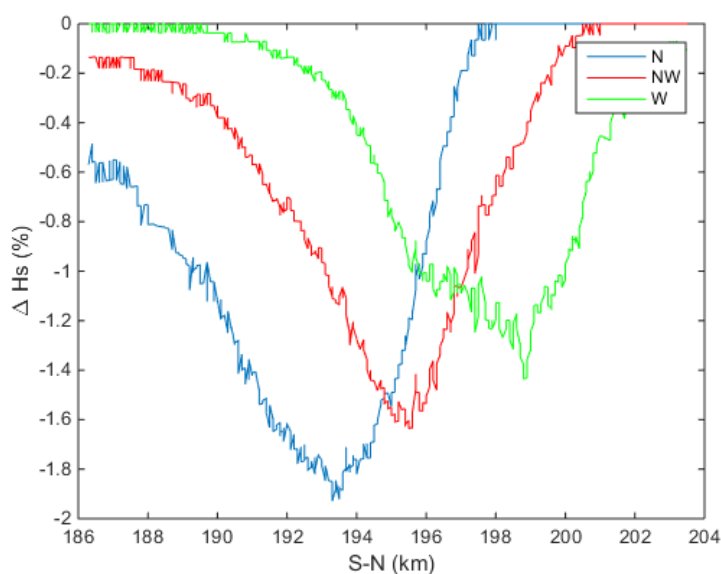


Figura 6.32 – Variação relativa da altura significativa (%) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=12$ s

As Figuras 6.31 e 6.32 representam as variações na altura significativa da agitação ao longo da linha batimétrica dos 10 m. Na Figura 6.31, verifica-se que é para a agitação com origem a NW que há uma maior variação, em valores absolutos, da altura da onda significativa na costa, passando ligeiramente os 0,045 m. A presença do parque de conversores de energia das ondas provoca, na agitação de W, uma redução que passa um pouco os 0,04 m e, na de N, uma redução de, aproximadamente, 0,03 m.

Quando se analisa as variações da altura significativa em termos relativos, Figura 6.32, observa-se que o estado de mar que regista maiores alterações é a de N, diminuindo cerca de 1,9%, no seu pico. As

agitações provenientes de NW e W registam uma redução máxima de cerca de 1,6% e 1,4%, respetivamente.

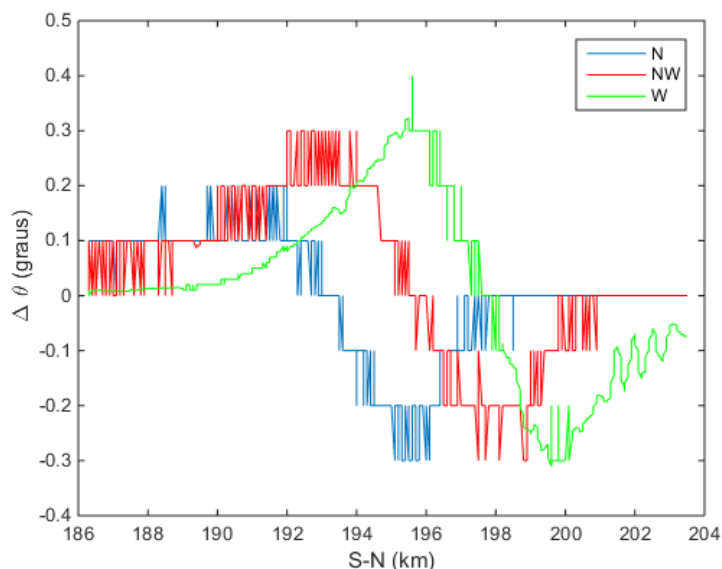


Figura 6.33 – Variação da direção de propagação da agitação (°) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_s=3$ m e $T_p=12$ s

Na Figura 6.33 mostra-se a variação da direção da propagação da agitação na linha batimétrica dos 10 m, ao longo dos 18 km da linha de costa estudados. Como nas figuras da variação da direção de propagação da agitação na grelha interior, toma-se como sentido positivo o sentido anti-horário para a determinação dos valores.

Observando o gráfico, verifica-se que é a agitação de W que sofre mais alterações com a presença do parque de conversores de energia das ondas. É para este estado de mar que há uma maior amplitude na variação da direção da agitação, oscilando entre $+0,4^\circ$ e $-0,3^\circ$, aproximadamente. A agitação proveniente de NW sofre uma variação entre $+0,3^\circ$ e $-0,3^\circ$ e, a de N, uma variação entre $+0,2^\circ$ e $-0,3^\circ$.

6.3.4. CASO D – $H_s = 4$ m e $T_p = 12$ s

Comparam-se, nas figuras abaixo, os resultados dos efeitos da presença do parque de conversores de energia das ondas nas simulações do caso D ($H_s = 4$ m e $T_p = 12$ s), para as diferentes direções de origem da agitação.

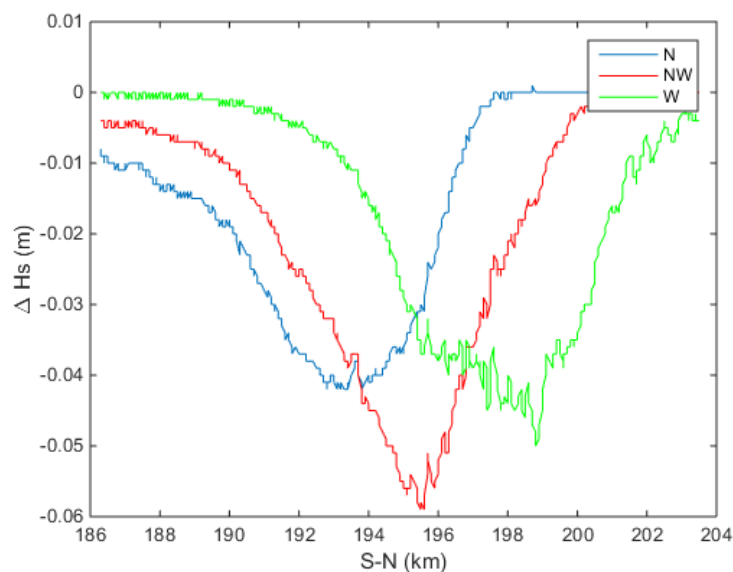


Figura 6.34 – Variação absoluta da altura significativa (m) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_s=4$ m e $T_p=12$ s

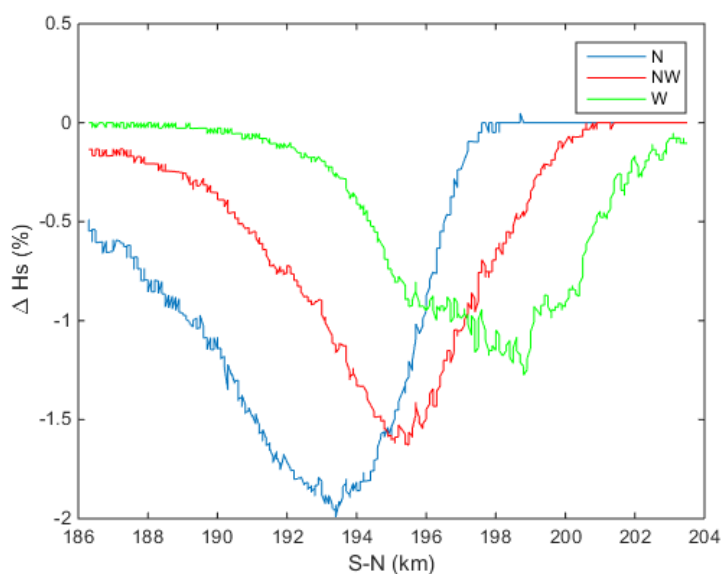


Figura 6.35 – Variação relativa da altura significativa (%) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_s=4$ m e $T_p=12$ s

As Figuras 6.34 e 6.35 representam as variações na altura da onda significativa ao longo da linha batimétrica dos 10 m. Na Figura 6.34, verifica-se que é para a agitação com origem a NW que há uma maior variação, em valores absolutos, da altura da onda significativa na costa, que é cerca de 0,06 m. A presença do parque de conversores de energia das ondas provoca, na agitação de W, uma diminuição de pouco menos de 0,05 m e, na de N, uma diminuição de, aproximadamente, 0,04 m.

Quando se analisa as variações da altura significativa em termos relativos, Figura 6.35, observa-se que o estado de mar que regista maiores alterações é a de N, tendo uma redução máxima de 2%. A agitação

proveniente de NW regista uma redução máxima que passa um pouco os 1,6% e a de W uma redução de cerca de 1,2%.

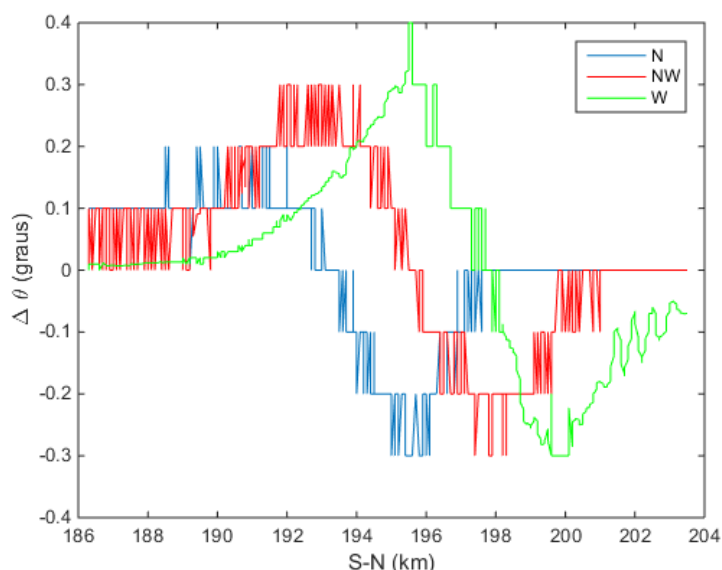


Figura 6.36 – Variação da direção de propagação da agitação ($^{\circ}$) ao longo da batimétrica dos 10 m para uma agitação com $H_s=4$ m e $T_p=12$ s

A Figura 6.36 mostra a variação da direção da propagação da agitação na linha batimétrica dos 10 m, ao longo dos 18 km da linha de costa estudados. Como nas figuras da variação da direção de propagação da agitação na grelha interior, toma-se como sentido positivo o sentido anti-horário para a determinação dos valores.

Observando o gráfico, verifica-se que é a agitação de W que sofre mais alterações com a presença do parque de conversores de energia das ondas. É para esta agitação que há uma maior amplitude na variação da direção da agitação, oscilando entre $+0,4^{\circ}$ e $-0,3^{\circ}$, aproximadamente. A agitação proveniente de NW sofre uma variação entre $+0,3^{\circ}$ e $-0,3^{\circ}$ e, a de N, uma variação entre $+0,2^{\circ}$ e $-0,3^{\circ}$.

6.4. COMPARAÇÃO ENTRE OS CASOS

Os resultados das simulações do caso de estudo estão agora dispostos na Tabela 6.2 para comparação e análise.

Fazendo uma comparação entre os casos verifica-se que, para um mesmo valor de período de pico da agitação e um valor da altura significativa mais elevado, não há diferenças de relevo. Analisando as variações na altura significativa a sotamar do parque de conversores de energia das ondas, entre os casos A ($H_S = 2$ m e $T_P = 10$ s) e B ($H_S = 3$ m e $T_P = 10$ s), observa-se que estas são iguais. O mesmo acontece quando se compara os casos C ($H_S = 3$ m e $T_P = 12$ s) e D ($H_S = 4$ m e $T_P = 12$ s). Relativamente à variação da direção de propagação da agitação, observa-se uma tendência para um ligeiro aumento deste parâmetro, principalmente nos valores de variação negativa. Os casos A/B e C/D demonstram isso.

Tabela 6.2 – Comparação dos resultados das simulações

	Condições de agitação	Direção de origem	ΔHS max (%)	$\Delta \theta$ max (°)	
				Positivo	Negativo
Caso A	HS = 2,0 m TP = 10 s	N	4	0,9	0,7
		NW	4	1,3	1,7
		W	8	1,4	2,2
Caso B	HS = 3,0 m TP = 10 s	N	4	0,7	0,8
		NW	4	1,3	1,4
		W	8	1,3	2,7
Caso C	HS = 3,0 m TP = 12 s	N	4	0,5	0,7
		NW	4	0,7	1,3
		W	6	0,8	1,7
Caso D	HS = 4,0 m TP = 12 s	N	4	0,5	0,4
		NW	4	0,8	1
		W	6	0,9	2,3

Para um mesmo valor da altura significativa da agitação e para um valor de período de pico mais elevado, observa-se uma redução nas variações da altura significativa e da direção de propagação a sotamar do parque de conversores de energia. Comparando os casos B ($H_S = 3$ m e $T_P = 10$ s) e C ($H_S = 3$ m e $T_P = 12$ s), verifica-se uma pequena redução, em termos relativos, da variação da altura significativa, mais concretamente para a agitação proveniente de Oeste (W). Já em relação à variação da direção de propagação da agitação, para um maior período de pico os valores tendem a diminuir independentemente da direção de origem da agitação.

As direções de origem da agitação influenciam os efeitos que o parque de dispositivos tem a sotamar. Por exemplo, em todos os casos (A, B, C e D) é para a agitação proveniente de Oeste que se observam os valores mais elevados das variações na altura significativa e na direção de propagação da agitação. Por outro lado, a agitação de Norte é aquela que sofre menores variações com a presença do parque.

7

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1. CONCLUSÕES

No trabalho apresentado, foi feito o estudo dos efeitos da extração de energia das ondas na propagação da agitação na costa portuguesa. Foi considerada uma zona de estudo ao largo da Aguçadoura, na Póvoa do Varzim, onde se considerou a presença de um parque de conversores de energia das ondas composto por absorvedores pontuais, apenas com movimento vertical.

Para modelo de simulação recorreu-se ao SNL-SWAN. Foram escolhidos 4 dos estados de mar com maior potencial de extração de energia: o caso A, com $H_S = 2$ m e $T_p = 10$ s; o caso B, com $H_S = 3$ m e $T_p = 10$ s; o caso C, com $H_S = 3$ m e $T_p = 12$ s; e o caso D, com $H_S = 4$ m e $T_p = 12$ s. Para cada um dos casos foram simulados os estados de mar com agitação proveniente das direções Norte, Noroeste e Oeste, com e sem a presença do parque de conversores.

Devido ao modo de aplicação dos coeficientes de transmissão a obstáculos por parte do SNL-SWAN, os conversores de energia foram introduzidos no modelo numérico como três vértices, dispostos em “L” e separados 15 m (o diâmetro real de um WEC). Uma das “faces” composta pelos vértices ficou virada a Norte e a outra virada a Oeste, dado os estados de mar considerados para o estudo. A grelha de cálculo tem uma resolução igual ao diâmetro de um WEC, i.e 15 m \times 15 m.

Nas simulações, para um valor mais elevado da altura da onda significativa e para um mesmo período de pico (casos A e B ($H_{S,A} = 2$ m $<$ $H_{S,B} = 3$ m) ou C e D ($H_{S,C} = 3$ m $<$ $H_{S,D} = 4$ m)), verificou-se uma maior potência extraída pelos conversores do parque. Sendo a energia extraída mais elevada, maiores foram também as variações da altura da onda significativa e da direção de propagação da agitação a sotamar do parque. No entanto, para um valor mais elevado da altura da onda significativa, estas variações afetaram uma área mais reduzida.

Para um valor mais elevado do período de pico e para uma mesma altura da onda significativa (casos B e C ($T_{p,B} = 10$ s $<$ $T_{p,C} = 12$ s)), não se verificou diferenças relevantes na potência extraída pelo parque de conversores de energia. Como tal, a altura da onda significativa a sotamar do parque é afetada do mesmo modo em ambos os casos. A direção de propagação da agitação sofreu variações ligeiramente menores. Para um valor mais elevado do período de pico, estas variações a sotamar do parque afetaram uma área mais reduzida.

Para os estados de mar com a agitação proveniente de Norte, observou-se que a área a sotamar dos WECs afetada pelas variações da altura da onda significativa e da direção de propagação da agitação é significativamente maior do que nas outras direções simuladas (Noroeste e Oeste). Contudo, para a agitação proveniente de Norte, as variações provocadas pelo parque na agitação foram de menor escala. Por outro lado, a agitação com origem a Oeste do parque sofreu maiores variações da altura da onda significativa e direção de propagação da agitação, mas a área afetada por essas variações foi menor. Isto foi transversal a todos os estados de mar.

Os efeitos da presença do parque de conversores de energia das ondas na agitação junto à costa, quer do ponto de vista da variação da altura da onda significativa, quer do ponto de vista da variação da direção da propagação da agitação, não foram muito relevantes. A diferença entre os valores com e sem a presença do parque, não foi muito significativa.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No futuro, seria interessante incluir neste estudo uma análise das variações espectrais provocadas pela presença do parque de conversores de energia das ondas.

O estudo das alterações nas correntes locais devido à presença do parque teria também bastante relevância. Tais alterações poderão ter impacto na deposição de sedimentos ao longo da costa e, conseqüentemente, na erosão.

É importante realizar estudos que embora semelhantes a este, se diferenciem em alguns parâmetros. Um estudo que recorra à matriz de potência dos dispositivos ou a valores da largura de captura relativa definida em função da frequência espectral seria interessante para uma análise comparativa. Também um estudo em que se adotasse uma disposição diferente do parque de conversores de energia das ondas seria importante para esta análise comparativa.

BIBLIOGRAFIA

- Abanades J, Greaves D, Iglesias G (2015) Beach morphodynamics in the lee of a wave farm. In: Proceedings of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference. Nantes, pp 1–7
- AW-Energy (2010) Waveroller - Projeto SURGE. <http://aw-energy.com/pt-pt/projetos/projeto-surge>. Accessed 22 Apr 2017
- Babarit A, Hals J, Muliawan MJ, Kurniawan A, Moan T, Krokstad J (2012) Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters. *Renew Energy* 41:44–63. doi: 10.1016/j.renene.2011.10.002
- Barron CN, Kara AB, Rhodes RC, Rowley C, Smedstad LF (2007) Validation Test Report for the 1/8 Global Navy Coastal Ocean Model Nowcast/Forecast System.
- Battjes JA, Janssen JPFM (1978) Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Proc 16th Int Conf Coast Eng Am Soc Civ Eng, New York* 569–587. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004
- Booij N, Holthuijsen LH, Ris RC (1996) The “Swan” Wave Model for Shallow Water. *Coast Eng*. doi: 10.9753/icce.v25.%p
- Booij N, Ris RC, Holthuijsen LH (1999) A third-generation wave model for coastal regions, Part I, model description and validation.
- Cerveira F, Fonseca N, Pascoal R (2013) Mooring system influence on the efficiency of wave energy converters. *Int J Mar Energy* 3–4:65–81. doi: 10.1016/j.ijome.2013.11.006
- Chakrabarti SK (1994) Offshore Structure Modeling. doi: 10.1142/9789812795946
- Chang G, Ruehl K, Jones CA, Roberts J, Chartrand C (2016) Numerical modeling of the effects of wave energy converter characteristics on nearshore wave conditions. *Renew Energy* 89:636–648. doi: 10.1016/j.renene.2015.12.048
- CM (2012) Ondas de milhões abandonadas. <http://www.cmjournal.pt/economia/detalhe/ondas-de-milhoes-abandonadas>. Accessed 14 Apr 2017
- Costa M, Silva R, Vitorino J (2001) Contribuição Para O Estudo Do Clima De Agitação Marítima Na Costa Portuguesa. 2as Jornadas Port Eng Costeira e Portuária - Assoc Int Naveg 20.
- Cruz J (2008) *Ocean Wave Energy*. Springer - Verlag Berlin Heidelberg, Leipzig
- Eldeberky Y (1996) Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone. Delft University of Technology, The Netherlands
- Expresso (2016) Primeiro projeto eólico offshore em Portugal conclui fase de testes. http://expresso.sapo.pt/economia/economina_energia/2016-06-02-Primeiro-projeto-eolico-offshore-em-Portugal-conclui-fase-de-testes. Accessed 27 Apr 2017
- Falcao (2010) Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renew Sustain Energy Rev* 14:899–918. doi: 10.1016/j.rser.2009.11.003
- Falcão AF (2000) The shoreline OWC wave power plant at the Azores. Fourth Eur Wave Energy Conf Aalborg, Denmark 4–6.
- Falnes J (2002) *Ocean Waves and Oscillating Systems*. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Falnes J (2007) A review of wave-energy extraction. *Mar Struct* 20:185–201. doi: 10.1016/j.marstruc.2007.09.001
- GEBCO (2014) General Bathymetric Chart of the Oceans. <http://www.gebco.net/>. Accessed 7 May 2017

- Gonzalez-Santamaria R, Zou Q-P, Pan S (2011) The impact of a wave farm on large scale sediment transport. *Ewtec* 2011 2–7.
- Gonzalez-Santamaria R, Zou QP, Pan S (2013) Impacts of a Wave Farm on Waves, Currents and Coastal Morphology in South West England. *Estuaries and Coasts* 38:1–14. doi: 10.1007/s12237-013-9634-z
- Hasselmann K, Barnett TP, Bouws E, Carlson H, Cartwright DE, Enke K, Ewing JA, Gienapp H, Hasselmann DE, Kruseman P, Meerburg A, Muller P, Olbers DJ, Richter K, Sell W, Walden H (1973) Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *DtschHydrogrZ* 8:95.
- Hasselmann S, Hasselmann K, Allender JH, Barnett TP (1985) Computations and Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer in a Gravity-Wave Spectrum. Part II: Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer for Application in Wave Models. *J. Phys. Oceanogr.* 15:1378–1392.
- Holthuijsen LH (2007) *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press, New York
- Johansson M (1986) *Transient Motions of Large Floating Structures*. Göteborg
- Kirby JT, Dalrymple RA (1983) A parabolic equation for the combined refractio-diffraction of Stokes waves by mildly varying topography. *J Fluid Mech Digit Arch*. doi: 10.1017/S0022112083002232
- Komen GJ, Hasselmann K, Hasselmann K, Komen GJ, Hasselmann K, Hasselmann K (1984) On the Existence of a Fully Developed Wind-Sea Spectrum. *J. Phys. Oceanogr.* 14:1271–1285.
- Lusa (2009) Energia: Parque de ondas da Aguçadoura está parado há 4 meses devido a problemas técnicos. <http://noticias.sapo.pt/lusa/artigo/9446395.html>. Accessed 14 Apr 2017
- Millar DL, Smith HCM, Reeve DE (2007) Modelling analysis of the sensitivity of shoreline change to a wave farm. *Ocean Eng* 34:884–901. doi: 10.1016/j.oceaneng.2005.12.014
- Ministerio-de-Fomento (2017) Puertos del Estado. <http://www.puertos.es>. Accessed 10 May 2017
- Newman JN (1978) *Marine Hydrodynamics*. Cambridge, Massachusetts
- Palha A, Mendes L, Fortes CJ, Brito-Melo A, Sarmiento A (2010) The impact of wave energy farms in the shoreline wave climate: Portuguese pilot zone case study using Pelamis energy wave devices. *Renew Energy* 35:62–77. doi: 10.1016/j.renene.2009.05.025
- Paredes GM (2017) *Hydrodynamic Modelling and Power Estimation of Heaving Point Absorber*.
- Pecher A, Kofoed JP (2017) *Handbook of Ocean Wave Energy*. Springer Nature
- Portal-Energia (2016) Projeto Waveroller energia das ondas em Peniche recebe 10 milhões de euros. <https://www.portal-energia.com/projeto-waveroller-energia-das-ondas-peniche-recebe-10-milhoes-euros/>.
- Portal-Energia (2008) Parque de Ondas na Aguçadoura. <http://www.energiasrenovaveis.com/energia-hidrica/energia-das-ondas/parque-de-ondas-da-agucadoura/>. Accessed 27 Mar 2017
- Principle-Power (2015) Windfloat. <http://www.principlepowerinc.com/en/windfloat>. Accessed 29 Apr 2017
- Roberts J, Chang G, Jones C (2015) Wave Energy Converter Effects on Nearshore Wave Propagation. In: 11th European Wave and Tidal Energy Conference. Nantes, pp 4–8
- Roelvink D, Reniers A, van Dongeren A, van Thiel de Vries J, Lescinski J, McCall (2010) XBeach model description and manual. *Unesco-IHE Inst ...* 77.
- Ruehl K, Porter A, Posner A, Roberts J (2013) Development of SNL-SWAN , a Validated Wave Energy Converter Array Modeling Tool.
- Ruehl KM, Chartrand C, Porter A (2015) *SNL-SWAN Manual*. Sandia National Laboratories
- Rusu E, Guedes Soares C (2013) Coastal impact induced by a Pelamis wave farm operating in the

- Portuguese nearshore. *Renew Energy* 58:34–49. doi: 10.1016/j.renene.2013.03.001
- Salter HS (1974) Wave Power. *Nature* 249:720–724. doi: 10.1049/esej:20000303
- Saulnier J-B, Ricci P, Clément AH, Falcão AFDO (2009) Mean Power Output Estimation of WECs in Simulated Sea. *Proc Eighth Eur Wave Tidal Energy Conf* 891–900.
- Shchepetkin AF, McWilliams JC (2003) A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate. *J Geophys Res.* doi: 10.1029/2001JC001047
- Silva FS (2009) Calibração e Validação do Modelo Espectral de Previsão da Agitação Marítima SWAN em Zonas Costeiras. Faculdade de Ciências do Mar e do Ambiente da Universidade do Algarve
- Smith HCM, Millar DL, Reeve DE (2007) Generalisation of wave farm impact assessment on inshore wave climate. In: 7th European Wave and Tidal Energy Conference. Porto, pp 1–7