



INÊS FREITAS CORREIA

Licenciada em Ciências da Engenharia Mecânica

OTIMIZAÇÃO DE UM CONVERSOR HIPERBÁRICO DA ENERGIA DAS ONDAS

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2022

OTIMIZAÇÃO DE UM CONVERSOR HIPERBÁRICO DA ENERGIA DAS ONDAS

INÊS FREITAS CORREIA

Licenciada em Ciências da Engenharia Mecânica

Orientador: Diogo Rúben Castelo Branco das Neves

Doutor, Investigador Responsável INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial

Coorientador: Moisés Gonçalves de Brito

Professor Auxiliar Convidado, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professor Doutor Luís Miguel Chagas Costa Gil

Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

Arguente: Professor Doutor José Manuel Paixão Conde

Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

Vogal: Doutor Diogo Rúben Castelo Branco das Neves

Investigador Responsável - Tecnologias para o Mar do INEGI, Instituto de Inovação e Ciência em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa

Setembro, 2022

Otimização de um conversor hiperbárico da energia das ondas

Copyright © Inês Freitas Correia, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus orientadores, ao Professor Moisés Gonçalves de Brito e ao Doutor Diogo Rúben Castelo Branco das Neves, por toda a disponibilidade e apoio prestado ao longo desta etapa. Desde a motivação na realização do trabalho, até ao esclarecimento das dúvidas mais pontuais, mostraram sempre disponibilidade para ajudar. Agradeço também à Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) pelo fornecimento de todos os recursos necessários à realização desta dissertação.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, por me proporcionarem a oportunidade de estudar na FCT e por todo o apoio, carinho e compreensão em períodos mais difíceis. Deixo um grande agradecimento ao meu namorado, Rui, por toda a paciência, apoio e por ter sido sempre o meu pilar.

Aos meus amigos, dentro e fora da FCT, que me motivaram ao longo deste percurso e me proporcionaram as melhores memórias da minha vida universitária.

Por fim, agradeço ao Professor João M. Lourenço pela disponibilização do template NOVAtesis. Foi uma ajuda essencial na redação da dissertação.

“Na Natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.”
(Antoine-Laurent de Lavoisier.)

RESUMO

Atualmente o ser humano está muito dependente do consumo de energia no seu dia a dia, como tal tem havido um aumento da exploração intensiva dos combustíveis fósseis. A exploração excessiva de fontes de energia não renováveis tem um impacto muito severo no ambiente através das libertações significativas de CO_2 para a atmosfera, que contribuem para o efeito de estufa provocando um aumento na temperatura global da Terra. Desta forma, é urgente criar alternativas sustentáveis de produção de energia recorrendo aos recursos renováveis.

A energia das ondas é um recurso com grande potencial, tendo sido alvo de investimento e evolução científica em vários países. Particularmente, Portugal é um país com elevado potencial para investir neste recurso, visto ter cerca de $8 - 30 \text{ kW/m}$ de potência presentes nas ondas. Do ponto de vista das soluções tecnológicas existem vários dispositivos de conversão da energia das ondas - Wave Energy Converter (WEC), no entanto a não uniformidade das ondas marítimas faz com que este seja um recurso inviável em algumas localizações.

Na presente dissertação estuda-se um dispositivo de conversão hiperbárico da energia das ondas - Wave Energy Hyperbaric Converter (WEHC). Este dispositivo tem como principal vantagem ter um mecanismo de extração de energia emerso com a possibilidade de ser facilmente instalado em estruturas costeiras já existentes. O estudo foi desenvolvido recorrendo a simulações numéricas em agitação regular e irregular. A modelação é feita utilizando o código numérico *DualSPHysics* e variando os parâmetros de simulação com o intuito de perceber quais as condições que tornam o dispositivo mais eficiente.

O trabalho foi desenvolvido tendo em conta os estudos já desenvolvidos por T. Silva 2019, Bernarrdo 2020, e Rodrigues 2021. As simulações foram realizadas utilizando um sistema Power Take-Off (PTO) hidráulico de duplo efeito variando os seguintes parâmetros: altura da onda, período da onda e o peso do dispositivo. Os resultados foram avaliados calculando a eficiência do WEHC e o parâmetro Response Amplitude Operator (RAO).

Palavras-chave: Energia das ondas, Conversor de Energia das Ondas (WEC), Conversor Hiperbárico de Energia das Ondas (WEHC), Response Amplitude Operator (RAO), Sistema Power Take-Off (PTO), Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), DualSPHysics.

ABSTRACT

Nowadays human beings are very dependent on energy consumption in their daily lives, as such, there has been an increase in the intense exploitation of fossil fuels. The over-exploitation of non-renewable energy sources has a very severe impact on the environment through significant releases of CO_2 into the atmosphere, which contribute to the greenhouse effect causing a global increase of the Earth temperature. Therefore, it is urgent to create sustainable alternatives for energy production using renewable resources.

Wave energy is a resource with great potential and has been a target for financial investment and scientific development in several countries. Portugal is a country with potential to invest in this resource, as it has about $8-30\text{ kW/m}$ of power present in the waves. There are various Wave Energy Converter (WEC) devices, however the non-uniformity of the sea waves makes it non-viable in some locations.

The present study is based on a Wave Energy Hyperbaric Converter (WEHC) that has the main advantage of having an emerged energy extraction mechanism that can be easily installed on existing coastal structures. The dissertation was developed using numerical simulations in regular and irregular waves. The modeling is done using the numerical code *DualSPHysics* and varying the simulation parameters in order to understand which conditions make the device more efficient.

The work was developed taking into account the studies already developed by T. Silva 2019, Bernarrdo 2020, and Rodrigues 2021. The simulations were performed using a double-acting hydraulic Power-Take-off system (PTO) varying the following parameters: wave height, wave period and the weight of the device. The results were evaluated by calculating the efficiency of the WEHC and the Response Amplitude Operator (RAO).

Keywords: Wave energy, Wave Energy Converter (WEC), Wave Energy Hyperbaric Converter (WEHC), Response Amplitude Operator (RAO), Power Take-Off System (PTO), Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), DualSPHysics.

ÍNDICE

Índice de Figuras	xvii
Índice de Tabelas	xix
Siglas	xxi
Símbolos	xxiii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento do trabalho	1
1.2 Objetivos e metodologia	3
1.3 Estrutura da dissertação	3
2 Revisão bibliográfica	5
2.1 Conversores da energia das ondas	5
2.1.1 Atenuadores	6
2.1.2 Absorvedores Pontuais	6
2.1.3 Conversores Oscilantes de Translação das Ondas (OWSC)	6
2.1.4 Dispositivos de Coluna de Água Oscilante (CAO)	7
2.1.5 Dispositivos de Galgamento	8
2.1.6 Dispositivos de Diferença de Pressão Submersos	9
2.1.7 Dispositivos <i>Bulge Wave</i>	9
2.1.8 Dispositivos de Rotação de Massa	9
2.2 Funcionamento de um dispositivo WEHC	10
2.2.1 Sistema PTO	11
2.3 Ondas marítimas	13
2.3.1 Caracterização das ondas	14
2.3.2 Potencial das ondas em Portugal	14
3 Modelo numérico	17

3.1	DualSPHysics	17
3.2	Modelo matemático	17
3.2.1	Funções Kernel	18
3.2.2	Equações da dinâmica de fluidos	19
3.2.3	Movimento das partículas	20
3.2.4	Condições de fronteira	20
3.2.5	Interação entre fluido e corpo oscilante	21
3.2.6	Discretização temporal	21
3.2.7	Acoplamento do DualSPHysics com ProjectChrono	23
4	Caso de estudo	25
4.1	Estudos já desenvolvidos	25
4.2	Validação do código numérico	27
4.2.1	Projeto Wavestar	28
4.2.2	Estudo base	28
4.3	Localização do WEHC	32
4.4	Geometria do problema	32
4.4.1	Geometria do canal de simulação	32
4.4.2	Geometria do dispositivo	33
4.5	Parâmetros e condições utilizadas	34
5	Resultados	37
5.1	Simulações em agitação regular	37
5.1.1	Simulações com aumento de peso do WEHC com agitação regular	43
5.2	Simulações em agitação irregular	45
5.2.1	Simulações com aumento de peso do WEHC com agitação irregular	52
6	Conclusões	57
6.1	Conclusões finais	57
6.1.1	Validação do código numérico	57
6.1.2	Simulações com agitação regular	57
6.1.3	Simulações com agitação irregular	58
6.1.4	Simulações com aumento do peso do dispositivo	58
6.2	Sugestões de trabalhos futuros	59
	Bibliografia	61
	Apêndices	
A	Código numérico para tratamento dos resultados em regime regular	65
B	Código numérico para tratamento dos resultados em regime irregular	67

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Consumo de Energia Elétrica em Portugal em percentagem.	2
1.2	Dispositivo WEHC no Porto de Pecém, Brasil (COPPE-UFRJ).	2
2.1	Conversor Pelamis do tipo atenuador (Reis 2015).	6
2.2	Conversor AquaBouy do tipo absorvedor pontual (Grant 2011).	7
2.3	Conversor Oyster do tipo Oscillating Wave Surge Converter (OWSC) (OLEO 2012).	7
2.4	Conversor Coluna de Água Oscilante (CAO) instalado na Ilha do Pico, nos Açores (Noctula 2014).	8
2.5	Conversor de galgamento - <i>TapChan</i> (Les-Pins 2011).	8
2.6	Dispositivo Protótipo Archimedes Wave Swing (AWS) instalado em Viana do Castelo, Portugal (Energias 2009).	9
2.7	Conversor do tipo <i>Bulge Wave</i> (Heller et al. 2010).	10
2.8	Conversor de rotação com efeito giroscópico (Grid 2012).	10
2.9	Esquema de um sistema WEHC (Adaptado de: Garcia-Rosa, Cunha et al. 2009a).	11
2.10	Influência de a) eficiência do PTO e b) redução relativa em % do custo de PTO relativamente ao LCoE para diferentes WECs (Adaptado de: Tetu 2017).	12
2.11	Caracterização de uma onda marítima.	14
2.12	Distribuição mundial do potencial energético das ondas em kW/m (Fonte: “An Overview of Wave Energy Technologies: Status, Performance and Costs,”)	15
2.13	Média do potencial energético das ondas ao longo da costa portuguesa entre 1979 - 2012 (D. Silva et al. 2018).	16
3.1	Aproximação de partículas utilizando o método SPH (C. Wang et al. 2016).	18
4.1	Protótipo do Wavestar, na Dinamarca. Representação de 2 flutuadores (a) e a plataforma de apoio (b) (Ransley et al. 2017).	28
4.2	Modelo à escala 1/5 do WEC <i>Wavestar</i> no laboratório de Plymouth Ocean Wave (Ransley et al. 2017).	29

4.3	Esquema do modelo <i>Wavestar</i> à escala 1/5 com as dimensões em mm (Adaptado de: Windt, Davidson, Ransley et al. 2020).	30
4.4	Localização da implementação do WEHC, Porto de Sines (Adaptado de: Bernardino 2020).	32
4.5	Geometria do canal.	33
4.6	Geometria do dispositivo.	33
5.1	Código do ficheiro <i>xml</i> com os parâmetros do Chrono (PTO de duplo efeito).	38
5.2	Potência obtida para regime regular em função do coeficiente K.	38
5.3	Parâmetros definidos no ficheiro <i>xml</i> para as condições de agitação regular.	39
5.4	Elevação da superfície livre medida a 5 m do flutuador para $T_p = 5\text{ s}$, $H_s = 1.5\text{ m}$ e $H_s = 2.5\text{ m}$.	40
5.5	RAO para $H_s = 1.5\text{ m}$ e $H_s = 2.5\text{ m}$.	40
5.6	Variação da velocidade angular do braço para $T_p = 5\text{ s}$ com $H_s = 1.5\text{ m}$ e $H_s = 2.5\text{ m}$.	42
5.7	Capture Width Ratio (CWR) para $H_s = 1.5\text{ m}$ e $H_s = 2.5\text{ m}$.	42
5.8	Alteração da geometria do dispositivo no código <i>xml</i> .	43
5.9	RAO para $H_s = 1.5\text{ m}$.	44
5.10	CWR para $H_s = 1.5\text{ m}$.	45
5.11	Parâmetros definidos no ficheiro <i>xml</i> para as condições de agitação irregular.	45
5.12	Espectro da onda e do WEHC para $H_s = 1.5\text{ m}$.	46
5.13	Espectro da onda e do WEHC para $H_s = 2.5\text{ m}$.	46
5.14	Curva do RAO para $H_s = 1.5\text{ m}$ e $H_s = 2.5\text{ m}$.	47
5.15	Curva do RAO para $H_s = 1.5\text{ m}$ e $H_s = 2.5\text{ m}$ para o mesmo T_p .	47
5.16	Elevação da superfície livre para ondas $H_s = 1.5$ e 2.5 m e $T_p = 3$ e 6 s .	48
5.17	Velocidade angular do braço para ondas $H_s = 1.5\text{ m}$ e 2.5 m e $T_p = 3\text{ s}$.	49
5.18	Potência extraída para ondas $H_s = 1.5\text{ m}$ e 2.5 m e $T_p = 3\text{ s}$.	49
5.19	(a) Velocidade angular para ondas $H_s = 1.5\text{ m}$ e $T_p = 3\text{ s}$. (b) Potência extraída para ondas $H_s = 1.5\text{ m}$ e $T_p = 3\text{ s}$.	50
5.20	Simulações em <i>ParaView</i> com $H_s = 2.5\text{ m}$ e $T_p = 8\text{ s}$ nos instantes (a) $t = 50\text{ s}$. (b) $t = 100\text{ s}$. (c) $t = 250\text{ s}$. (d) $t = 400\text{ s}$.	51
5.21	Visualização das simulações no software <i>ParaView</i> .	52
5.22	RAO para ondas $H_s = 1.5\text{ m}$ e $T_p = 5\text{ s}$ e $T_p = 10\text{ s}$ com aumento do peso em 30%.	53
5.23	(a) Velocidade angular e (b) Potência extraída para ondas $H_s = 1.5\text{ m}$ e $T_p = 4\text{ s}$ com aumento de peso de 30%.	54

ÍNDICE DE TABELAS

4.1	Propriedades físicas do modelo <i>Wavestar</i> à escala 1/5.	30
4.2	Características das ondas utilizadas.	31
4.3	Coefficientes de amortecimento e rigidez da mola utilizados no estudo. . . .	31
4.4	Parâmetros utilizados nas simulações.	34
5.1	Parâmetros utilizados nas simulações em agitação regular.	39
5.2	Potência média extraída pelo dispositivo para $H_s = 1.5 m$	43
5.3	Potência média extraída pelo dispositivo para $H_s = 2.5 m$	43
5.4	Massas volúmicas utilizadas nas simulações com aumento de peso.	43
5.5	Potência média extraída pelo dispositivo para $H_s = 1.5 m$	44
5.6	Potência média extraída pelo dispositivo.	51
5.7	Potência incidente e CWR.	51
5.8	Potência média extraída e velocidade angular do braço.	54
5.9	Potência média incidente e CWR.	55

SIGLAS

AWS	Archimedes Wave Swing
CAO	Coluna de Água Oscilante
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFL	Condição de Courant-Friedrichs-Lewy
CNWT	CFD-based Numerical Wave Tank
CWR	Capture Width Ratio
LCoE	Levelised Cost of Energy
mDBC	Modified Dynamic Boundary Condition
OWSC	Oscillating Wave Surge Converter
PTO	Power Take-Off
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
RAO	Response Amplitude Operator
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics
SWAN	Simulating Waves Nearshore
WEC	Wave Energy Converter
WEHC	Wave Energy Hyperbaric Converter

SÍMBOLOS

A	amplitude da onda (m)
c_g	celeridade de grupo da onda (m/s)
d	profundidade da onda (m)
$\dot{\theta}$	velocidade angular (rad/s)
ϵ	eficiência do dispositivo
η	elevação da superfície livre da água (m)
f	frequência da onda (Hz)
g	aceleração gravítica (m/s ²)
H	altura de onda (m)
H_s	altura significativa de onda (m)
K	coeficiente de amortecimento (N/m)
λ	comprimento de onda (m)
ρ	massa volúmica (kg/m ³)
S_η	espectro de potência da onda incidente (m ² · s)
$S_{\dot{\theta}}$	espectro de potência do movimento do braço (m ² · s)
T	período de onda (s)
T_p	período de pico de onda (s)

SÍMBOLOS

θ amplitude de movimento do flutuador (°)

$\overline{W}_{in}$ potência média incidente (W)

$\overline{W}_{out}$ potência média extraída (W)

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do trabalho

O consumo de energia pelo Homem tem vindo a aumentar significativamente desde os tempos primórdios até à atualidade. Com as formas de produção de energia a evoluir ao longo dos séculos, o Homem foi capaz de começar a produzir energia através do fogo até à atualidade recorrendo aos combustíveis fósseis. Com o desenvolvimento das sociedades, a utilização do petróleo e dos seus derivados aumentou significativamente tornando-se a fonte primária de energia no mundo. A exploração excessiva destes recursos não renováveis tem um impacto muito severo no ambiente. Desta forma, as libertações significativas de CO₂ para a atmosfera resultantes desta exploração, contribuem para o efeito de estufa provocando um aumento na temperatura global da Terra. Como tal, muitos países têm procurado formas de produção de energia sustentáveis através de recursos renováveis.

Atualmente Portugal está energeticamente mais sustentável, e em 2021 a produção renovável abasteceu 59% do consumo de energia elétrica. A energia eólica representou 26%, seguida da hidroelétrica com 23%, biomassa com 7% e a fotovoltaica com 3,5% (REN, 2022), conforme mostra a Figura 1.1. Apesar de Portugal se destacar por utilizar uma significativa percentagem de recursos renováveis para produzir eletricidade, é visível que é um país que atualmente não utiliza a energia das ondas para produzir energia. A energia das ondas é uma das fontes renováveis com grande potencial para reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Uma particularidade importante das ondas do mar é a elevada disponibilidade de recurso energético em relação às outras formas de energia renovável.

Apesar de não ser um recurso viável em todo o mundo devido à distribuição não uniforme das ondas marítimas, já existem vários planos de implementação com elevado potencial económico. Alguns exemplos de protótipos de conversores de energia das ondas são (representados na secção 2.1): Pelamis e Limpet, no Reino Unido; os Archimedes Wave Swing (AWS), na Holanda e o Coluna de Água Oscilante, (CAO), na Ilha do Pico, Portugal.

Este é um recurso interessante e viável a ser explorado em Portugal, devido à sua costa extensa e com elevada quantidade de energia das ondas.

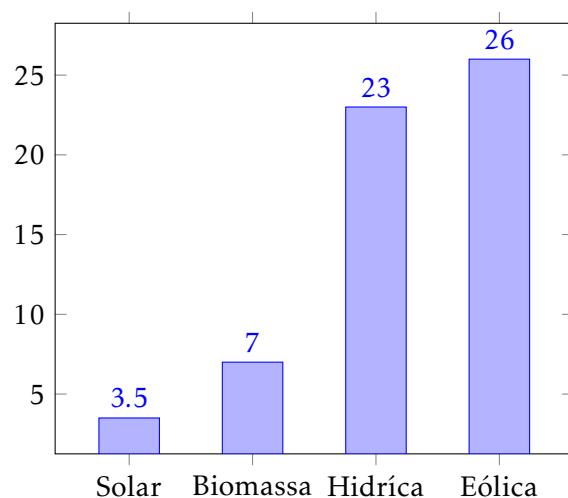


Figura 1.1: Consumo de Energia Elétrica em Portugal em percentagem.

O presente trabalho é baseado no estudo de um dispositivo WEHC (*Wave Energy Hyperbaric Converter*) que já foi estudado, testado e implementado em zonas costeiras. Uma das suas vantagens é o facto do mecanismo de extração de energia estar emerso e poder ser facilmente integrado em estruturas costeiras já existentes. Na Figura 1.2 encontra-se representado o exemplo do dispositivo utilizado neste estudo localizado no Porto de Pecém, no Brasil.

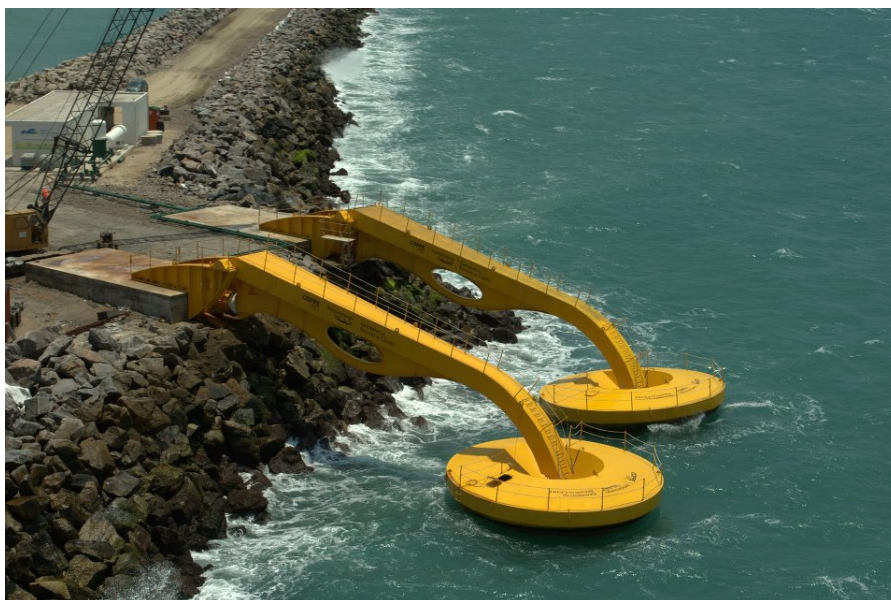


Figura 1.2: Dispositivo WEHC no Porto de Pecém, Brasil (COPPE-UFRJ).

Atualmente ainda não são conhecidas quais as características que otimizam o funcionamento do dispositivo WEHC como o centro de massa, o peso do braço, a geometria e o peso do flutuador. O presente estudo tem como objetivo contribuir para ultrapassar este problema na modelação deste tipo de dispositivos.

1.2 Objetivos e metodologia

O principal objetivo da dissertação é a otimização hidrodinâmica de um conversor hiperbárico de energia das ondas - WEHC. Esta otimização é feita através de um estudo numérico utilizando o método Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH).

A otimização da hidrodinâmica do dispositivo será feita utilizando um sistema *Power Take-Off* (PTO) hidráulico de duplo efeito. O objetivo da utilização deste tipo de sistema é perceber se ao aplicar uma força ao conjunto braço-parede e restringindo o seu movimento é possível otimizar o dispositivo. A otimização do sistema será avaliada calculando a eficiência do dispositivo e o parâmetro *Response Amplitude Operator* (RAO).

Ao longo do estudo serão alterados vários parâmetros com o intuito de perceber quais os que resultam numa eficiência do dispositivo, ϵ , e RAO superiores. Para tal serão feitas simulações para agitação regular e irregular, considerando diferentes períodos e alturas de onda e serão aplicadas diferentes forças ao dispositivo alterando o sistema PTO. O resultado da análise numérica permitirá avaliar três parâmetros fundamentais: a variação do rendimento, a frequência e o rácio da amplitude do movimento.

Seguidamente será feita uma análise aos coeficientes hidrodinâmicos com o intuito de obter uma correlação entre o rendimento máximo e a amplitude de movimento máxima.

Outro objetivo da presente dissertação é o de estudar a aplicabilidade deste dispositivo em Portugal, tendo sido escolhido o Porto de Sines, por apresentar características costeiras semelhantes ao Porto de Pecém.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se dividida em seis capítulos.

O capítulo 1, Introdução, inclui o enquadramento do trabalho, os objetivos, a metodologia adotada e a estrutura da dissertação.

No capítulo 2, Revisão bibliográfica, serão apresentados os tipos de dispositivos existentes de conversão de energia das ondas relevantes para o tema, o funcionamento de um dispositivo WEHC e os seus componentes, e ainda temáticas relevantes sobre as ondas marítimas.

No capítulo 3, Modelo numérico, engloba uma descrição do método SPH e do modelo matemático DualSPHysics.

No capítulo 4, Caso de estudo, é apresentada a validação do código numérico utilizando uma comparação com estudos já realizados.

No capítulo 5, Resultados, será aplicado o modelo numérico e será feita uma discussão e análise dos resultados obtidos nas simulações numéricas.

No capítulo 6, Conclusões, será feita uma análise geral do trabalho realizado e serão propostos possíveis desenvolvimentos do tema para estudos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conversores da energia das ondas

Atualmente existem vários dispositivos de conversão da energia das ondas em eletricidade - WEC. Esta tecnologia, ao longo dos anos, tem sido alvo de estudos científicos e investimento financeiro por apresentar muitas vantagens, podendo ser destacadas as seguintes:

- A água cobre cerca de 70% da superfície terrestre, grande parte da energia armazenada da massa de água terrestre existe sob a forma de ondas;
- Está disponível 24 horas por dia sendo mais previsível que a energia solar e eólica;
- São dispositivos com impacto visual e ambiental reduzido, podendo ser integrados com outras estruturas, como por exemplo molhes e quebra-mares;
- Não requer a construção de grandes infraestruturas em terra comparativamente com as instalações de energia eólica e solar.

No entanto, a percentagem de utilização destes dispositivos é muito baixa devido aos desafios advindos do aproveitamento da energia das ondas. Tais desafios vão desde a capacidade de sobrevivência dos dispositivos a longos períodos no mar até aos custos construção, manutenção e ligação à rede elétrica.

Os dispositivos de conversão de energia das ondas podem ser onshore, nearshore ou offshore. Os dispositivos onshore são costeiros e as suas vantagens baseiam-se na simples instalação e manutenção e não requerem instalações elétricas subaquáticas. Os dispositivos nearshore localizados a uma profundidade tipicamente não superior a 10 metros, e os dispositivos offshore afastados da costa, envolvem uma profundidade superior e maior energia transportada pelas ondas.

Atualmente existem oito tipos de dispositivos WEC (Aqua 2012; EMEC 2012; L. Wang et al. 2018; Whittaker e Folley 2012):

2.1.1 Atenuadores

Um atenuador é um dispositivo habitualmente constituído por múltiplas estruturas flutuantes que se orienta paralelamente à direção da onda. Estes dispositivos captam a energia do movimento relativo de dois braços à medida que a onda os atravessa. O movimento induzido pelas ondas é absorvido por cilindros hidráulicos, que bombeiam fluidos de alta pressão através de motores hidráulicos. O motor hidráulico alimenta geradores elétricos para produzir eletricidade.

Um exemplo desta tecnologia são os dispositivos Pelamis representado na Figura 2.1. É a tecnologia de energia das ondas *offshore* que está mais próxima da implantação em escala. Foi desenvolvido e comercializado por *Pelamis Wave Power Ltd*, foram testados no norte de Portugal na Aguçadora, e neste momento já não estão em instalação.



Figura 2.1: Conversor Pelamis do tipo atenuador (Reis 2015).

2.1.2 Absorvedores Pontuais

Um absorvedor pontual tem uma estrutura flutuante que absorve energia de todas as direções através dos seus movimentos à superfície da água, tendo um movimento ascendente e descendente de acordo com a onda, pode ainda ter uma estrutura completamente submersa. Este tipo de dispositivo converte o movimento da estrutura flutuante em energia elétrica. Dentro deste grupo destacam-se vários dispositivos como o *Wavestar* que será abordado na secção 4.2.1, o *WaveBob* e *AquaBouy* representado na Figura 2.2.

2.1.3 Conversores Oscilantes de Translação das Ondas (OWSC)

Os conversores oscilantes foram concebidos para funcionarem em águas pouco profundas onde a velocidade de onda é predominantemente horizontal. Esta tecnologia consiste na utilização de uma plataforma perpendicular à direção de propagação da onda e acoplada por uma articulação, a uma plataforma fixa no fundo do mar. O movimento



Figura 2.2: Conversor AquaBouy do tipo absorvedor pontual (Grant 2011).

oscilatório semelhante a um pendulo invertido, cria energia cinética nos pistões acoplados na articulação, que é transformada em energia elétrica através de um gerador. Um exemplo de dispositivo que utiliza este tipo de tecnologia é o *Waveroller* e o *Oyster* que está representado na Figura 2.3.

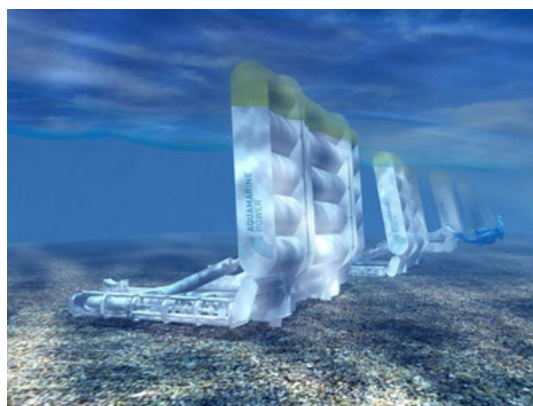


Figura 2.3: Conversor Oyster do tipo OWSC (OLEO 2012).

2.1.4 Dispositivos de Coluna de Água Oscilante (CAO)

A tecnologia mais investigada e frequentemente instalada até à data são os dispositivos CAO. Uma coluna de água oscilante é uma estrutura parcialmente submersa e oca. A estrutura é aberta ao mar abaixo da linha da água, formando uma coluna de ar no topo de uma coluna de água. O movimento das ondas no exterior da estrutura faz subir e descer a coluna de água no interior desta, que por sua vez comprime e descomprime a coluna de ar. Este ar aprisionado induz o movimento de uma turbina, que normalmente tem a capacidade de rodar independente da direção do fluxo de ar. A rotação da turbina é

utilizada para gerar eletricidade.

Foram construídos e testados protótipos de CAO com capacidade instalada na gama de várias dezenas de kW sob condições reais do mar na Noruega, Japão, Reino Unido, Espanha na central de MUTRIKU e Portugal (representado na Figura 2.4).



Figura 2.4: Conversor CAO instalado na Ilha do Pico, nos Açores (Noctula 2014).

2.1.5 Dispositivos de Galgamento

Os dispositivos de galgamento captam água à medida que as ondas entram para um reservatório de armazenamento. A água é então devolvida ao mar através de uma queda de água que origina energia que é usada para fazer rodar uma turbina. O *Wave Dragon* e o *TapChan* (representado na Figura 2.5) são exemplos de dispositivos de galgamento. O *Wave Dragon* difere dos outros tipos de dispositivos em termos de dimensões da conversão hidrodinâmica. O dispositivo consiste numa grande bacia flutuante que acumula o nível da água acima do nível médio do mar, através das ondas que se sobrepõem ao dispositivo.



Figura 2.5: Conversor de galgamento - *TapChan* (Les-Pins 2011).

2.1.6 Dispositivos de Diferença de Pressão Submersos

Os dispositivos funcionam com as diferenças de pressão entre a linha de água e o fundo do oceano e estão tipicamente localizados perto da costa e presos ao fundo do mar. O movimento das ondas provoca a subida e descida do nível da água acima do dispositivo, induzindo um diferencial de pressão no dispositivo. A variação da pressão bombeia o fluido através de um sistema para gerar eletricidade.

Um exemplo de dispositivo que tem este tipo de tecnologia é o AWS constituído por uma quantidade de ar isolado entre duas câmaras cilíndricas. A onda ao passar pelo dispositivo, aumenta a pressão e faz descer a câmara superior comprimindo o ar. Após a passagem da onda, a câmara superior sobe devido à pressão no seu interior ser superior à do exterior. Na Figura 2.6 está representado um protótipo do dispositivo AWS.



Figura 2.6: Dispositivo Protótipo AWS instalado em Viana do Castelo, Portugal (Energias 2009).

2.1.7 Dispositivos *Bulge Wave*

A presente tecnologia consiste num tubo de borracha amarrado ao fundo do mar alinhado com a direção das ondas. A água entra pelo tubo e a passagem da onda, provoca variações de pressão ao longo do comprimento do tubo, criando um "*bulge*" (saliência). À medida que a saliência percorre o tubo, este cresce, criando energia que pode ser utilizada para acionar uma turbina. Na Figura 2.7 está representado um conversor deste tipo assim como o seu movimento.

2.1.8 Dispositivos de Rotação de Massa

Esta tecnologia é baseada na existência de dois tipos de rotação que são utilizados para captar energia através do movimento do dispositivo de elevação e oscilação das ondas (Figura 2.8). Este movimento induz um efeito giroscópico provocando uma mudança do eixo de rotação, e acionando um gerador elétrico no interior do dispositivo. Os disposi-

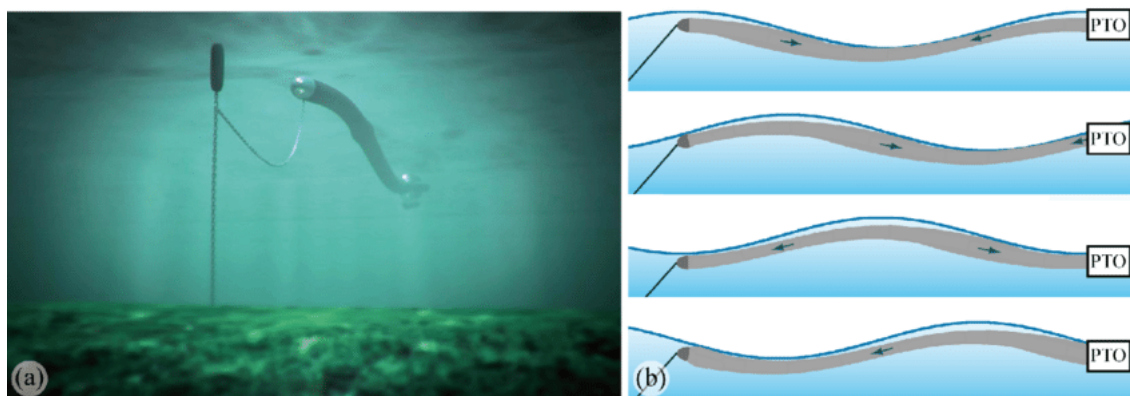


Figura 2.7: Conversor do tipo *Bulge Wave* (Heller et al. 2010).

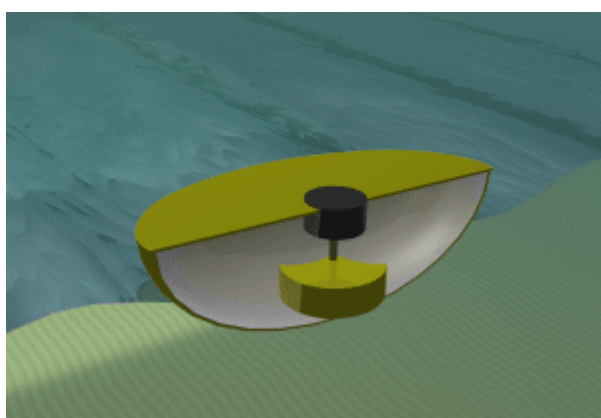


Figura 2.8: Conversor de rotação com efeito giroscópico (Grid 2012).

tivos WEC podem ainda ser classificados quanto à sensibilidade ao alinhamento com a direção das ondas:

- **Pontuais**, quando o seu movimento não depende da direção das ondas;
- **Direcionais**, quando o seu movimento é sensível à direção das ondas.

Todos os dispositivos WEC são compostos por um sistema PTO cuja função é a conversão da energia mecânica proveniente do movimento oscilatório em energia elétrica.

2.2 Funcionamento de um dispositivo WEHC

O presente estudo tem por base um dispositivo WEHC, um conversor do tipo oscilante com uma estrutura flutuante de translação. Cada conversor é constituído por um flutuador ligado a uma bomba hidráulica através de uma estrutura fixa na costa.

O movimento do flutuador, devido à ação das ondas, induz o êmbolo da bomba hidráulica a pressurizar a água doce contida num circuito fechado até à câmara hiperbárica. A câmara hiperbárica tem dois compartimentos para que a água fique isolada do azoto, ambos estão a pressões elevadas constituindo assim o acumulador hidropneumático. Este

último, com várias unidades de bombeamento, armazena a água a altas pressões a fim de injetar um caudal específico, em direção a uma turbina Pelton. A turbina, acoplada ao gerador elétrico, permite a produção de eletricidade.

O sistema foi projetado de acordo com os estudos marinhos para o Porto de Pecém, de forma a ter um valor de pressão e caudal ótimos (Estefen, Esperança et al. 2008).

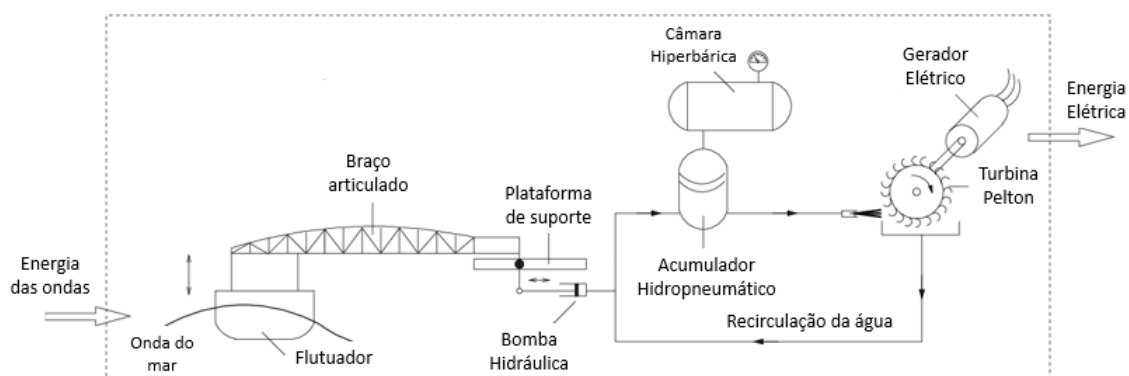


Figura 2.9: Esquema de um sistema WEHC (Adaptado de: Garcia-Rosa, Cunha et al. 2009a).

Idealmente para os dispositivos do tipo oscilante, quando alcançadas as condições ótimas de oscilação, absorvem o máximo de energia das ondas. Para ondas incidentes sinusoidais, a condição de fase ótima verifica-se quando a velocidade do flutuador oscila em fase com a força de excitação da onda. Se a amplitude não for imposta, a condição de amplitude ótima implica que a carga resistiva da força do PTO seja igual ao coeficiente de amortecimento hidrodinâmico da onda incidente (Garcia-Rosa, Cunha et al. 2009a).

2.2.1 Sistema PTO

O sistema PTO de um conversor de energia das ondas é o mecanismo responsável por converter a energia absorvida pelo conversor primário em eletricidade. O conversor primário pode ser qualquer dos dispositivos classificados na secção 2.1. Este sistema é muito importante porque não só afeta diretamente a eficiência da extração de energia, como também contribui para a dinâmica estrutural do conversor de energia das ondas.

O PTO, ao ter influência direta no conversor de energia, tem um impacto direto sobre o custo nivelado de energia (*Levelised Cost of Energy (LCoE)*) e por consequência, influencia diretamente a produção anual de energia. Pela análise da Figura 2.10, de um estudo realizado por Tetu 2017 pela *Partnership for Wave Energy*, na Dinamarca, é visível que tanto para um aumento de eficiência como para uma redução do custo do PTO, existe uma diminuição significativa do custo de energia, LCoE. Nesta análise ambos os parâmetros têm um impacto significativo no LCoE mostrando a importância da otimização do sistema PTO para um conversor de energia das ondas.

Existem vários tipos de sistemas PTO consoante o tipo de conversor WEC utilizado.

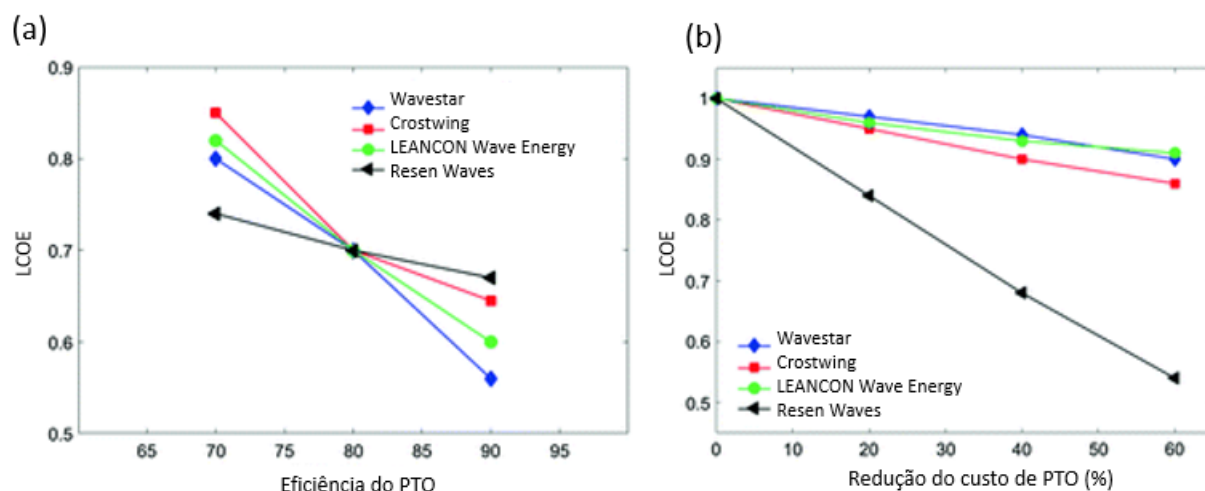


Figura 2.10: Influência de a) eficiência do PTO e b) redução relativa em % do custo de PTO relativamente ao LCoE para diferentes WECs (Adaptado de: Tetu 2017).

Os conversores WEHC têm por base um sistema PTO hidráulico. Este tipo de sistema é adequado para um mecanismo de conversão de energia baseado no movimento de um corpo em resposta à interação com as ondas. Outra vantagem da aplicabilidade do sistema hidráulico a conversores WEHC é a sua capacidade para suportar grandes forças e baixas frequências como é o caso do presente estudo.

Contudo a utilização de um sistema PTO hidráulico para conversão da energia das ondas pode revelar-se preocupante a nível ambiental caso ocorra uma fuga do fluido do sistema hidráulico. Atualmente tem sido utilizado óleo biodegradável nos sistemas PTO hidráulicos para proteger os oceanos de possíveis fugas provenientes deste tipo de conversores (Pecher e Kofoed 2017).

2.2.1.1 Eficiência da conversão de energia

Idealmente os corpos oscilantes absorvem o máximo de energia das ondas quando são alcançadas as condições ótimas de oscilação.

A condição ótima de funcionamento do WEHC é em ressonância, isto é, a velocidade do flutuador oscila em fase com as ondas incidentes. Relativamente à amplitude, a sua condição ótima implica que a força de atrito do sistema PTO seja igual ao coeficiente de amortecimento hidrodinâmico da frequência da onda incidente.

Desta forma, a eficiência do conversor é otimizada alterando as suas características físicas de maneira a potenciar a interação entre a onda e o flutuador. Neste caso é possível adaptar a geometria e massa do conjunto braço-flutuador com o objetivo de criar ressonância do flutuador com as ondas e consequentemente retirar o máximo de energia possível. Outra forma de otimizar o conversor é melhorando o sistema PTO, ou seja, convertendo a energia cinética do flutuador em energia elétrica com máximo de eficiência. A eficiência do dispositivo WEHC será então calculada tendo em conta a potência do

dispositivo, W_{wehc} e a potência da onda, W_{wave} :

$$\epsilon = \frac{W_{wehc}}{W_{wave}} \quad (2.1)$$

Como referido na secção 1.2 será avaliado também o parâmetro RAO dado pela seguinte expressão:

$$RAO = \frac{\theta}{\eta} \quad (2.2)$$

onde θ é a amplitude do movimento e η é a altura da onda incidente.

Contudo, como as ondas variam de acordo com as estações do ano, o funcionamento de um WEC requer a existência de um sistema de controlo. Existem duas técnicas que permitem ter uma resposta ativa à variação da frequência das ondas para agitação regular e irregular (Garcia-Rosa, Cunha et al. 2009a):

- **Controlo reativo:** satisfaz as condições ótimas alterando continuamente a dinâmica do sistema mudando os seus parâmetros.
- **Controlo por travamento:** mantém o conversor numa posição fixa durante períodos específicos de oscilação com o objetivo de obter uma aproximação da condição ótima de fase. Desta forma, o corpo é libertado no momento certo para que oscile em fase com as ondas, aumentando a eficiência do dispositivo como visto anteriormente.

2.3 Ondas marítimas

A propagação e dissipação das ondas oceânicas são um processo complexo que tem sido objeto de desenvolvimento científico ao longo dos anos. A radiação transmitida pelo Sol e as características da superfície terrestre originam gradientes térmicos que provocam a deslocação de camadas de ar atmosféricas que originam os ventos. Os ventos resultantes criam forças que atuam sobre a superfície da água deformando-a. Desta forma, através de um processo envolvendo forças gravíticas e tensão de corte superficial, os ventos originam proporcionalmente à sua intensidade, duração e área de atuação, as ondas marítimas (Dean e Dalrymple 1991).

As ondas marítimas representam uma fonte significativa de energia que se propaga através do movimento oscilatório da água. Há maior geração de ondas marítimas quando ocorrem tempestades no mar, devido à intensidade, duração e área de atuação. Deste modo, as ondas dissipam-se e fundem-se com outras de maior energia, podendo haver até cem vezes mais energia disponível num campo de ondas com interação de vários tipos de ondas do que num estado de mar caracterizado por um único tipo de onda (Isaacs et al. 1976).

A ondulação de maior energia, com um período e amplitudes elevadas são denominadas de *swell*. Estas ondas perdem muito pouca energia, e em águas profundas têm tipicamente comprimentos de onda de 100-500 m (Falnes 2007).

2.3.1 Caracterização das ondas

As ondas marítimas podem ser sinusoidais, bidimensionais (movem-se num único plano) ou transversais (propagam-se perpendicularmente ao movimento) que se propagam num meio homogéneo. As principais grandezas elementares para definir uma onda sinusoidal é o comprimento de onda λ , o período T , e a amplitude, A . Na Figura 2.11 estão esquematizados estes parâmetros utilizando o respetivo sistema de coordenadas cartesianas por se tratar de uma onda transversal. O eixo x é paralelo ao nível médio da água, o eixo z tem a sua origem coincidente com a superfície da água na ausência de ondas e a profundidade da onda está representada por d .

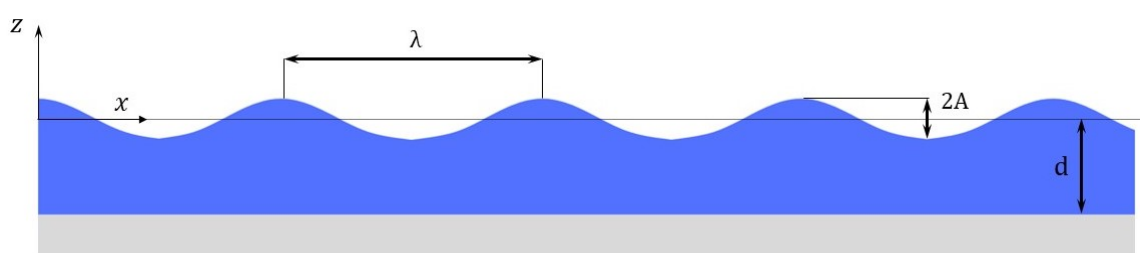


Figura 2.11: Caracterização de uma onda marítima.

Outro parâmetro importante é a velocidade da onda designada por celeridade, c que está relacionado com a distância, L a que se move a onda num determinado período, T :

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

2.3.2 Potencial das ondas em Portugal

A energia das ondas tem particular interesse para países com grandes faixas costeiras ou ilhas, pelo que países que satisfazem as condições geográficas necessárias elegeram a energia das ondas em programas de apoio governamentais ou em instituições de investigação e desenvolvimento. Reconhece-se que a latitude do local influencia diretamente a potencia média das ondas destacando-se zonas com latitudes entre os 40° e 60°. Através da Figura 2.12 é visível que a Europa Ocidental, o Canada, os Estados Unidos, o Sul da Austrália e da América do Sul apresentam altos valores energéticos por metro de frente de onda.

Portugal é considerado um país com localização geográfica privilegiada para o potencial de aproveitamento da energia das ondas. O maior potencial do recurso encontra-se na costa noroeste e centro de Portugal continental, ao largo das localidades como Aljezur, Sines, Cascais, Peniche, Nazaré, Figueira da Foz, Aveiro, Leixões e Viana do Castelo. As ondas mais a norte têm uma energia máxima superior à verificada nas regiões do centro. Contudo mais a norte, a energia difere mais significativamente entre o Verão e o Inverno, do que nas regiões centro, onde a ondulação é mais constante ao longo do ano.

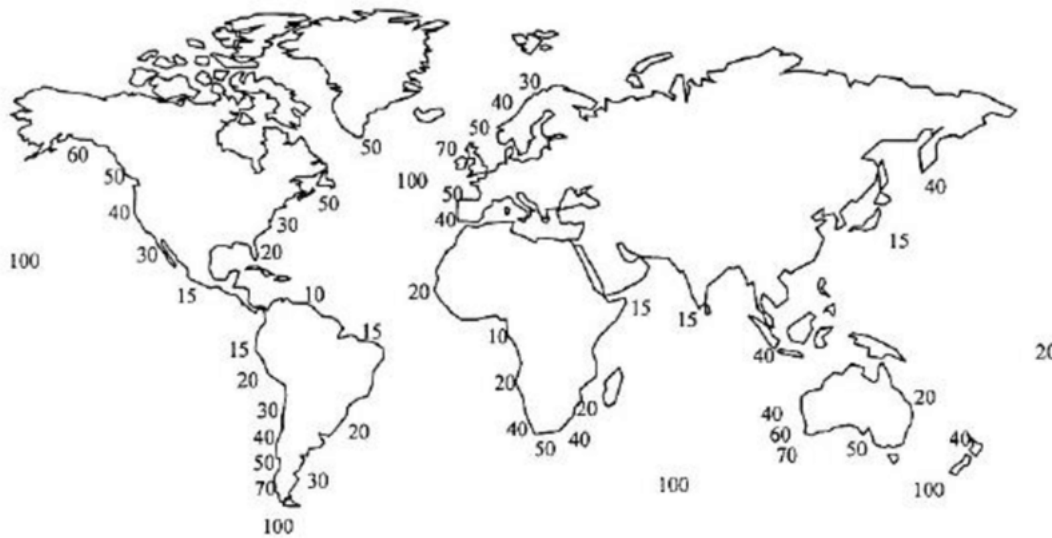


Figura 2.12: Distribuição mundial do potencial energético das ondas em kW/m (Fonte: “An Overview of Wave Energy Technologies: Status, Performance and Costs,”)

Através de um estudo realizado, ao longo da costa portuguesa, durante 33 anos (1979-2012) foi possível estimar e avaliar o potencial energético das ondas. O estudo foi baseado num sistema de dois modelos de ondas espectrais, o modelo WWIII (WAVEWATCHI) para gerar as ondas e o modelo Simulating Waves Nearshore (SWAN) para transformá-las nas zonas costeiras. A avaliação foi feita através do estudo do comportamento espacial e temporal utilizando diferentes escalas temporais tendo em conta a variabilidade climática das ondas. Na Figura 2.13 é visível que o potencial da energia das ondas ao longo da costa portuguesa varia muito entre as estações do ano. O Inverno é a estação do ano com o maior potencial de energia das ondas com uma média de $38.8kW/m$, seguido do Outono com $20.3kW/m$, depois a Primavera com um potencial médio de $18.9kW/m$ e por fim o Verão com $6.4kW/m$ (D. Silva et al. 2018).

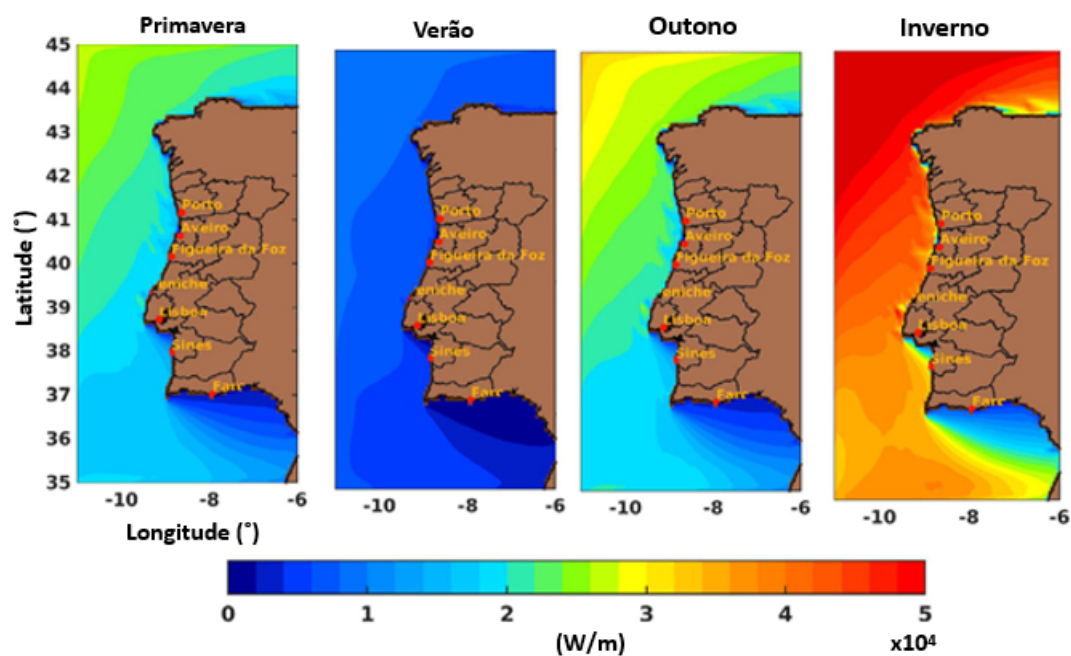


Figura 2.13: Média do potencial energético das ondas ao longo da costa portuguesa entre 1979 - 2012 (D. Silva et al. 2018).

MODELO NUMÉRICO

3.1 DualSPHysics

O DualSPHysics utiliza o método SPH para aplicações de dinâmica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics (CFD)). Este método destaca-se por não necessitar de recorrer à discretização de uma malha de cálculo, contrariamente ao que acontece com softwares convencionais de CFD como o *Ansys Fluent* ou *OpenFOAM*.

O DualSPHysics é um código open-source baseado no método *Smoothed Particle Hydrodynamics* usado para simulações de escoamentos de superfícies livres baseado num conjunto de nós distribuídos arbitrariamente, onde as partículas representam o fluxo, interagem com as estruturas e podem apresentar grandes deformações com fronteiras móveis.

O método SPH foi desenvolvido por Lucy 1977, Gingold e J. J. Monaghan 1977, inicialmente para simular problemas em Astrofísica revelando-se um método robusto e adequado para problemas físicos mais complexos. Destaca-se por o seu domínio de simulação não ser definido por uma malha, mas sim por um conjunto de partículas. As quantidades físicas de cada partícula, como posição, velocidade, densidade e pressão são aproximadas, e podem ser alteradas com o tempo. Estas alterações das propriedades físicas justificam-se pelas interações com os nós vizinhos e pelo facto de estas partículas moverem-se com o fluido de uma forma Lagrangiana (Canelas et al. 2018).

3.2 Modelo matemático

O domínio de cálculo do método SPH baseia-se na discretização das equações de Navier-Stokes e de continuidade para cada partícula do domínio de simulação, de acordo com as propriedades físicas das partículas em redor. A contribuição das partículas mais próximas é ponderada de acordo com uma função de distância com um comprimento frequente designado como h . Esta função denomina-se por função de *kernel* de interpolação.

O princípio matemático fundamental deste método é baseado em integrais de interpolação em que cada função F é calculada por:

$$F(r) = \int F(r')W(r-r',h)dr' \quad (3.1)$$

onde W é o kernel de interpolação, r é o vetor posição, r' é o vetor posição onde a função é definida e h é a dimensão do domínio de partículas que integram o kernel de interpolação. A função F pode ser expressa na forma discreta como a soma realizada sobre todas as partículas dentro da zona de suporte do kernel:

$$F(r_a) \approx \sum F(r_b)W(r_a-r_b,h)\frac{m_b}{\rho_b} \quad (3.2)$$

onde o índice a representa uma partícula individual e o índice b as partículas vizinhas. O volume associado às partículas vizinhas é $\frac{m_b}{\rho_b}$, com m e ρ sendo a massa e a massa volúmica, respetivamente (Altomare et al. 2015).

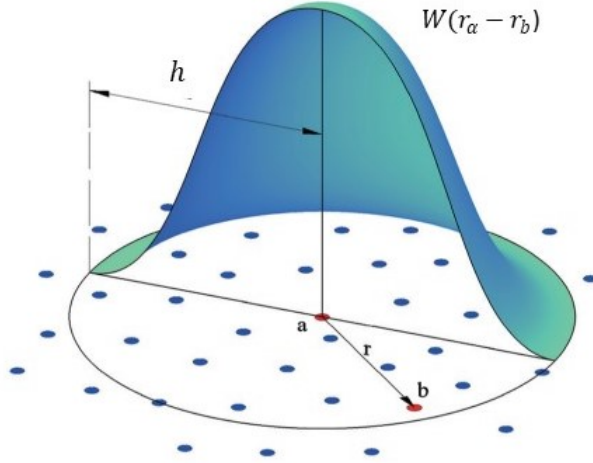


Figura 3.1: Aproximação de partículas utilizando o método SPH (C. Wang et al. 2016).

3.2.1 Funções Kernel

As funções de kernel a serem utilizadas influenciam fortemente a eficiência do método SPH pois é um método com uma aproximação baseada em partículas espalhadas pelo domínio como visto anteriormente. Um kernel é definido em função da distância adimensional entre partículas. Atualmente existem duas funções kernel implementadas:

1. Cubic Spline

$$W(r,h) = \alpha_D \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}q^2 + \frac{3}{4}q^3, & 0 \leq q \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2-q)^3, & 1 < q \leq 2 \\ 0, & q > 2 \end{cases} \quad (3.3)$$

onde $\alpha_D = \frac{10}{7\pi h^2}$ para simulações bidimensionais e $\alpha_D = \frac{1}{\pi h^3}$ para simulações tridimensionais, $q = \frac{r}{h}$ onde r é a distância entre duas partículas e h é denominado

smoothing length e controla a dimensão da área/volume à volta das partículas a serem consideradas.

2. Wendland Quintic

$$W(r, h) = \alpha_D \begin{cases} (1 - \frac{q}{2})^4(2q + 1), & 0 \leq q \leq 2 \\ 0, & q > 2 \end{cases} \quad (3.4)$$

onde $\alpha_D = \frac{7}{4\pi h^2}$ para simulações bidimensionais e $\alpha_D = \frac{21}{16\pi h^3}$ para simulações tridimensionais (C. Wang et al. 2016).

3.2.2 Equações da dinâmica de fluidos

A equação da conservação da quantidade de movimento proposta por Monaghan (1992) foi utilizada para determinar a aceleração de uma partícula (a) em interação com uma partícula vizinha (b):

$$\frac{dv_a}{dt} = - \sum_b m_b \left(\frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W_{ab} + g \quad (3.5)$$

onde v_a , P_a , ρ_a , P_b e ρ_b são respetivamente, o vetor de velocidade, a pressão e a massa volúmica da partícula a, pressão e a massa volúmica da partícula b. g é a aceleração gravítica, W_{ab} é a função de kernel que depende da distância entre as partículas a e b. Π_{ab} é o termo de viscosidade dado por:

$$\Pi_{ab} = \begin{cases} \left(\frac{-a\overline{c_{ab}}\mu_{ab}}{\rho_{ab}} \right), & v_{ab} \cdot r_{ab} < 0 \\ 0, & v_{ab} \cdot r_{ab} > 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

onde,

$$\mu_{ab} = \frac{h v_{ab} \cdot r_{ab}}{(r_{ab})^2 + \eta^2} \quad (3.7)$$

onde $r_{ab} = r_a - r_b$, $v_{ab} = v_a - v_b$ são respetivamente a posição e velocidade das partículas a e b, $\overline{c_{ab}} = 0,5(c_a + c_b)$ é a velocidade média do som, $\eta^2 = 0,01h^2$ e α são os coeficientes que evitam a divergência numérica quando a distância entre as partículas tende para 0. De acordo com dados experimentais já obtidos, um valor de $\alpha = 0,01$ corresponde a uma boa validação da propagação das ondas em canais (Altomare et al. 2015).

No método SPH a massa de cada partícula é constante, mas as alterações na massa volúmica do fluido são significativas e são calculadas recorrendo à equação da conservação da massa dada por:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b v_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (3.8)$$

Tendo em conta que em simulações utilizando o método SPH o fluido é considerado fracamente compressível, a pressão é calculada a partir dos valores da massa volúmica da partícula, utilizando uma equação de estado dada por:

$$P = B \left[\frac{\rho}{\rho_0}^\lambda - 1 \right] \quad (3.9)$$

sendo a constante B igual a:

$$B = \frac{(c_0)^2 \rho_0}{\lambda} \quad (3.10)$$

onde a constante politrópica é igual a $\lambda = 7$, a massa volúmica da água igual a $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$. A velocidade do som no fluido para a massa volúmica de referência, é definida por:

$$c_0 = c(\rho_0) = \sqrt{\left. \frac{\delta P}{\delta \rho} \right|_{\rho_0}} \quad (3.11)$$

3.2.3 Movimento das partículas

Como visto anteriormente, o método SPH destaca-se por o seu domínio de simulação ser definido por um conjunto de partículas. As partículas são movimentadas de acordo com o método proposto por J. J. Monaghan 1989, denominado de XSPH. O objetivo é que as partículas se movam a uma velocidade similar à média da velocidade das partículas vizinhas. Desta maneira, evita-se que duas ou mais partículas com diferentes velocidades ocupem a mesma posição. As partículas movem-se então de acordo com:

$$\frac{dr_a}{dt} = v_a + \epsilon \sum_b \frac{m_b}{\bar{\rho}_{ab}} v_{ba} W_{ab} \quad (3.12)$$

onde ϵ representa um parâmetro específico do problema que pode variar entre 0 e 1 e $\bar{\rho}_{ab} = \frac{1}{2}(\rho_a + \rho_b)$ (Crespo et al. 2015).

3.2.4 Condições de fronteira

Um dos aspetos importantes ao utilizar o método SPH é definir as condições de fronteira. Para tal, existe um método pré-definido no DualSPHysics denominado de condição de fronteira dinâmica (Modified Dynamic Boundary Condition (mDBC)). Neste método, as condições de fronteira são descritas por um conjunto de partículas que são consideradas como um conjunto semelhante ao fluido, mas separado das partículas do fluido. As partículas de fronteira são consideradas como partículas de fluido, isto é, satisfazem as equações da dinâmica dos fluidos (equações 3.5 e 3.8). As partículas de fronteira não se movem de acordo com as forças exercidas pelas partículas de fluido sobre elas, ou seja, permanecem numa posição fixa ou movem-se de acordo com uma função de movimento que seja imposta. Uma vantagem do mDBC é a sua simplicidade computacional uma vez que o cálculo das partículas de fronteira é feito dentro do mesmo intervalo que as partículas do fluido, diminuindo consideravelmente o tempo computacional (Brito et al. 2020).

3.2.5 Interação entre fluido e corpo oscilante

O código DualSPHysics é indicado para simular o movimento de um objeto considerando a sua interação com as partículas de fluido e as forças que nele exercem, através da soma das contribuições das forças de um corpo inteiro. Tendo em conta que o corpo é rígido, a força resultante de cada partícula na fronteira é obtida através da soma das contribuições das forças de cada partícula de fluido circundante, de acordo com a respetiva função kernel. Cada partícula k , na fronteira possui uma força por unidade de massa dada por:

$$f_k = \sum_{a \in PL} f_{ka} \quad (3.13)$$

onde PL refere-se à partícula de fluido e f_{ka} é a força por unidade de massa exercida por uma partícula de fluido a , sobre a partícula de fronteira k , dada por:

$$m_k f_{ka} = -m_a f_{ak} \quad (3.14)$$

Para o movimento do corpo flutuante podem ser utilizadas as equações de movimento de um corpo rígido:

$$M \frac{dV}{dt} = \sum_{k \in PF} m_k f_k \quad (3.15)$$

$$I \frac{d\Omega}{dt} = \sum_{k \in PF} m_k (r_k - R_0) \times f_k \quad (3.16)$$

onde PF refere-se às partículas da fronteira, M é a massa do corpo, I é o momento de inércia, V é o vetor velocidade, Ω é o vetor velocidade angular e R_0 é a posição do centro de massa do corpo. As equações 3.15 e 3.16 são integradas em ordem ao tempo com o intuito de prever V e Ω antes do início do passo do tempo seguinte. Cada partícula da fronteira do corpo tem uma velocidade dada por:

$$u_k = V + \Omega \times (r_k - R_0) \quad (3.17)$$

De acordo com o trabalho realizado por Monaghan e J J. 1992 e J. J. Monaghan et al. 2012, esta técnica permite conservação do momento angular e linear.

3.2.6 Discretização temporal

O DualSPHysics é composto por dois esquemas de integração numérica temporal, *Verlet* e *Symplectic*. Com o propósito de simplificar a representação destes esquemas, as equações da quantidade de movimento (equação 3.5), da conservação da massa (equação 3.8) e da variação da posição das partículas (equação 3.12) são simplificadas respetivamente por:

$$\frac{dv_a}{dt} = F_a \quad (3.18)$$

$$\frac{d\rho_a}{dt} = D_a \quad (3.19)$$

$$\frac{dr_a}{dt} = v_a \quad (3.20)$$

onde v_a pode também incluir uma correção XSPH quando estas equações são integradas no tempo, utilizando o esquema *Verlet* ou o *Symplectic*.

3.2.6.1 Esquema Verlet

O esquema Verlet é baseado no método comum de Verlet 1967 e está dividido em duas fases: previsão e correção. A principal vantagem é o seu baixo esforço computacional comparativamente a outros esquemas, principalmente por não requerer múltiplos cálculos no mesmo passo de tempo. Na primeira fase (previsão) as quantidades físicas são calculadas da seguinte maneira:

$$v_a^{n+1} = v_a^{n-1} + 2\Delta t F_a^n \quad (3.21)$$

$$\rho_a^{n+1} = \rho_a^{n-1} + 2\Delta t D_a^n \quad (3.22)$$

$$r_a^{n+1} = r_a^n + \Delta t V_a^n + \frac{\Delta t^2}{2} F_a^n \quad (3.23)$$

onde Δt é o passo de tempo, n é o tempo de cálculo, F_a e D_a são calculados utilizando as equações 3.5 e 3.8. A segunda fase (correção) é utilizada quando cada passo de tempo, N_s atinge um determinado valor (normalmente $N_s \approx 50$) e as quantidades físicas são dadas por:

$$v_a^{n+1} = v_a^n \Delta t F_a^n \quad (3.24)$$

$$\rho_a^{n+1} = \rho_a^n + \Delta t D_a^n \quad (3.25)$$

$$r_a^{n+1} = r_a^n + \Delta t V_a^n + \frac{\Delta t^2}{2} F_a^n \quad (3.26)$$

Esta segunda fase foi concebida com o intuito de impedir a divergência dos valores integrados ao longo do tempo, uma vez que as equações não estão acopladas.

Nas situações em que é utilizado o esquema Verlet, mas não se consegue atingir a estabilidade numérica, pode ser viável aumentar a frequência da aplicação da segunda fase deste esquema, ou seja diminuir N_s . Contudo se a frequência ultrapassar valores de $N_s > 10$ o esquema *Verlet* pode não ser adequado à simulação em causa e será preferível a utilização do esquema *Symplectic*.

3.2.6.2 Esquema Symplectic

Os algoritmos de integração *Symplectic* na ausência de efeitos viscosos e de atrito, são reversíveis no tempo (Leimkuhlert et al. 1996). Os algoritmos permitem também preservar as características geométricas que resultam numa melhor resolução do comportamento da solução a longo prazo. Este esquema é caracterizado por ser de segunda ordem e envolve duas fases, a de previsão e a de correção. Durante a fase de previsão

os valores da aceleração e massa volúmica são estimados a meio do passo temporal de acordo com:

$$r_a^{n+\frac{1}{2}} = r_a^n + \frac{\Delta t}{2} v_a^n \quad (3.27)$$

$$\rho_a^{n+\frac{1}{2}} = \rho_a^n + \frac{\Delta t}{2} D_a^n \quad (3.28)$$

Durante a fase de correção é utilizado o termo $\frac{dv_a^{n+\frac{1}{2}}}{dt}$ para calcular a velocidade corrigida e de seguida é calculada a posição das partículas no fim do passo temporal de acordo com:

$$v_a^{n+1} = v_a^{n+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{2} F_a^{n+\frac{1}{2}} \quad (3.29)$$

$$r_a^{n+1} = r_a^{n+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{2} v_a^{n+1} \quad (3.30)$$

Por fim o valor corrigido da massa volúmica é calculado por $\frac{d\rho_a^{n+1}}{dt} = D_a^{n+1}$ utilizando os novos valores de v_a^{n+1} e r_a^{n+1} .

3.2.6.3 Passo temporal variável

No DualSPHysics os esquemas de integração temporal *Verlet* e *Symplectic* são definidos de acordo com a Condição de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), um critério utilizado para a estabilidade dos esquemas numéricos. O passo de tempo utilizado é de extrema importância para garantir os melhores resultados possíveis, como tal vai depender da condição CFL, dos termos de difusão viscosa e dos termos forçados.

O passo temporal variável Δt , é calculado da seguinte forma:

$$\Delta t = 0.3 \min(\Delta t_f, \Delta t_{cv}) \quad (3.31)$$

onde,

$$\Delta t_f = \min_a \left(\sqrt{\frac{h}{|f_a|}} \right) \quad (3.32)$$

$$\Delta t_{cv} = \min_a \frac{h}{c_s + \max_b \left| \frac{h_{vab} \cdot r_{ab}}{r_{ab}^2 + \eta^2} \right|} \quad (3.33)$$

onde Δt_f é o passo temporal calculado com base na força por unidade de massa, $|f_a|$ e Δt_{cv} é o passo de tempo calculado através da condição CFL, usando a condição viscosa c_s (Crespo et al. 2015).

3.2.7 Acoplamento do DualSPHysics com ProjectChrono

Com o intuito de ter em conta as restrições mecânicas aplicadas ao dispositivo WEHC é utilizado um acoplamento *DualSPHysics-ProjectChrono*. O acoplamento permite a resolução de sistemas que envolvem vários corpos ligados com um grande número de constrangimentos mecânicos. De acordo com Brito et al. 2020, a resolução deste tipo de sistemas é feita através de seis coordenadas distintas denominadas de coordenadas

generalizadas. Estas coordenadas envolvem coordenadas de translação e rotação que definem completamente a localização e orientação de cada corpo no sistema. Desta forma o *ProjectChrono* restringe apenas o movimento de rotação do conjunto braço-flutuador, articulado com uma estrutura rígida costeira, em torno de um eixo.

Para a realização estudo de um WEHC, é necessário definir uma relação que restrinja o movimento do conjunto braço-flutuador, mas que limita o movimento a apenas um grau de liberdade. Desta forma, é possível concluir que a utilização do *ProjectChrono* é essencial para o presente trabalho, pois permite a simulação precisa da geometria do WEHC permitindo a rotação apenas em torno de um eixo.

CASO DE ESTUDO

4.1 Estudos já desenvolvidos

O Laboratório de Tecnologia Oceânica da unidade COPPE (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia), da Universidade Federal do Rio de Janeiro, tem vindo a trabalhar desde 2001, em questões diretamente relacionadas com as energias renováveis marítimas, com ênfase na conversão da energia das ondas em eletricidade. Foi no contexto deste estudo que Estefen, Roberto Da Costa et al. 2007, iniciaram o estudo do conversor hiperbárico, com o intuito de instalar um dispositivo de extração de energia das ondas no porto de Pecém, no Brasil. Os testes experimentais foram feitos com um modelo do WEHC de escala 1/6.5 no LabOcean, COPPE. Os estudos foram realizados em agitação regular com ondas de 1.2 m de altura e 5.5 s de período, para diferentes valores de pressão. Foram utilizadas as pressões nominais de 600 psi e 1000 psi verificando-se uma melhor performance do dispositivo para a pressão nominal de 600 psi. O estudo também forneceu informações sobre a eficiência do dispositivo. Em média, foi obtido um parâmetro de eficiência de 35%. Outra importante conclusão está relacionada com a forma do flutuador, é recomendado a utilização de flutuadores circulares, desta forma o dispositivo tem um comportamento mais regular devido à sua capacidade de manter a resposta uniforme para diferentes direções de onda.

Estefen, Esperança et al. 2008, realizaram outro estudo onde foi considerado um modelo de escala 1/10 e uma pressão de 500 psi na câmara hiperbárica. Foram ainda simuladas alturas de ondas de 1.2 m, 1.6 m, 2.0 m e 2.4 m associadas a períodos de onda de 6.5 s, 7.5 s e 8.5 s. A maior potência gerada foi obtida para uma altura de onda de 2.4 m e período de 6.5 s e a potência mais baixa foi obtida para uma altura de 1.2 m e período de 6.5 s. A média do parâmetro de eficiência foi de 31% para o período de onda 6,5 s e 22% para 8,5 s. Os resultados evidenciaram que a potência gerada aumenta significativamente com o aumento da altura de onda. Desta forma os autores confirmaram a forte dependência da energia gerada em relação às condições de onda disponíveis e às condições de agitação existentes no local de instalação do WEC. Paralelamente ao estudo experimental foi feito um estudo numérico, sendo que a abordagem teórica demonstrou

ser eficaz para a avaliação da energia gerada. Em média, as simulações numéricas do dispositivo, em relação a energia gerada, são 11% mais baixas em comparação com os resultados teóricos. Esta diferença foi justificada pela dificuldade de incorporar as perdas mecânicas nos modelos a escala reduzida, e por isso a simulação numérica provou ser uma ferramenta importante para estimar o desempenho do conversor para diferentes condições de agitação.

Um ano mais tarde Garcia-Rosa, Cunha et al. 2009b, resolveram a equação do movimento do flutuador e foram abordadas as condições para a absorção máxima de energia. Concluíram que para cada altura de onda, existe um valor de pressão da câmara hiperbárica que aumenta a energia extraída das ondas. Visto que o valor da pressão na câmara do sistema é constante, estes resultados podem ser utilizados para selecionar a pressão e o diâmetro do pistão da bomba adequados às condições de instalação. Para trabalhos futuros, os autores propuseram comparar os resultados numéricos com os ensaios experimentais e o desenvolvimento de um algoritmo de controlo por travamento quando existe desfasamento entre a boia e a onda.

Mais tarde Garcia-Rosa, Machado et al. 2010, desenvolveram o trabalho anterior através da descrição e desenvolvimento dos subsistemas principais do conversor e do modelo não-linear da dinâmica da turbina e do acumulador. Concluíram que quanto maior o volume da câmara e do acumulador, menor é a flutuação apresentada em variáveis como a potência elétrica gerada pelo conversor e a potencia mecânica. Os autores acreditam que o modelo desenvolvido poderá ser útil no dimensionamento dos equipamentos, principalmente do conjunto câmara-acumulador, aquando da execução do projeto.

Ainda no mesmo ano, Farid Estefen et al. 2010, desenvolveram um protótipo à escala real de modo a demonstrar o conceito desenvolvido de acordo com as condições de agitação da instalação. Através do desenvolvimento estrutural foi possível obter os dados necessários para a realização dos desenhos técnicos dos componentes e as suas fabricações.

Finalmente Estefen, Garcia-Rosa et al. 2012, desenvolveram um protótipo real com dois módulos de bombeamento com uma unidade de geração elétrica com uma potência aparente de 125kVA e procederam à instalação do dispositivo no Porto de Pecém no Brasil.

T. Silva 2019, começou por estudar a aplicabilidade da construção do dispositivo em Portugal. Estudou a agitação da costa portuguesa chegando à conclusão de que o dispositivo apresentava um comportamento aceitável para uma altura e período de onda igual a 1.5 m e 10 s, respetivamente. Efetuou também um estudo sobre a influência da massa do flutuador na dinâmica do dispositivo, concluindo que esta não tem grande impacto no seu movimento. Seguidamente estudou o comportamento do WEHC sobre a influência do coeficiente de amortecimento do PTO. Concluiu que se não existir pressão no sistema PTO, o flutuador fica praticamente em fase com o movimento das ondas impossibilitando a extração de energia através do sistema PTO. Assim chegou à conclusão de que o sistema PTO é não-linear e tem uma capacidade de extração máxima de energia para um intervalo

de $0.5 \leq p_c \leq 1 \text{ MPa}$ associada a um $CWR \approx 0.37$.

Bernardo 2020, continuou a estudar a possibilidade de instalar um WEHC em Portugal concluindo que o Porto de Sines é um local adequado, por ter um molhe para a instalação do dispositivo e características semelhantes ao Porto de Pecém. O estudo centrou-se na caracterização do WEHC com e sem sistema PTO, e também no estudo da influência que a parede do molhe tem na hidrodinâmica do WEHC. Foram realizadas simulações no código DualSPHysics com uma geometria do modelo numérico desenvolvida pelo autor. Para simulações sem o sistema PTO e de geometria simples verificou-se a existência de um pico de amplitude de movimento do flutuador que surgiu na frequência de aproximadamente 0.15 Hz , indicando a frequência de ressonância do dispositivo com as ondas. Este pico observou-se sempre nas frequências próximas de 0.15 Hz para todas as alturas de onda introduzidas. No caso das simulações sem PTO, mas com alteração da parede do molhe, verificou-se que o RAO dependia fortemente da reflexão de onda na parede concluindo que o rendimento do dispositivo pode ser regulado com alterações do molhe ou na geometria do dispositivo. O estudo do sistema com PTO baseou-se na alteração do coeficiente de amortecimento. Os resultados permitem visualizar a evolução da potência, do coeficiente K (função da pressão na bomba) e rendimento consoante as alterações de período e altura de onda.

Mais recentemente Rodrigues 2021, fez um estudo numérico do comportamento do WEHC utilizando o método SPH em agitação irregular com o intuito de originar uma condição de funcionamento mais realista. As simulações foram realizadas sem e com sistema PTO para períodos entre 7 e 11 s e a altura significativa de onda entre 2 e 2.5 m. Para o sistema sem momentos reativos, ou seja, com rotação livre na ligação braço-parade (sem PTO) e para diferentes ângulos do braço do WEHC, verificou-se um pico entre 0.15 Hz e 0.17 Hz . Concluiu-se que esta era uma zona importante, pois o dispositivo entra em ressonância com as ondas, aumentando, assim a sua amplitude de movimento. Verificou-se ainda um aumento do RAO para alturas de onda maiores. Para o sistema com PTO foi utilizado um coeficiente de amortecimento, $K = 400 \text{ KN}$ que corresponde à zona ótima para as diversas condições de agitação. Observou-se que, mantendo o período de pico constante, um aumento da altura significativa da onda, provocava um aumento da potência média extraída. Pela análise do CWR o autor concluiu ainda que, apesar da potência incidente ser superior quando o período de pico e a altura significativa eram maiores, o dispositivo não era capaz de extrair tão eficazmente a potência disponível resultando num CWR inferior.

4.2 Validação do código numérico

Com o intuito de validar o código numérico DualSPHysics utilizaram-se os resultados numéricos e experimentais de Windt, Davidson, Ransley et al. 2020. Atualmente não existe nenhuma bibliografia que contemple um caso igual a este estudo para validar o dispositivo em questão. Contudo o Projeto *Wavestar* é semelhante ao presente caso de

estudo e a melhor implementação de um WEC podendo ser aplicado a um conversor hiperbárico.

4.2.1 Projeto Wavestar

O projeto *Wavestar* foi proposto pela primeira vez em 2000 por Neils e Keld Hansen e tornou-se num dos líderes mundiais na tecnologia da energia das ondas (Kramer et al. 2011). O *Wavestar* é um WEC do tipo absorvedor pontual com um sistema PTO idêntico ao WEHC descrito na secção 2.2. O funcionamento deste dispositivo é muito semelhante ao WEHC exposto neste estudo, contudo o *Wavestar* encontra-se instalado numa plataforma própria podendo ser instalado em zonas mais afastadas da costa. Outra característica deste dispositivo é a possibilidade da sua plataforma ser elevada para manutenção ou em condições marítimas agrestes (Figura 4.1). Durante a última década foram realizadas

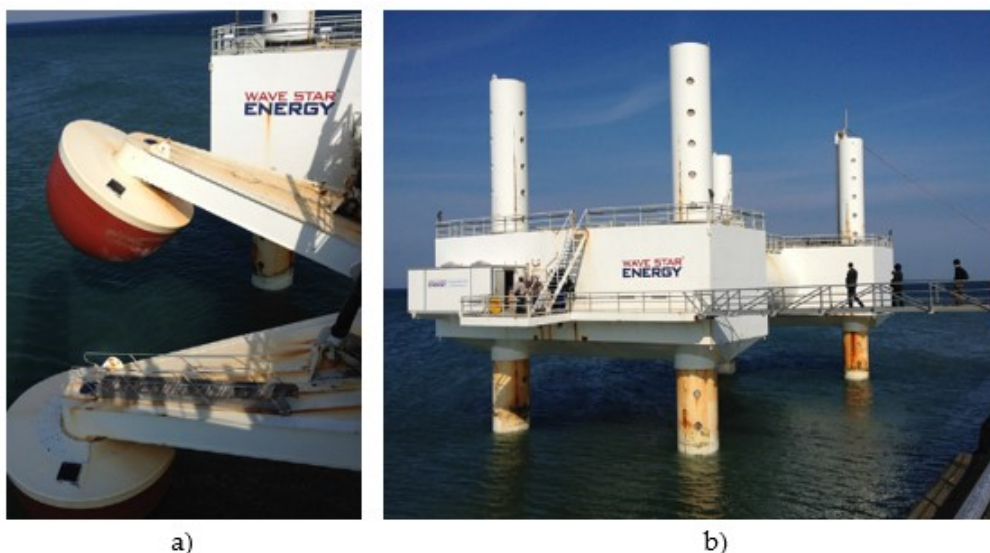


Figura 4.1: Protótipo do Wavestar, na Dinamarca. Representação de 2 flutuadores (a) e a plataforma de apoio (b) (Ransley et al. 2017).

várias experiências e testes no mar com modelos a escalas reduzidas ($1/4$ e $1/10$), com o objetivo de analisar as diferentes conceções do dispositivo. Em 2009 foi instalado um modelo à escala de $1/2$ com uma potência de 600 KW (Rusu e Onea 2017), no mar em Nisum Bredning na Dinamarca, que tem estado em funcionamento desde então e ligado à rede de eletricidade desde 2010 (Marquis et al. 2010).

4.2.2 Estudo base

O projeto *Wavestar* conta com alguns testes experimentais, um dos quais realizados num modelo à escala $1/5$ do WEC (Figura 4.2) apresentados por Jakobsen et al. 2016. Estes ensaios experimentais são particularmente uteis para validar modelos CFD-based

Numerical Wave Tank (CNWT) pelas seguintes razões (Windt, Davidson, Ransley et al. 2020):

- São analisados os dados de pressão do dispositivo;
- A escala utilizada de 1/5 é maior do que a maioria dos estudos experimentais, permitindo obter efeitos hidráulicos e de turbulência mais realistas comparativamente a um dispositivo à escala real;
- O sistema PTO hidráulico funciona em diferentes condições: sem amortecimento, com amortecimento e em controlo reativo.

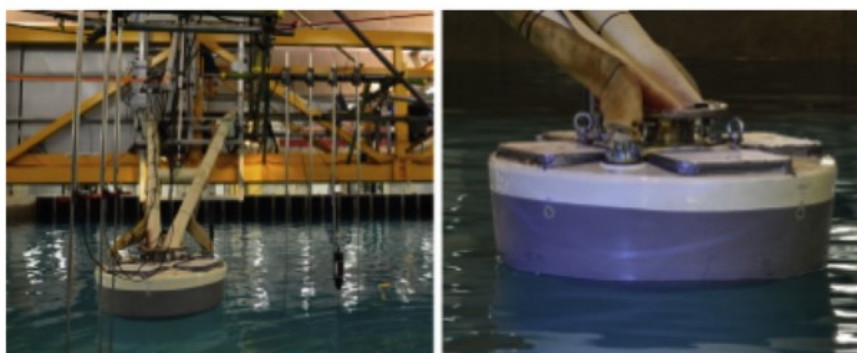


Figura 4.2: Modelo à escala 1/5 do WEC *Wavestar* no laboratório de Plymouth Ocean Wave (Ransley et al. 2017).

Ransley et al. 2017, realizaram ensaios experimentais com vista a validar um modelo CNWT para corpos fixos e em movimento livre sem coeficiente de amortecimento. Windt, Davidson, Akram et al. 2018, validaram diferentes métodos de movimento em malhas dinâmicas utilizando o *OpenFOAM*, através da simulação dos testes de decaimento livre no projeto *Wavestar*.

Mais recentemente Windt, Davidson, Ransley et al. 2020, continuou o trabalho desenvolvido por Ransley et al. 2017, e por Windt, Davidson, Akram et al. 2018, mas considerando os casos em que o sistema PTO hidráulico está restringido por um coeficiente de amortecimento. As propriedades físicas utilizadas no modelo à escala 1/5 por Windt, Davidson, Ransley et al. 2020, estão representadas na Tabela 4.1 e as suas características geométricas na Figura 4.3.

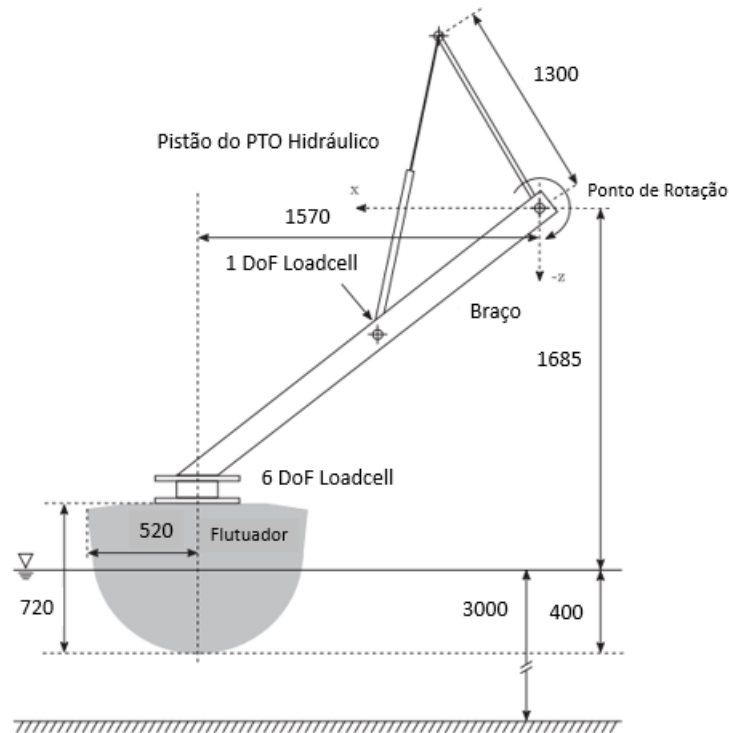
4.2.2.1 Ensaios experimentais

Foram feitos vários estudos experimentais para validar o caso de estudo em questão, cada um deles considerando diferentes tipos de ondas. Foram realizados vários testes ao longo do estudo:

1. Apenas com ondas, sem a utilização do WEC no tanque;

Tabela 4.1: Propriedades físicas do modelo *Wavestar* à escala 1/5.

Massa (braço e flutuador)	220kg
Inércia	124kg · m ²
Centro de Massa x	1.3954m
Centro de Massa y	0.0m
Centro de Massa z	-1.3305m
Submersão	0.4m
Profundidade da água	3m

Figura 4.3: Esquema do modelo *Wavestar* à escala 1/5 com as dimensões em mm (Adaptado de: Windt, Davidson, Ransley et al. 2020).

2. Com a difração de ondas, com o *Wavestar* fixo;
3. Com radiação de ondas, num tanque sem ondas de *input* e com o movimento do WEC impulsionado por uma força PTO sinusoidal;
4. *Wavestar* com o sistema PTO em funcionamento.

Para o objetivo desta dissertação considerou-se apenas os testes realizados com o WEC com o sistema PTO. Foram considerados quatro estados de agitação com ondas de diferentes características, designados de MS01, MS02, MS03 e MS04, com as características apresentadas na Tabela 4.2. Foram utilizados diferentes valores de amortecimento, D_{exp} de intensidade igual a 0, 50, 100 e 200 N · m · s (Windt, Davidson, Ransley et al. 2020).

Tabela 4.2: Características das ondas utilizadas.

	MS01	MS02	MS03	MS04
Altura de onda (m)	0.1	0.15	0.25	0.25
Período de onda (s)	1.4	1.4	1.45	2.8

4.2.2.2 Ensaios numéricos

O CNWT foi implementado utilizando o código open source *OpenFOAM*, recorrendo ao método numérico Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) para descrever as equações de conservação de massa e momento utilizando o método de volumes finitos.

A força do PTO foi modelada como um sistema linear de amortecedor de molas definido através da seguinte equação:

$$F_{PTO}(t) = D_{num} \cdot v_{PTO}(t) + K_{num} \cdot x_{PTO}(t) \quad (4.1)$$

onde $D_{num} \cdot v_{PTO}(t)$ representa o amortecimento linear aplicado ao WEC através do cilindro hidráulico, $K_{num} \cdot x_{PTO}(t)$ descreve a força reativa aplicada através do cilindro. Os valores utilizados para os coeficientes de amortecimento e rigidez da mola estão representados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Coeficientes de amortecimento e rigidez da mola utilizados no estudo.

$D_{exp}[N \cdot m \cdot s]$	$D_{num}[N \cdot m \cdot s^{-1}]$	$K_{num}[N \cdot m \cdot s^{-1}]$
0	0	-2350
50	1750	2250
100	3500	6850
200	7000	16050

A geração e absorção de ondas foi feita através de uma zona de relaxação que visa a dissipação das ondas. A geração de ondas foi também feita com recurso a condições de fronteira na zona do *inlet*.

Contrariamente ao método utilizado na presente dissertação (método SPH), os cálculos numéricos do artigo em estudo, são baseados numa malha, com diferentes níveis de precisão. Para diminuir o esforço computacional, as simulações foram feitas com recurso a um plano de simetria que divide o modelo ao meio, e com uma malha com um número total de elementos a variar entre 8×10^5 e 3×10^6 .

4.2.2.3 Conclusões

Analisando os resultados obtidos do estudo foi possível concluir que a dinâmica do sistema que foi configurado experimentalmente pode ser mais precisa utilizando um amortecimento linear aplicado ao WEC.

Em termos gerais foram obtidos resultados concordantes entre todos os testes realizados. Foi calculado um erro relativo médio de 11%. Contudo, tendo em conta as

simplificações feitas no CNWT, o modelo *Wavestar* apresentado é considerado, em geral, validado.

4.3 Localização do WEHC

Como referido na secção 1.2 um dos objetivos do presente trabalho é estudar a aplicabilidade da implementação do dispositivo WEHC no Porto de Sines, no molhe representado na Figura 4.4 por uma seta vermelha. A escolha desta localização para a instalação do dispositivo foi feita com base no estudo feito por Bernarrdo 2020, que concluiu ser um sítio com condições semelhantes às encontradas no Porto do Pecém no Brasil.

O Porto de Sines é composto por vários molhes que podem suportar alguns WEHCs. Uma das vantagens deste porto é a sua profundidade relativamente elevada que evita a dissipação das ondas marítimas. Outra vantagem é este ser um local pouco exposto à agitação marítima adversa evitando a danificação do dispositivo.



Figura 4.4: Localização da implementação do WEHC, Porto de Sines (Adaptado de: Bernarrdo 2020).

4.4 Geometria do problema

4.4.1 Geometria do canal de simulação

No seguimento do trabalho desenvolvido por Bernardo 2020, e por Rodrigues 2021, concluiu-se que o canal deveria ter um comprimento que permitisse o desenvolvimento das ondas em toda a sua extensão, de forma que as ondas se desenvolvam antes de chegar ao dispositivo, tendo em conta os períodos de onda elevados. Para manter este critério, Brito et al. 2020 sugerem um comprimento para o canal igual a $3 \times L$, sendo L o comprimento da onda. Desta maneira a distância entre o batedor (onde se forma a onda)

e o dispositivo é três vezes superior à distância entre as cristas de duas ondas, garantindo assim que as ondas têm espaço para se desenvolverem até chegar ao dispositivo. As dimensões gerais do canal encontram-se representadas na Figura 4.5.

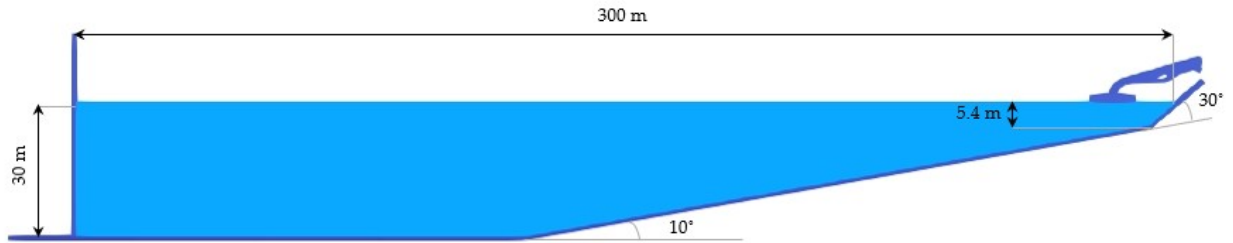


Figura 4.5: Geometria do canal.

4.4.2 Geometria do dispositivo

Para o desenvolvimento da geometria do dispositivo seguiu-se o trabalho desenvolvido por Bernarrdo 2020, que teve como exemplo as dimensões gerais do protótipo instalado no Porto de Pecém. A geometria utilizada foi relativamente simples por terem sido feitas simulações em duas dimensões. Visto que o código utilizado não contempla deformação mecânica dos corpos, apenas foram contempladas as dimensões funcionais do dispositivo, ou seja as dimensões do flutuador e a distância do ponto de rotação do braço ao flutuador, representadas na Figura 4.6. Outro fator importante a considerar é a submersão do dispositivo, projetada para 0.5 m. Tendo em conta que um dos objetivos do presente estudo é estudar a influência da alteração do peso do dispositivo, e visto que sendo simulações em duas dimensões, não existe massa dos corpos, foram alteradas as massas volúmicas do braço e do flutuador. Neste sentido, as massas volúmicas utilizadas inicialmente foram de 160 kg/m^3 para o flutuador e 300 kg/m^3 para o braço.

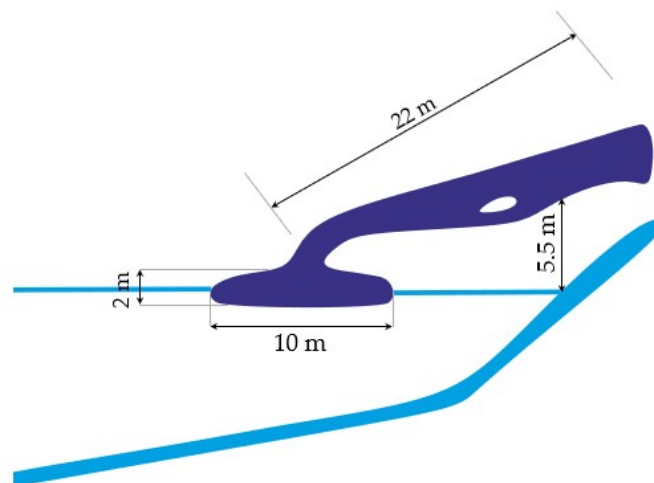


Figura 4.6: Geometria do dispositivo.

Tabela 4.4: Parâmetros utilizados nas simulações.

dp	$0.2m$
SavePosDouble	0
StepAlgorithm	Symplectic
Kernel	Wendland
ViscoTreatment	Artificial
Viscosity	0.01
ViscoBoundFactor	0
Shifting	none
ShiftCoef	-2.0
ShiftTFS	1.5
RigidAlgorithm	CHRONO
FtPause	0.0
CoefDtMin	0.05
#DtIni	0.0001
#DtMin	0.00001
DtAllParticles	Only fluid/floating
TimeMax	300s
TimeOut	0.05s
PartsOutMax	1.0
RhopOutMin	$700(kg/m^3)$
RhopOutMax	$1300(kg/m^3)$

4.5 Parâmetros e condições utilizadas

Seguindo o objetivo principal do presente estudo, a otimização de um conversor hiperbárico, houve necessidade de comparar as diversas simulações feitas mantendo constantes os parâmetros utilizados. Os parâmetros foram devidamente estudados e desenvolvidos por T. Silva 2019, e Bernarrdo 2020, e validados na secção 4.2. Na Tabela 4.4 estão representados os parâmetros utilizados nas simulações.

As simulações foram realizadas para agitação regular e irregular. Foram utilizadas alturas de onda de 1.5 e 2.5 m para períodos de onda entre 3 e 12 s. Finalizada cada simulação recorreu-se às ferramentas do DualSPHysics com o intuito de otimizar as simulações criando ficheiros onde é possível fazer a análise do comportamento do flutuador. O procedimento para a análise dos dados baseou-se na criação dos seguintes ficheiros:

- *FloatingInfo.csv* com todos os dados de posição, velocidade e rotação do corpo especificado, segundo os eixos x, y e z ;
- *MeasureTool.csv* que contém a elevação da superfície livre da água, nas coordenadas definidas num ficheiro *.txt* com a precisão desejada para cada espaço de tempo definido;
- *Particles.vtk* que contém todas as partículas que compõem o problema e permitem visualizar o movimento do flutuador e do braço no *software ParaView*;

- Código *Python* para ler os ficheiros *.csv* e analisar os dados obtidos.

RESULTADOS

5.1 Simulações em agitação regular

Inicialmente estudou-se a dinâmica do WEHC em agitação regular, sendo que todas as simulações foram feitas com o sistema PTO, ou seja, o dispositivo tem forças externas aplicadas com momentos reativos aplicados na ligação braço-parede. Foi utilizado um sistema PTO de duplo efeito, isto significa que a bomba hidráulica do sistema é de duplo efeito, isto é, aplica força sob o fluido (água contida no circuito fechado) quando o flutuador está a subir e a descer. Desta forma, a bomba aplica força ao bombear água a alta pressão para o reservatório hiperbárico (movimento ascendente do flutuador) e aplica força ao encher com água à pressão atmosférica (movimento descendente do flutuador).

Contudo a biblioteca Chrono integrada no DualSPHysics não tem a possibilidade de modelar uma força tão complexa como esta, pois o Chrono está limitado à aplicação de forças de restituição da posição inicial e de amortecimento. Como tal Bernarrdo 2020, procedeu à alteração do *software* de forma a alterar o modo como as forças impostas em elementos de ligação entre corpos rígidos funcionam, adicionando uma *hinge* (dobradiça). Desta forma, e desprezando as forças viscosas e as forças de atrito, foi possível inserir forças de restituição de amortecimento, que correspondem a uma mola de torção e a um amortecedor (dobradiça). A mola exerce força em função da distância relativamente à posição de repouso, e o amortecedor em função da velocidade de rotação.

Na Figura 5.1 está representado o código *xml* utilizado para definir os parâmetros do Chrono, onde estão definidos vários parâmetros como as coordenadas do ponto de rotação e o momento exercido pela mola de torção com coeficiente $K=400000$ N/m.

```

<chrono>
  <savadata value="0.05" comment="Saves CSV with data exchange for each time interval (0=all steps)" />
  <bodyfixed id="Fundo" mkbound="0" />
  <bodyfloating id="Braco" mkbound="2" />
  <bodyfloating id="Flutuador" mkbound="3" />
  <link_spheric idbody1="Flutuador" idbody2="Braco">
    <rotpoint x="247" y="0.0" z="31.62" comment="Point for rotation" />
    <stiffness value="0" comment="Torsional stiffness [N/rad]" />
    <damping value="0" comment="Torsional damping [-]" />
  </link_spheric>
  <link_hinge idbody1="Braco" idbody2="Fundo">
    <rotpoint x="266.38" y="0.0" z="39.30" comment="Point for rotation" />
    <rotvector x="0.0" y="1.0" z="0.0" comment="Vector direction for rotation" />
    <stiffness value="0.0" comment="Torsional stiffness [N/rad]" />
    <damping value="400000.0" comment="Torsional damping [-]" />
  </link_hinge>
</chrono>

```

Figura 5.1: Código do ficheiro *xml* com os parâmetros do Chrono (PTO de duplo efeito).

A partir do trabalho desenvolvido por Bernarrdo 2020, foi possível concluir uma zona ótima de funcionamento do sistema PTO consoante o estado da agitação marítima. Recorrendo aos dados obtidos pelo autor foi possível criar as curvas representadas na Figura 5.2 utilizando as condições de agitação marítimas mais comuns na costa portuguesa ($T = 7\text{ s}$ com $H = 2\text{ m}$ e $T = 9\text{ s}$ com $H = 2\text{ m}$). É de notar que as curvas foram obtidas para agitação regular o que nunca corresponderá à situação real, logo a zona ótima visível no gráfico vai-se alterando ao longo do tempo. Concluiu-se que o pico de potência acontece para um valor $K \approx 400\text{ KN/m}$. As simulações realizadas têm como objetivo analisar a resposta

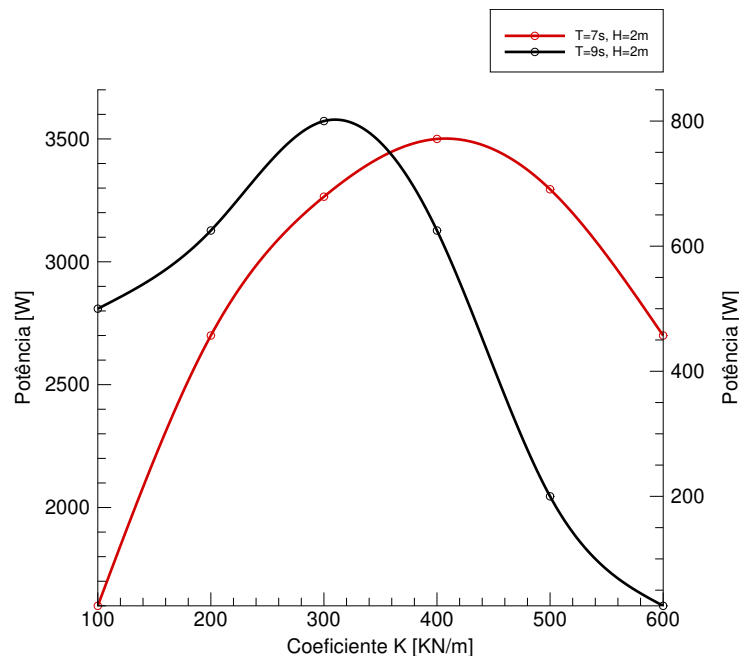


Figura 5.2: Potência obtida para regime regular em função do coeficiente K.

do sistema a diferentes frequências e alturas de onda. Para tal foram efetuadas diversas simulações com condições de agitação representadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Parâmetros utilizados nas simulações em agitação regular.

Parâmetros	Valores
Altura de onda, H	1.5 m, 2.5 m
Período de onda, T	3 s a 12 s (intervalos de 1 s)
Alteração geometria	Aumento do peso em 30%
Coefficiente K	400 KN/m

Todas as simulações foram realizadas num computador equipado CPU Intel i7-4790 3.60 GHz, uma GPU Nvidia GeForce RTX 2070 de 32 GB de memória RAM. Numa primeira fase simularam-se ondas de 2.5 m de altura e períodos entre 3 s e 12 s com uma distância entre partículas, d_p 0.2 m. Seguidamente repetiu-se o mesmo procedimento, mas para ondas de 1.5 m de altura. Finalmente aumentou-se o peso do conjunto em cerca de 30% e repetiram-se todas as simulações descritas anteriormente.

Na Figura 5.3 estão representados os parâmetros de simulação no ficheiro *xml* para ondas marítimas regulares com período de onda (*wave period*) igual a 3 s e altura de onda (*wave height*) de 1.5 m. Está definido ainda a profundidade do fluido (*depth*) igual a 30 m.

```

<piston>
  <mkbound value="1" comment="Mk-Bound of selected particles" />
  <waveorder value="2" comment="Order wave generation 1:1st order, 2:2nd order (def=1)" />
  <start value="0" comment="Start time (def=0)" />
  <duration value="0" comment="Movement duration, Zero is the end of simulation (def=0)" />
  <depth value="30" comment="Fluid depth (def=0)" />
  <pistondir x="1" y="0" z="0" comment="Movement direction (def=(1,0,0))" />
  <waveheight value="1.5" comment="Wave height" />
  <waveperiod value="3.0" comment="Wave period" />
  <phase value="0" comment="Initial wave phase in function of PI (def=0)" />
  <ramp value="1" comment="Periods of ramp (def=0)" />
  <savemotion periods="20" periodsteps="20" xpos="6.0" zpos="-0.26" comment="Saves motion data.
  xpos and zpos are optional. zpos=-depth of the measuring point" />
</piston>

```

Figura 5.3: Parâmetros definidos no ficheiro *xml* para as condições de agitação regular.

Com o intuito de verificar que as ondas simuladas estavam a ser formadas corretamente, foram medidas ao longo do canal as alturas da onda em três pontos diferentes. Na Figura 5.4 está representada a elevação da superfície livre para o período de pico, T_p de 5 s e alturas significativas, H_s de 1.5 m e 2.5 m. Observa-se como esperado, que as ondas se encontram estabilizadas, e que para alturas significativas de onda, a amplitude de elevação da superfície livre é ligeiramente superior.

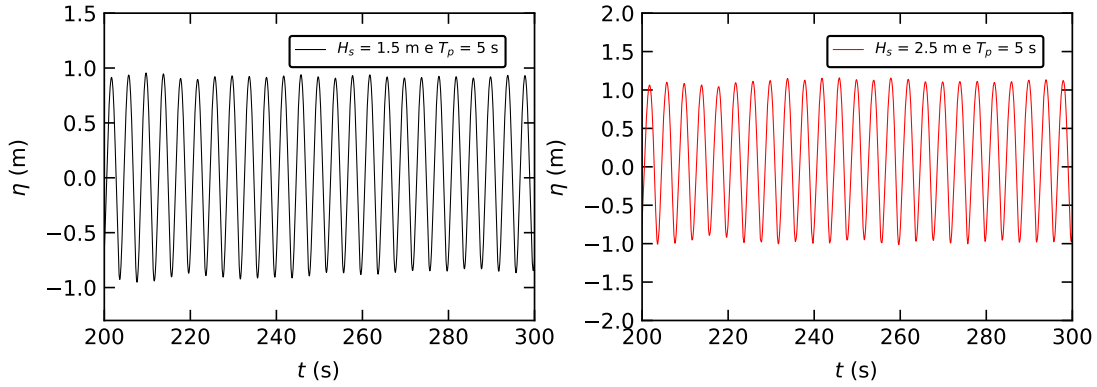


Figura 5.4: Elevação da superfície livre medida a 5 m do flutuador para $T_p = 5\text{ s}$, $H_s = 1.5\text{ m}$ e $H_s = 2.5\text{ m}$.

Como referido anteriormente, de forma a estudar da melhor forma o comportamento do dispositivo, calculou-se o parâmetro RAO da seguinte forma:

$$RAO = \frac{\text{Amplitude do flutuador}}{\text{Altura de onda}} = \frac{\theta}{H} \quad (5.1)$$

Para o cálculo da amplitude do flutuador considerou-se: $\theta = |\theta_{mx} - \theta_{min}|$ e recorreu-se ao código *Python* apresentado no Apêndice A de forma a obter valores mais precisos.

Na Figura 5.5 apresenta-se o gráfico do RAO em função do período de onda, para ondas com 1.5 m e 2.5 m de altura. Cada ponto azul e vermelho nas curvas, corresponde aos períodos de onda definidos na tabela 5.1. Analisando as duas curvas da Figura 5.5,

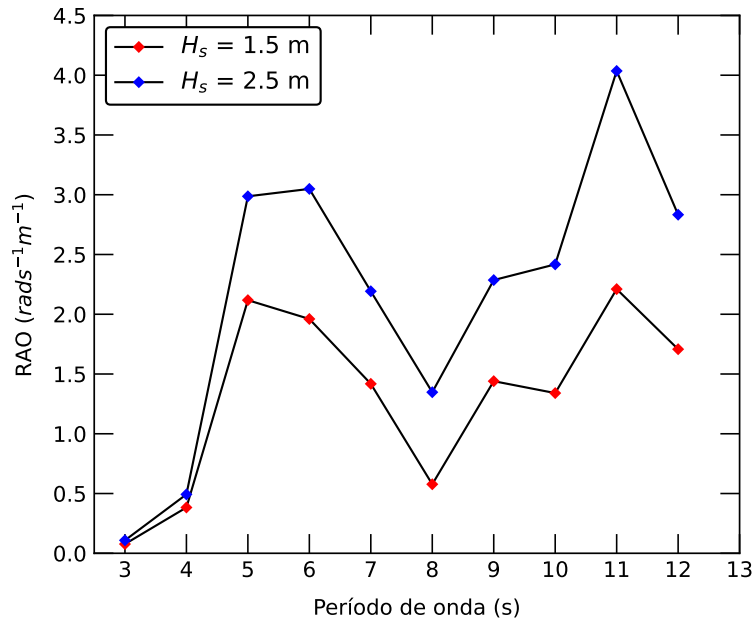


Figura 5.5: RAO para $H_s = 1.5\text{ m}$ e $H_s = 2.5\text{ m}$.

observa-se que existem dois picos que se destacam, para cada altura. Estes períodos de pico correspondem ao $T_p = 5\text{ s}$ e $T_p = 11\text{ s}$ com frequências iguais a $f = 0.2\text{ Hz}$ e $f = 0.09\text{ Hz}$,

respetivamente. Isto significa que existe uma densidade de energia maior nas ondas para uma frequência de 0.2 Hz e 0.09 Hz correspondendo a uma zona onde o dispositivo tem uma amplitude maior, sendo vantajoso mantê-lo nestas frequências de modo que a produção de energia seja maximizada. Observa-se ainda que para um aumento da altura de onda H_s , há um aumento percentual de cerca de 39% do parâmetro RAO.

A eficiência do dispositivo foi também avaliada para os diferentes parâmetros utilizados. O cálculo do parâmetro CWR é uma forma apropriada para calcular esta eficiência e é definido pelo rácio entre a potência extraída média, $\overline{W}_{out}$ e a potência incidente média, $\overline{W}_{in}$ (Budar 1975)

$$CWR = \frac{\overline{W}_{out}}{\overline{W}_{in}} \quad (5.2)$$

Segundo a teoria linear, para ondas regulares unidireccionais, a potência incidente média é dada por:

$$\overline{W}_{in} = \frac{1}{8} \rho g H^2 c_g \quad (5.3)$$

onde $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ e c_g é a celeridade de grupo da onda. Para uma profundidade de água intermédia, c_g é dado por:

$$c_g = \frac{\omega}{2k} \left(1 + \frac{2kh}{\sin 2kh} \right) \quad (5.4)$$

Onde $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular da onda, f é a frequência da onda e k é dado pela relação de dispersão $\omega^2 = gk \tanh kh$.

A potência extraída média é determinada por:

$$\overline{W}_{out} = K | \dot{\theta} | \quad (5.5)$$

onde $\dot{\theta}$ é a velocidade angular do braço segundo o eixo y e K o momento aplicado. Esta potência não corresponde à potência elétrica efetiva no dispositivo, correspondendo apenas à potência mecânica disponível no ponto de rotação do braço. Este resultado não contempla ainda perdas por atrito, perdas na bomba volumétrica ou perdas de carga nas tubagens de todo o circuito.

Como observado na equação 5.5 a potência extraída depende diretamente da velocidade angular do braço, sendo então relevante analisá-la. Na Figura 5.6 observa-se que para alturas de ondas superiores, a velocidade angular do braço é cerca de 8% superior, tal como esperado visto estarmos a submeter o dispositivo a uma amplitude e energia de onda superior.

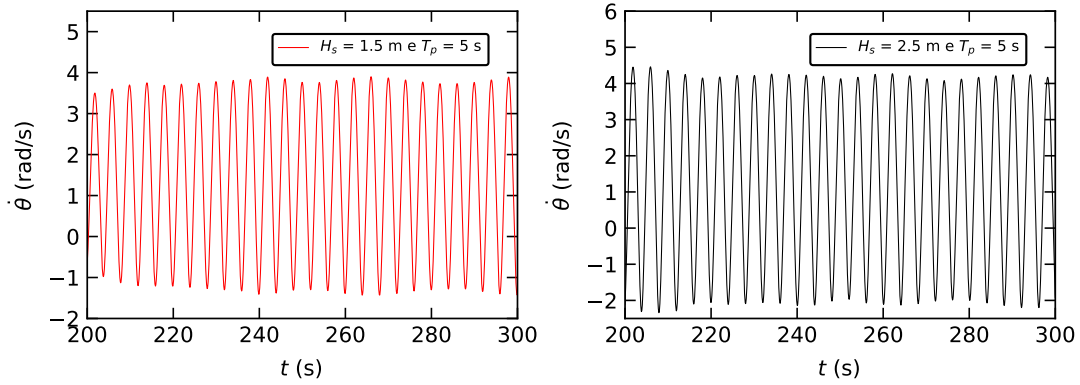


Figura 5.6: Variação da velocidade angular do braço para $T_p = 5$ s com $H_s = 1.5$ m e $H_s = 2.5$ m.

Na Figura 5.7 está representada a eficiência obtida para diferentes alturas de onda e os respectivos períodos de pico, assim como a eficiência média para cada altura de onda. Analisando o gráfico, observa-se um claro aumento da eficiência para alturas de onda inferiores, desta forma, diminuindo o H_s para 1.5 m obteve-se um aumento percentual de eficiência de cerca de 69%. Observa-se ainda que a curva de eficiência segue a curva do RAO (Figura 5.5) sendo semelhante na sua forma, o que era expectável visto este ser um problema linear. É visível, que há um pico de amplitude de eficiência para $T_p = 5$ s, que se destaca para ambas as alturas de onda significativas, chegando até a atingir uma eficiência de cerca de 30% para $T_p = 5$ s. Desta forma, é possível confirmar os resultados obtidos para o RAO e concluir que as condições que otimizam o funcionamento do WEHC, nas condições apresentadas, correspondem a uma frequência de funcionamento igual a 0.2 Hz ($T_p = 5$ s) com uma altura significativa de onda igual a 1.5 m ($H_s = 1.5$ m).

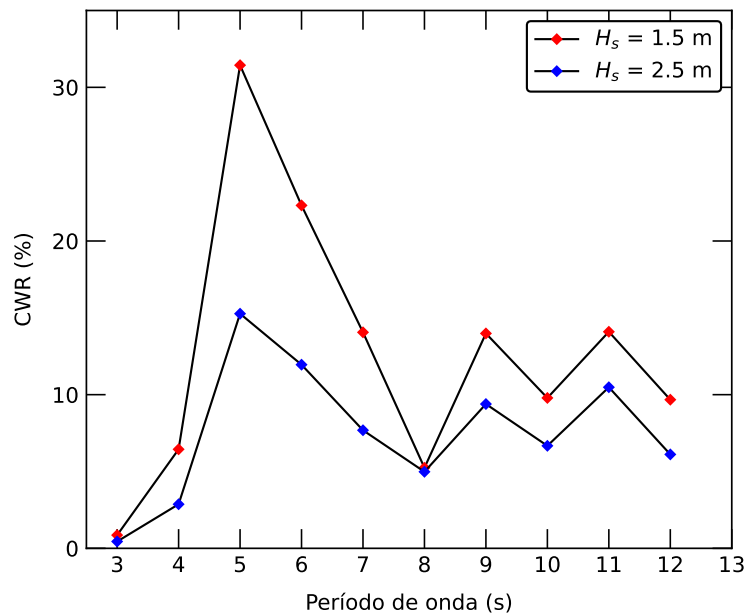


Figura 5.7: CWR para $H_s = 1.5$ m e $H_s = 2.5$ m.

Nas tabelas 5.2 e 5.3 apresentam-se os valores de potência média e do CWR utilizados para a construção do gráfico representado na Figura 5.7.

Tabela 5.2: Potência média extraída pelo dispositivo para $H_s = 1.5\text{ m}$.

	$T_p = 4\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$	$T_p = 5\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$	$T_p = 7\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$	$T_p = 8\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$	$T_p = 9\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$	$T_p = 11\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$	$T_p = 12\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$
$\bar{W}_{out}\text{ [W]}$	2546.91	12424.53	5555.10	2071.43	5526.44	5569.47	3822.39
CWR [%]	6.45	31.44	14.06	5.24	13.98	14.09	9.67

Tabela 5.3: Potência média extraída pelo dispositivo para $H_s = 2.5\text{ m}$.

	$T_p = 4\text{ s}$ $H_s = 2.5\text{ m}$	$T_p = 5\text{ s}$ $H_s = 2.5\text{ m}$	$T_p = 7\text{ s}$ $H_s = 2.5\text{ m}$	$T_p = 8\text{ s}$ $H_s = 2.5\text{ m}$	$T_p = 9\text{ s}$ $H_s = 2.5\text{ m}$	$T_p = 11\text{ s}$ $H_s = 2.5\text{ m}$	$T_p = 12\text{ s}$ $H_s = 2.5\text{ m}$
$\bar{W}_{out}\text{ [W]}$	3149.72	16761.59	8435.33	5468.36	10308.36	11507.045	6708.958
CWR [%]	2.87	15.27	7.68	4.98	9.39	10.48	6.11

Analisando as tabelas 5.2 e 5.3 observa-se que à medida que se aumenta a altura de onda, a potência média extraída aumenta, mas a eficiência diminui. Isto significa que com um aumento de H_s , apesar do dispositivo conseguir extrair uma quantidade superior de energia, não consegue ser mais eficiente. A eficiência média para estas simulações foi cerca de 11%, é um valor muito reduzido, devido ao facto de as simulações terem sido realizadas em duas dimensões e portanto, o coeficiente K utilizado não corresponde a um valor real de pressão da bomba. Outra razão para o valor de potência calculado não ser totalmente correto, é por estarem a ser desprezadas as perdas por atrito, perdas na bomba volumétrica e as perdas de carga nas tubagens até ao reservatório.

5.1.1 Simulações com aumento de peso do WEHC com agitação regular

Como referido na tabela 5.1, um dos parâmetros utilizados nas simulações, foi a alteração da geometria do dispositivo. Desta forma, foram alteradas a massa volúmica do flutuador e do braço em cerca de 30%, tomando os valores representados na tabela 5.4. Na Figura 5.8 estão representadas estas alterações feitas no código *xml* onde $mkbound = 2$ corresponde ao braço e $mkbound = 3$ corresponde ao flutuador.

Tabela 5.4: Massas volúmicas utilizadas nas simulações com aumento de peso.

ρ do flutuador [kg/m^3]	208
ρ do braço [kg/m^3]	390

```
<floatings>
  <floating mkbound="2" rhopbody="390.0" />
  <floating mkbound="3" rhopbody="208.0" />
</floatings>
```

Figura 5.8: Alteração da geometria do dispositivo no código *xml*.

Visto a eficiência ser superior para alturas de onda inferiores (tabelas 5.2 e 5.3), o tratamento dos resultados foi feito para alturas de onda significativas de $H_s = 1.5\text{ m}$.

Na Figura 5.9 está representada a curva do RAO onde se observa uma semelhança com a curva do RAO sem aumento de peso, representada na Figura 5.5. Para este caso, é visível um pico de amplitude para $T_p = 5\text{ s}$ e $T_p = 11\text{ s}$. Desta forma, é perceptível que a zona onde o dispositivo tem uma amplitude maior (onde a produção de energia é maximizada), não altera com o aumento de peso do dispositivo.

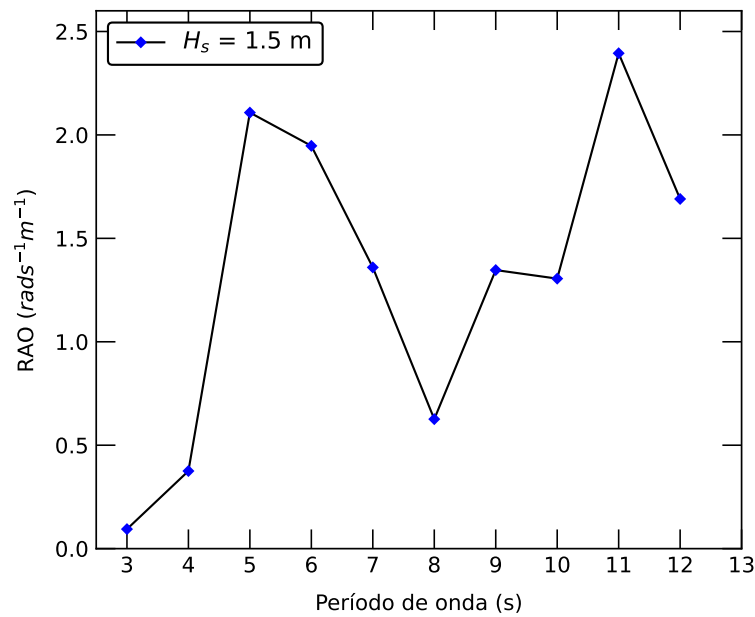


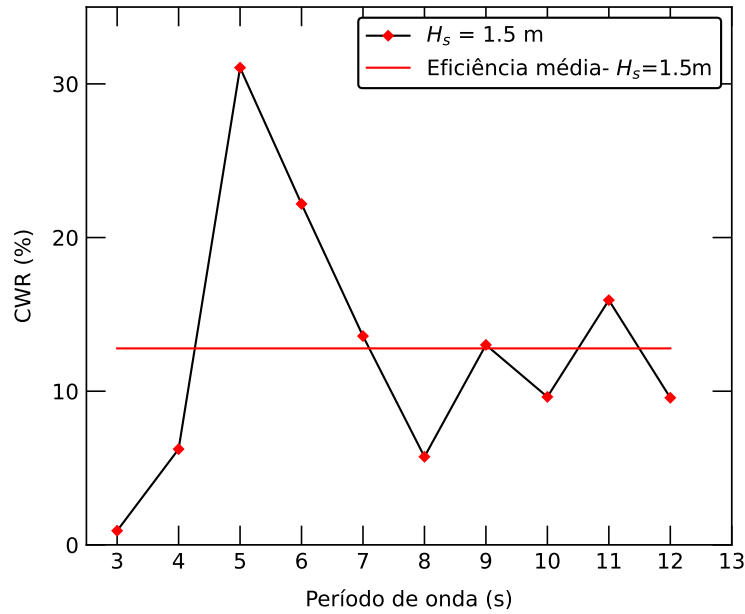
Figura 5.9: RAO para $H_s = 1.5\text{ m}$.

Na tabela 5.5 estão apresentados os valores de potência e do CWR para algumas condições de simulação. Na Figura 5.10 esta expressa a curva do CWR para todos os períodos de simulação.

Tabela 5.5: Potência média extraída pelo dispositivo para $H_s = 1.5\text{ m}$.

	$T_p = 4\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$	$T_p = 5\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$	$T_p = 7\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$	$T_p = 8\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$	$T_p = 9\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$	$T_p = 11\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$	$T_p = 12\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$
$\bar{W}_{out} [W]$	2462.53	12272.63	5369.59	2265.59	5142.75	6294.38	3782.79
CWR [%]	6.23	31.06	13.59	5.73	13.01	15.93	9.57

Na tabela 5.5 observa-se que há aumento da potência extraída à medida que aumenta o período de pico. É visível ainda que para $T_p = 5\text{ s}$ existe um pico de potência, concordante com os resultados obtidos na tabela 5.2. A eficiência média obtida para estas condições, foi cerca de 12%, comparando este valor com a eficiência média obtida para agitação regular sem aumento de peso, é perceptível que houve apenas um aumento de 1% na eficiência do dispositivo, ou seja, provavelmente não compensa aumentar o peso do WEHC visto ter grandes custos associados.

Figura 5.10: CWR para $H_s = 1.5$ m.

5.2 Simulações em agitação irregular

Com o objetivo de realizar um estudo mais aproximado à realidade possível foram feitas simulações com agitação irregular para simular o movimento real das ondas do mar. À semelhança das condições marítimas regulares (Figura 5.3), na Figura 5.11 estão representados os parâmetros de simulação no ficheiro *xml* para agitação irregular, onde estão representados um período de onda (*wave period*) igual a 3 s, altura de onda (*wave height*) de 1.5 m e profundidade do fluido (*depth*) igual a 30 m. As condições das simula-

```
<wavepaddies>
  <piston_spectrum>
    <mkbound value="1" comment="MK-Bound of selected particles" />
    <start value="0" comment="Start time (default=0)" />
    <duration value="0.0" comment="Movement duration, Zero is the end of simulation (default=0)" />
    <depth value="30.0" comment="Water depth (default=0)" />
    <pistondir x="1.0" y="0.0" z="0.0" comment="Movement direction (default=(1,0,0))" />
    <spectrum value="jonswap" comment="Spectrum type: jonswap, pierson-moskowitz" />
    <waveorder value="2" comment="Order wave generation 1:1st order, 2:2nd order (default=1)" />
    <waveheight value="1.5" comment="Wave height" />
    <waveperiod value="3" comment="Wave period" />
    <peakcoef value="3.3" comment="Peak enhancement coefficient (def=3.3)" />
    <waves value="1024" comment="Number of waves to create irregular waves (def=50)" />
    <randomseed value="1234" comment="Random seed to initialize a pseudorandom number generator" />
    <serieini value="560" autofit="true" comment="Initial time in irregular wave serie (def=0)" />
    <ramp time="0" comment="Time of ramp (def=0)" />
    <savemotion time="20" timedt="0.1" xpos="2.0" zpos="-0.15" comment="Saves motion data. xpos and zpos are optional. zpos=-depth of the measuring point" />
    <saveserie time="1000" timedt="0.1" xpos="0" comment="Saves serie data (optional)" />
    <_calcsериелength time="1000" comment="Calculates serie length (optional)" />
  </piston_spectrum>
</wavepaddies>
```

Figura 5.11: Parâmetros definidos no ficheiro *xml* para as condições de agitação irregular.

ções foram semelhantes às com agitação regular expressas na secção 5.1, e os parâmetros utilizados estão expressos na Tabela 5.1.

O tratamento dos resultados foi feito recorrendo ao código *Python* expresso no Apêndice B.

De forma a analisar o comportamento dinâmico do WEHC em condições de agitação

irregular, é calculado o RAO. No entanto como o RAO descreve a relação linear entre a resposta resultante e a amplitude da onda incidente, para esta agitação, o parâmetro foi obtido da seguinte forma:

$$RAO(f) = \sqrt{\frac{S_{\dot{\theta}}(f)}{S_{\eta}(f)}} \quad (5.6)$$

Onde $S_{\dot{\theta}}$ é o espectro de potência do movimento do braço e S_{η} é o espectro da onda (Brito 2018).

Nas Figuras 5.12 e 5.13 encontram-se representados os espectros de onda e do WEHC para os períodos, $T_p = 3, 7$ s e 12 s e para alturas H_s iguais a 1.5 m e 2.5 m. Observa-se que para alturas de onda de 2.5 m, ambos os espectros apresentam amplitudes superiores, o que era expectável visto a energia de onda ser maior para alturas superiores. Analisando as curvas para $T_p = 5$ s é visível, em ambos os espectros, um pico máximo para valores de $f = 0.2$ Hz, ou seja, os espectros têm a sua amplitude máxima para $f.T_p = 1$ que corresponde ao período de pico de 5 s. Para este período de pico, $T_p = 5$ s, o aumento da altura significativa de onda de 1.5 m para 2.5 m, cria um aumento percentual de cerca de 57%. Na Figura 5.14 apresenta-se os resultados obtidos para o parâmetro RAO,

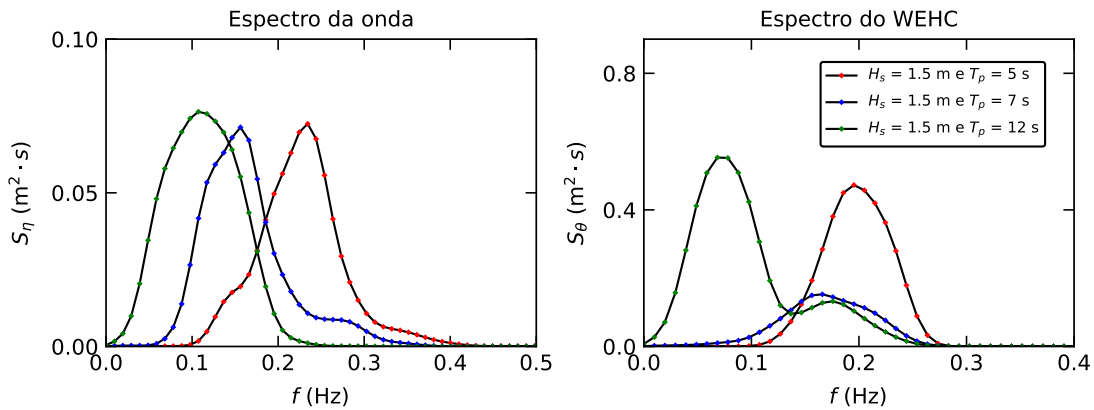


Figura 5.12: Espectro da onda e do WEHC para $H_s = 1.5$ m.

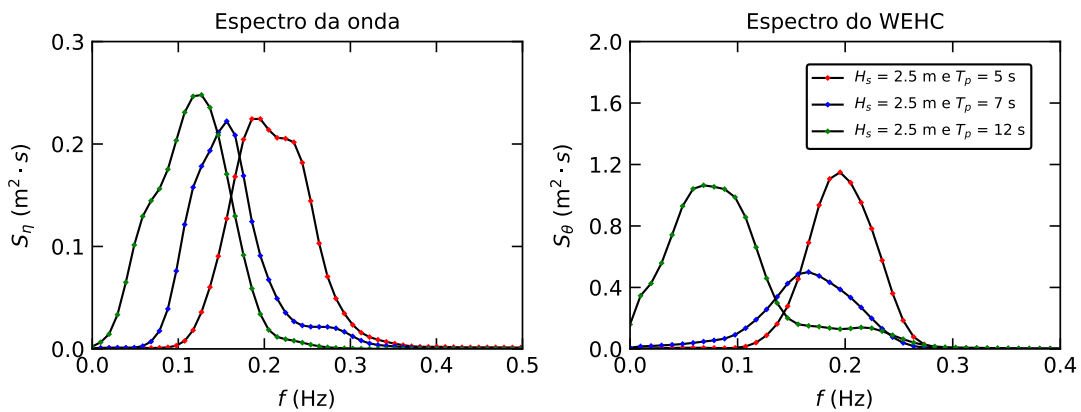


Figura 5.13: Espectro da onda e do WEHC para $H_s = 2.5$ m.

onde se percebe que as curvas apresentam a mesma forma. É visível que para valores de frequência baixos ($f(\text{Hz}) < 0.5$), a curva do RAO é muito irregular, não mostrando um pico bem definido contrariamente às condições de agitação regular. Com efeito, observam-se três picos relativos para frequências próximas de 0.05 Hz , 0.2 Hz e 0.35 Hz . Era expectável

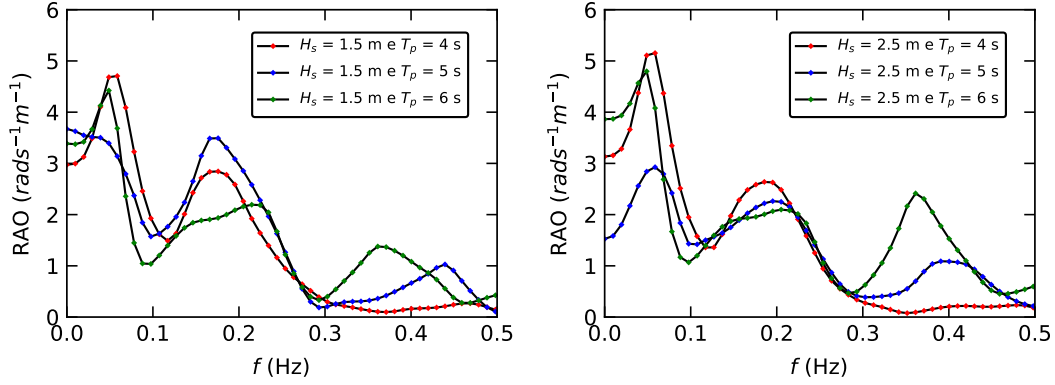


Figura 5.14: Curva do RAO para $H_s = 1.5 \text{ m}$ e $H_s = 2.5 \text{ m}$.

que os picos de amplitude correspondessem ao período de pico, ou seja quando $f \cdot T_p = 1$. Contudo, analisando a Figura 5.15 observa-se que, no caso de um $H_s = 1.5 \text{ m}$, esse pico apresenta um desvio do $f = 0.2 \text{ Hz}$, e no caso de um $H_s = 2.5 \text{ m}$, o período de pico apresenta um desvio ainda mais significativo correspondendo a um $f = 0.05 \text{ Hz}$. Esta diferença percentual de cerca de 60% pode ser explicada pela não-linearidade da interação onda-estrutura. Um outro parâmetro a avaliar, quando estamos a estudar a

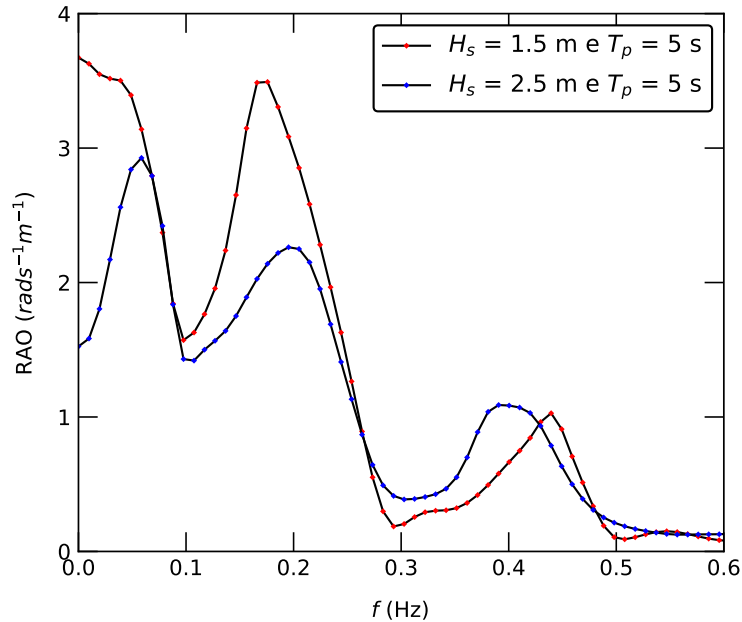


Figura 5.15: Curva do RAO para $H_s = 1.5 \text{ m}$ e $H_s = 2.5 \text{ m}$ para o mesmo T_p .

dinâmica de um WEC é a elevação da superfície livre, η . Por estarmos em condições de agitação irregular, a elevação tem um comportamento não linear, causado pelas interações

das ondas marítimas (Figura 5.16). Como esperado, observa-se que a amplitude da onda aumenta com o aumento da altura significativa da onda, H_s e com o aumento do período de pico de onda T_p . Como visto nas condições em agitação regular (secção 5.1) a influência

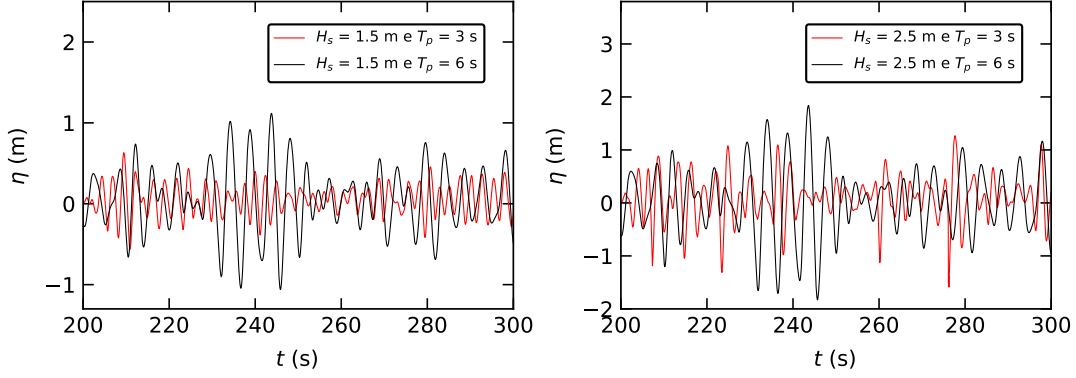


Figura 5.16: Elevação da superfície livre para ondas $H_s = 1.5$ e 2.5 m e $T_p = 3$ e 6 s.

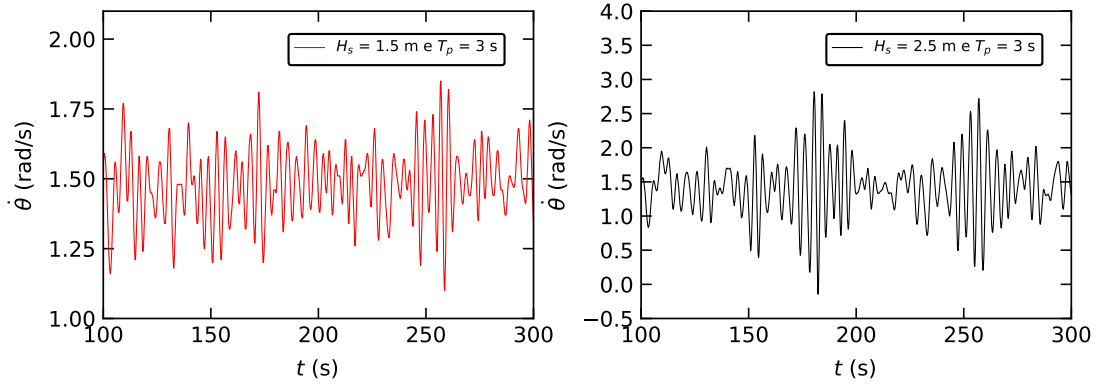
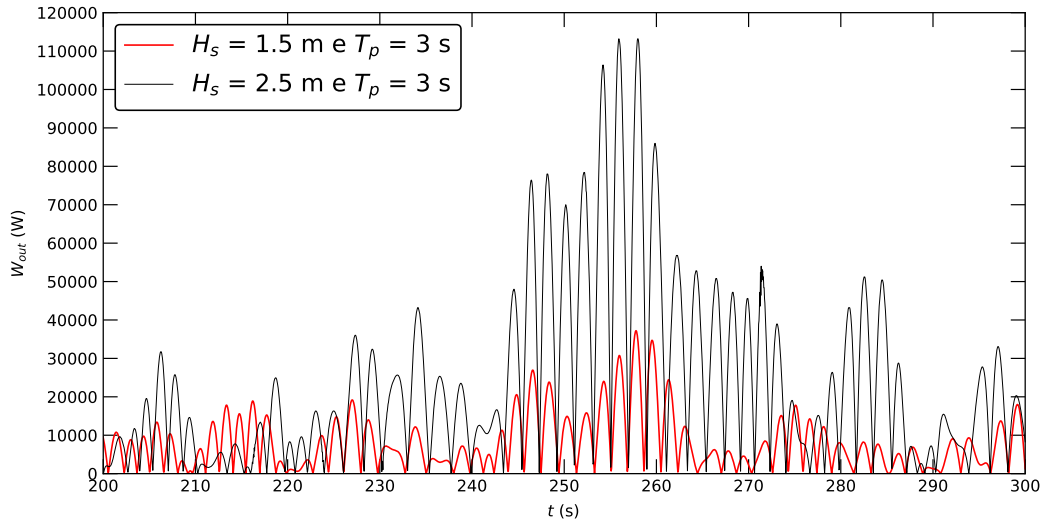
do sistema PTO na hidrodinâmica do WEHC pode ser analisada a partir da alteração dos coeficientes de amortecimento, tal procedimento é claramente válido para as condições em agitação irregular. Como tal, foi calculado o CWR recorrendo à expressão 5.2. Para ondas irregulares a potência extraída $\overline{W}_{out}$, e a potência média incidente $\overline{W}_{in}$, são dadas respetivamente por (Brito et al. 2020):

$$\overline{W}_{out} = \int_0^{\infty} K \dot{\theta}(t) dt \quad (5.7)$$

$$\overline{W}_{in} = \rho g \int_0^{\infty} c_g(f) S_{\eta}(f) df \quad (5.8)$$

É de referir que a potencia extraída pelo dispositivo é uma potencia mecânica disponível no ponto de rotação do braço e que nas simulações realizadas não são tidas em conta as perdas de atrito, perdas na bomba volumétrica e perdas de carga nas tubagens do circuito. Como tal, $\overline{W}_{out}$ não é representativo da potência elétrica no dispositivo completo.

Nas Figuras 5.17 e 5.18 estão representados, o $\dot{\theta}$ e o $\overline{W}_{out}$, respetivamente, para diferentes alturas significativas. É notório que mantendo o período de pico constante, o aumento da altura significativa da onda aumenta a energia de onda, e consequentemente provoca um aumento da velocidade angular do braço (Figura 5.17) assim como da geração de potência (Figura 5.18).


 Figura 5.17: Velocidade angular do braço para ondas $H_s = 1.5\text{ m}$ e 2.5 m e $T_p = 3\text{ s}$.

 Figura 5.18: Potência extraída para ondas $H_s = 1.5\text{ m}$ e 2.5 m e $T_p = 3\text{ s}$.

Nas Figuras 5.19a e 5.19b estão representadas a variação da velocidade angular do braço do dispositivo consoante a geração de potência. A potência média está representada a vermelho sendo que para $H_s = 1.5\text{ m}$ e $T_p = 3\text{ s}$, $\overline{W}_{out} = 8.26\text{ KW}$. Observa-se na Figura 5.19a que para velocidades angulares do braço superiores, há uma correspondência de uma potência instantânea superior (5.19b). Por exemplo analisando os intervalos de $t \approx 175\text{ s}$ e $t \approx 260\text{ s}$ é visível que existe um pico, quer para $\dot{\theta}$ quer para $\overline{W}_{out}$, validando a equação 5.7, onde estas variáveis são diretamente proporcionais. Na tabela 5.6 estão representados valores de potência para algumas simulações efetuadas. Verifica-se que com um aumento da altura significativa H_s , mantendo o período de pico T_p , constante, a potência média a extrair pelo dispositivo é maior.

Recorrendo à equação 5.2 foi possível calcular o CWR para diferentes condições de simulação assim como a potência de onda incidente média. Os resultados obtidos estão representados na tabela 5.7.

Analisando a tabela 5.7 observa-se que, mantendo o período de pico T_p , constante um

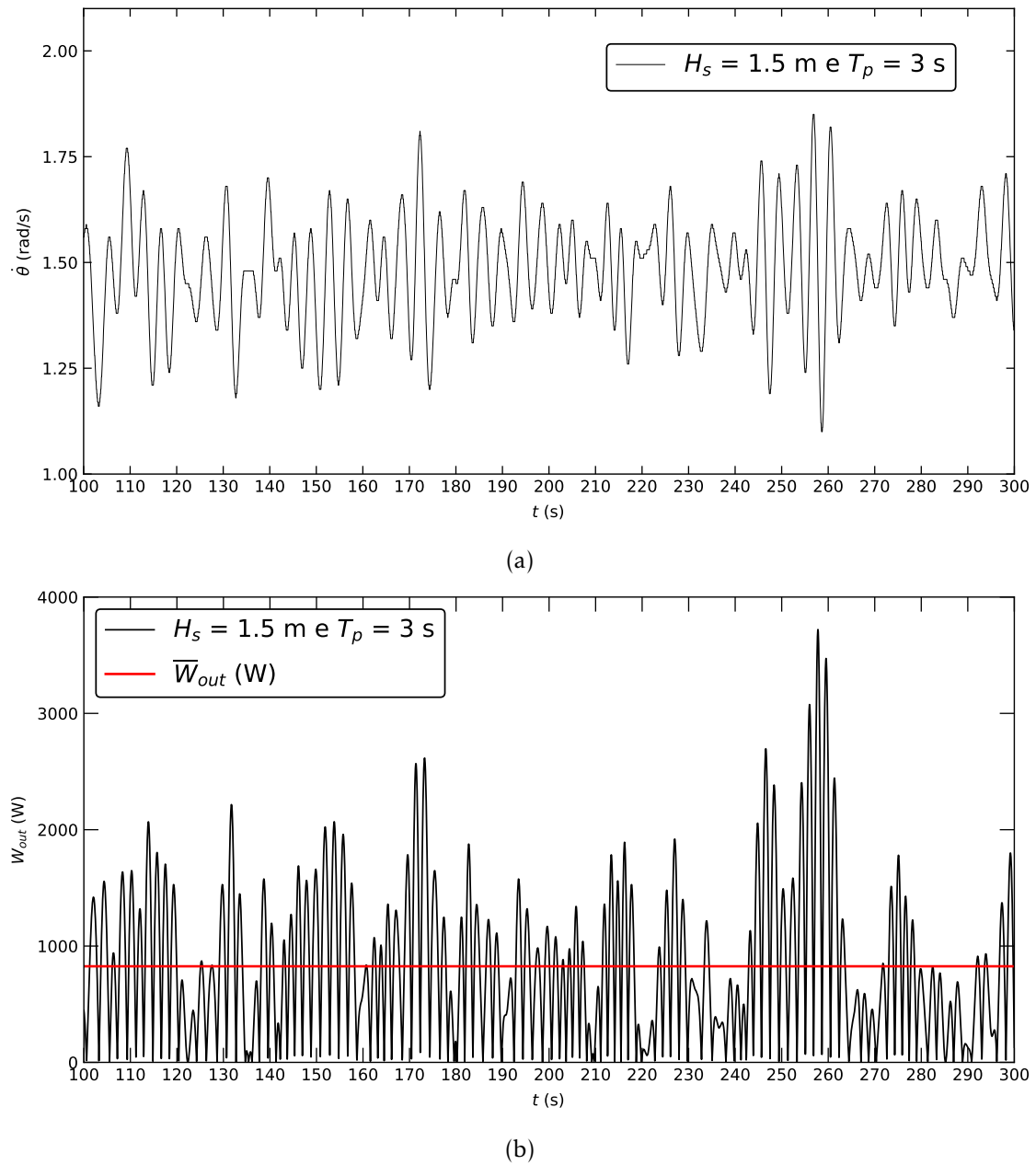


Figura 5.19: (a) Velocidade angular para ondas $H_s = 1.5$ m e $T_p = 3$ s. (b) Potência extraída para ondas $H_s = 1.5$ m e $T_p = 3$ s.

aumento da altura significativa H_s aumenta a potência incidente, $\overline{W}_{in}$. Contudo, apesar da potência incidente ser superior para valores de altura de onda maiores, o CWR diminui. Ou seja o dispositivo não consegue aproveitar toda a potência recebida nem ser mais eficiente.

A eficiência média para estas simulações traduz-se em cerca de 6%. Comparando este valor com o obtido para condições de agitação regular chegamos a uma diminuição de eficiência média percentual de cerca de 45%. Tal resultado era expectável pois o dispositivo está sujeito a um movimento de onda assíncrono o que provoca o movimento

Tabela 5.6: Potência média extraída pelo dispositivo.

	$T_p = 7\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$	$T_p = 7\text{ s}$ $H_s = 2.5\text{ m}$	$T_p = 10\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$	$T_p = 10\text{ s}$ $H_s = 2.5\text{ m}$	$T_p = 12\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$	$T_p = 12\text{ s}$ $H_s = 2.5\text{ m}$
$\dot{\theta} [^\circ]$	0.0079	0.014	0.0097	0.018	0.0069	0.012
$\overline{W}_{out} [\text{W}]$	3151.38	5420.20	3889.60	7359.21	2777.55	4752.18

Tabela 5.7: Potência incidente e CWR.

	$T_p = 7\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$	$T_p = 7\text{ s}$ $H_s = 2.5\text{ m}$	$T_p = 10\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$	$T_p = 10\text{ s}$ $H_s = 2.5\text{ m}$	$T_p = 12\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$	$T_p = 12\text{ s}$ $H_s = 2.5\text{ m}$
$\overline{W}_{in} [\text{W}]$	42861.68	127498.65	141523.37	369775.06	95350.15	275371.51
CWR [%]	7.35	4.25	2.75	1.99	2.91	1.73

do dispositivo não estar em fase com a onda, resultando numa diminuição de eficiência comparativamente às condições de agitação regular.

Nas Figuras 5.20a e 5.20b estão representados alguns instantes da simulação com altura significativa de 2.5 m e período de pico de 8 s. É visível a variação da inclinação do WEHC ao longo do tempo, assim como da velocidade segundo o eixo x, à medida que a onda passa pelo dispositivo. Nas Figuras 5.21a, 5.21b, 5.21c e 5.21d estão representadas

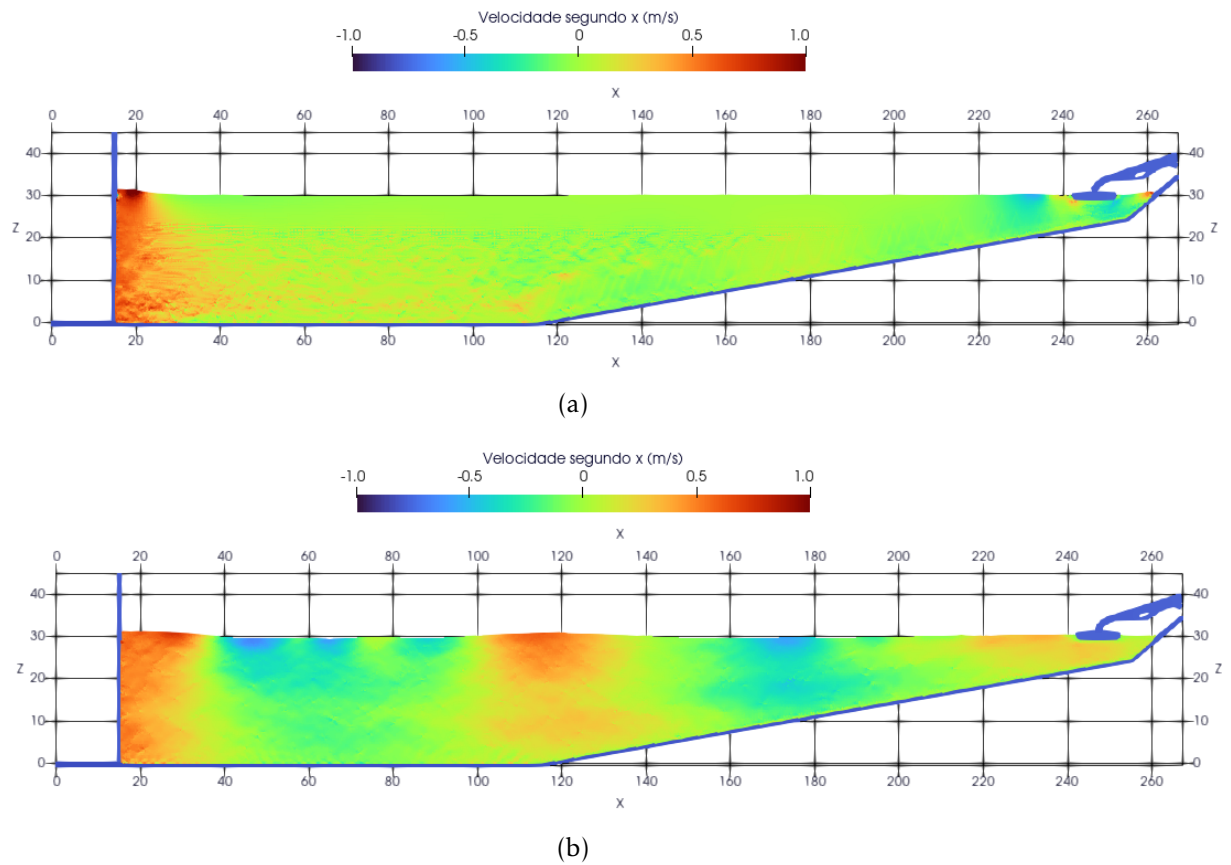


Figura 5.20: Simulações em *ParaView* com $H_s = 2.5\text{ m}$ e $T_p = 8\text{ s}$ nos instantes (a) $t = 50\text{ s}$. (b) $t = 100\text{ s}$. (c) $t = 250\text{ s}$. (d) $t = 400\text{ s}$

o movimento do WEHC para $T = 300s$, $T_p = 8s$ e $H_s = 2.5m$. Observa-se que à medida que a onda se aproxima da costa, provoca um movimento descendente do dispositivo que causa uma diminuição da velocidade segundo o eixo x , e um movimento ascendente do dispositivo que provoca um aumento de velocidade. Passando ainda por uma posição intermédia onde a velocidade segundo o eixo x , chega a ser negativa.

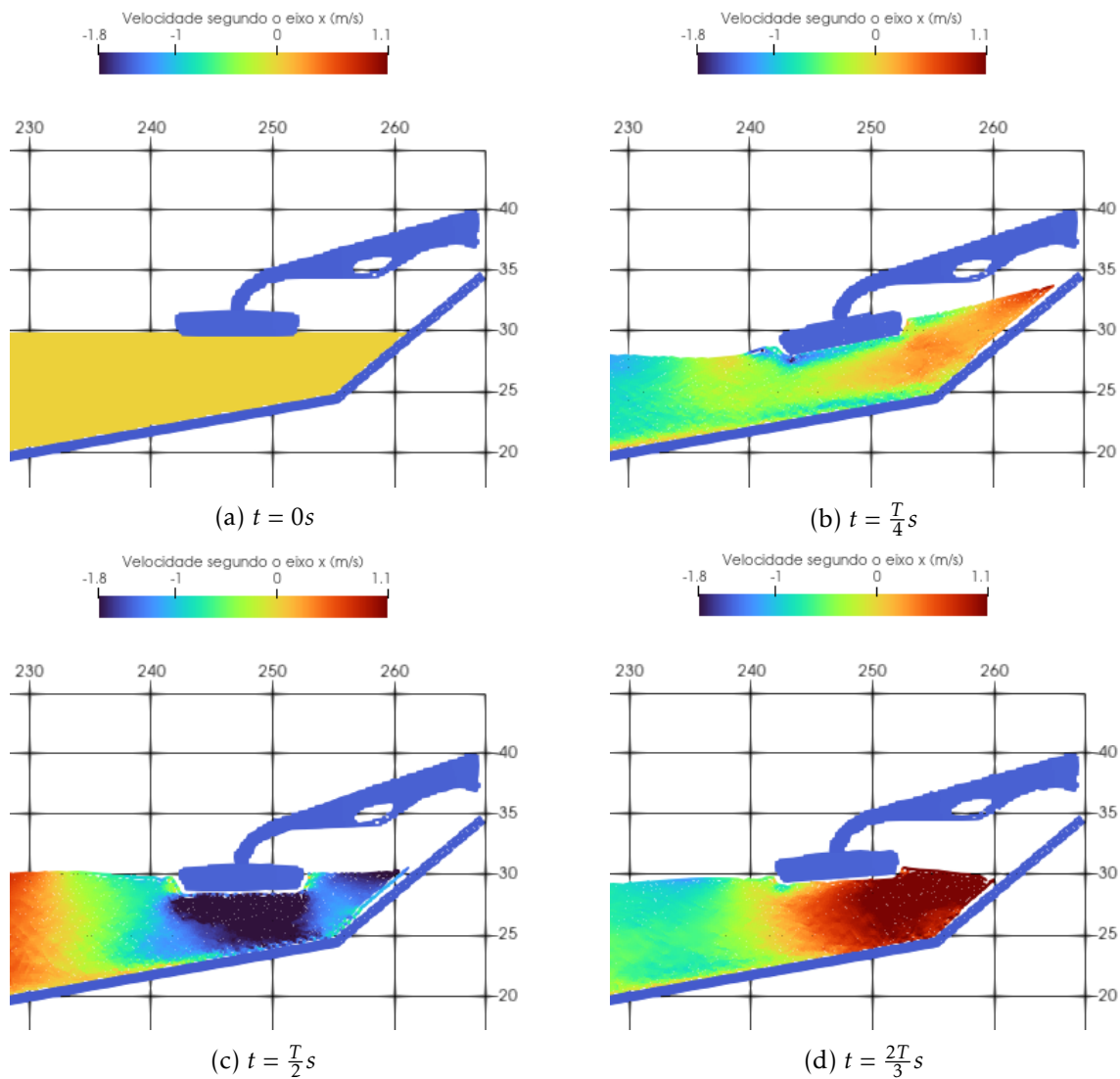


Figura 5.21: Visualização das simulações no *software ParaView*.

5.2.1 Simulações com aumento de peso do WEHC com agitação irregular

Com o intuito de perceber quais as condições que permitem retirar a máxima eficiência do WEHC, foram feitas simulações aumentando em 30% o peso do braço e do flutuador. Foram utilizadas as condições definidas na tabela 5.4.

Nas Figuras 5.22a e 5.22b apresentam-se os resultados obtidos para o parâmetro RAO. Para períodos de pico mais baixos (Figura 5.22a) observa-se uma clara irregularidade das

ondas, mais uma vez justificada pela não-linearidade da interação onda-estrutura. Era expectável que houvesse um pico de amplitude para o período de pico, $T_p = 5 s$ ($f = 0.2 Hz$). Contudo tal não aconteceu para as condições em que houve aumento do peso do dispositivo, havendo até uma diminuição do RAO para essa frequência, podendo significar que estas condições não são as mais adequadas ao funcionamento do WEHC.

Por outro lado, para períodos de pico mais elevados (Figura 5.22b) é visível a semelhança nas formas das curvas do RAO. Embora que os valores sejam ligeiramente mais baixos para as condições de aumento de peso, é notório um pico para ambas as curvas em valores de $f = 0.35 Hz$. Assim concluiu-se para $T_p = 10 s$, que em ambas as condições é preferível ter o dispositivo a funcionar para valores de frequência de cerca de $0.35 Hz$ visto ser uma zona com maior amplitude onde a produção de energia será possivelmente maximizada.

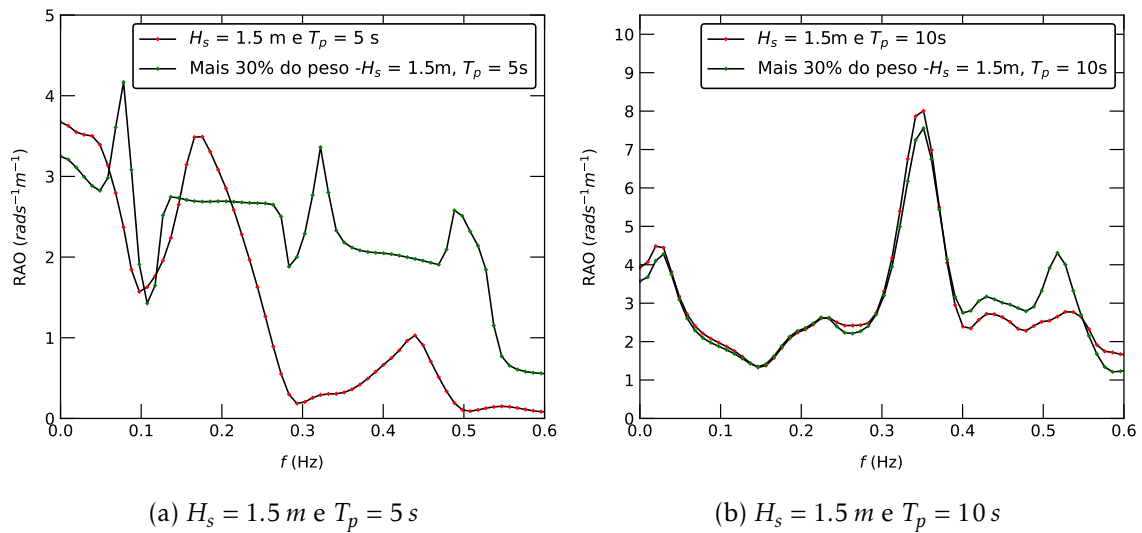
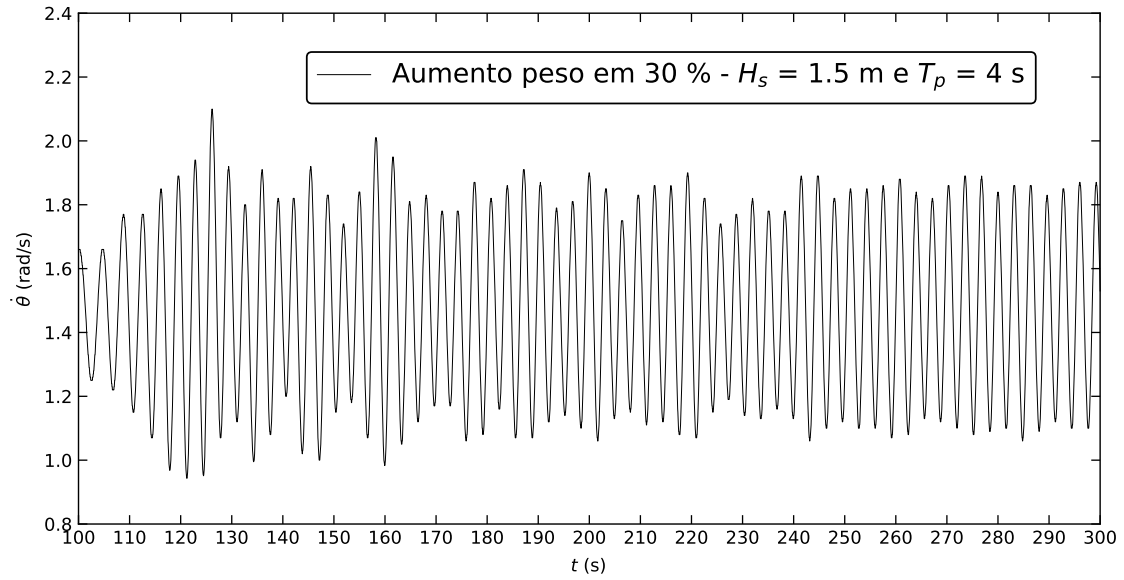
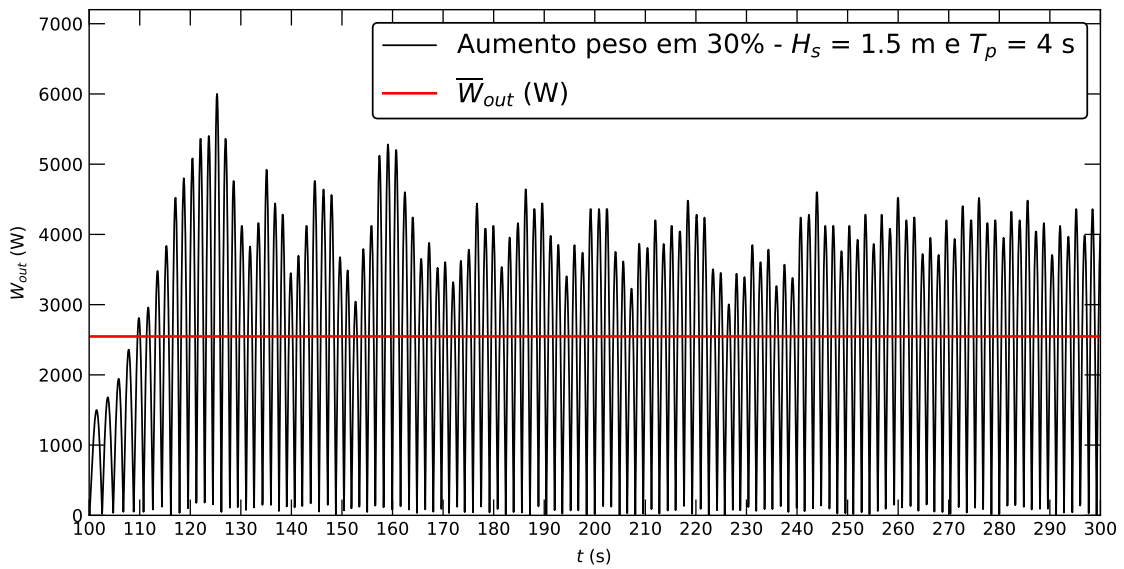


Figura 5.22: RAO para ondas $H_s = 1.5 m$ e $T_p = 5 s$ e $T_p = 10 s$ com aumento do peso em 30%.

Na Figura 5.23a está representado o $\dot{\theta}$ e na Figura 5.23b o $\overline{W}_{out}$ para as condições de aumento do peso em 30%. Analisando as Figuras 5.23a e 5.23b observa-se, que tal como nas Figuras 5.19a e 5.19b, para um pico de velocidade angular do braço há uma correspondência de um pico de potência instantânea. Observa-se ainda que para as condições de agitação representadas na 5.23b, existe um $\overline{W}_{out} = 25.47 KW$. Comparando esta potência com a calculada para as condições expressas nas Figuras 5.19a e 5.19b é notório um aumento da potência extraída em cerca de 68%.



(a)



(b)

Figura 5.23: (a) Velocidade angular e (b) Potência extraída para ondas $H_s = 1.5 m$ e $T_p = 4 s$ com aumento de peso de 30%.

Nas tabelas 5.8 e 5.9 estão representados os valores de potência e CWR para algumas simulações efetuadas em condições de aumento do peso em 30%.

Tabela 5.8: Potência média extraída e velocidade angular do braço.

	$T_p = 3 s$ $H_s = 1.5 m$	$T_p = 5 s$ $H_s = 1.5 m$	$T_p = 7 s$ $H_s = 1.5 m$	$T_p = 10 s$ $H_s = 1.5 m$	$T_p = 12 s$ $H_s = 1.5 m$
$\dot{\theta}$ [°]	0.0021	0.031	0.0078	0.0094	0.0068
$\bar{W}_{out}$ [W]	841.35	12424.53	3116.22	3777.61	2733.85

Tabela 5.9: Potência média incidente e CWR.

	$T_p = 3\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$	$T_p = 5\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$	$T_p = 7\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$	$T_p = 10\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$	$T_p = 12\text{ s}$ $H_s = 1.5\text{ m}$
$\overline{W}_{in}$ [W]	7687.56	109362.88	43942.76	141444.75	90575.18
CWR [%]	11.36	10.94	7.09	2.67	3.02

Analisando a tabela 5.9 observa-se que para a mesma altura de onda significativa, um aumento do período de pico, aumenta a potência incidente. Contudo o CWR diminui com o aumento do T_p , tal é concordante com os resultados obtidos anteriormente, ou seja, mesmo alterando a geometria do WEHC, este continua a não conseguir aproveitar toda a potência recebida para ser mais eficiente. A eficiência média do dispositivo para as condições apresentadas foi cerca de 5.4%, concluiu-se então que a alteração da geometria do WEHC traduz-se uma diminuição de cerca de 10% da eficiência.

CONCLUSÕES

6.1 Conclusões finais

O principal objetivo deste trabalho foi estudar numericamente um dispositivo de conversão da energia das ondas hiperbárico (WEHC), com um sistema PTO (*Power Take-Off*) de duplo efeito. A dissertação foi desenvolvida recorrendo a simulações numéricas em agitação regular e irregular e ainda recorrendo à alteração da geometria do dispositivo. Foi utilizado o método SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) no código *DualSPHysics* variando os parâmetros de simulação com o intuito de perceber as condições que tornam o dispositivo mais eficiente. Os parâmetros de agitação estudados foram períodos de pico entre 3 e 12 s (com intervalo de 1 segundo entre cada) e alturas significativas de onda de 1.5 m e 2.5 m.

A dissertação foi desenvolvida tendo por base os estudos já desenvolvidos por T. Silva 2019, Bernarrdo 2020, e Rodrigues 2021. A geometria do dispositivo e do canal foi definida de acordo com o estudo realizado por Bernarrdo 2020, assim como a localização do WEHC no Porto de Sines, por apresentar semelhanças ao Porto de Pecém no Brasil, onde está instalado um dispositivo semelhante ao estudado.

6.1.1 Validação do código numérico

O código numérico foi validado no capítulo 4.2 tendo por base os resultados numéricos obtidos por Windt, Davidson, Ransley et al. 2020. Apesar do dispositivo utilizado no estudo não ser um WEHC, considerou-se que era semelhante o suficiente para confirmar que o código numérico era adequado ao presente estudo. O erro relativo médio, entre os resultados obtidos por Windt, Davidson, Ransley et al. 2020 e os obtidos pelo *DualSPHysics*, foi cerca de 11%. Desta forma, concluiu-se que o código numérico estava validado e passível de ser utilizado nesta dissertação.

6.1.2 Simulações com agitação regular

Inicialmente procedeu-se ao estudo do comportamento hidrodinâmico do WEHC em agitação regular. A partir do trabalho desenvolvido por Bernarrdo 2020, foi possível

concluir uma zona ótima de funcionamento do sistema PTO, assim concluiu-se que o pico de potência correspondia a $K = 400 \text{ KN/m}$ e utilizou-se este coeficiente de amortecimento no sistema PTO para todas as simulações.

Foi avaliado o parâmetro RAO (*Response Amplitude Operator*) que é dado pela divisão da amplitude de movimento do flutuador pela amplitude da onda. Para ambas as alturas significativa (1.5 m e 2.5 m) verificou-se dois picos para o período de onda de 5 s e 11 s, que correspondem às frequências 0.2 Hz e 0.09 Hz. Estes picos de onda são importantes pois correspondem às frequências em que o dispositivo entra em ressonância com as ondas, aumentando a sua amplitude de movimento. Observou-se no geral, um aumento de cerca de 39% do RAO para alturas de onda superiores.

A eficiência do dispositivo foi também avaliada e definida pelo rácio entre a potência média extraída e a potência média incidente. A eficiência média foi cerca de 11% e para a potência média extraída obteve-se um valor médio de 6.69 KW. Concluiu-se que, embora a potência extraída seja superior para alturas de onda e períodos de onda superiores, a eficiência é mais baixa. Isto significa que o WEHC não consegue extrair eficazmente a potência disponível resultando numa eficiência inferior.

6.1.3 Simulações com agitação irregular

Com o intuito de fazer um estudo o mais realista possível foram feitas simulações em agitação irregular para simular o movimento real das ondas marítimas. Para esta agitação o parâmetro RAO foi obtido a partir do espectro de potência do movimento do braço e do espectro da onda, visto tratar-se de uma agitação irregular. As curvas obtidas para o RAO revelaram-se ser muito irregulares na sua forma, não mostrando um pico bem definido. Era expectável que os picos de amplitude correspondessem ao período de pico, ou seja quando $f \cdot T_p = 1$, tal não aconteceu devido a não-linearidade da interação onda-estrutura.

A eficiência do dispositivo foi em geral mais baixa para a agitação irregular, tomando o valor de 6%. Esta diminuição de cerca de 45% era expectável visto que o movimento do dispositivo não está em fase com o movimento da onda. Relativamente à potência média extraída obteve-se um valor médio de 4.36 KW, resultando numa diminuição de potência de cerca de 53%. Apesar da diminuição da eficiência e da potência do dispositivo, os resultados foram concordantes no sentido em que a eficiência foi mais baixa apesar da potência extraída ser superior. Ou seja a alteração da agitação marítima não altera o facto do WEHC não conseguir extrair eficazmente a potência disponível resultando numa eficiência inferior.

6.1.4 Simulações com aumento do peso do dispositivo

O aumento do peso do conjunto foi feito aumentando as massas volúmicas do flutuador e do braço em 30%. Para a agitação regular, não houve praticamente diferenças no parâmetro RAO, mantendo-se os picos de amplitude para frequências de 0.2 Hz e 0.09

Hz. A eficiência média foi de 12%, não havendo também diferença significativa.

Para a agitação irregular observou-se uma clara irregularidade da curva do RAO, mais uma vez justificada pela não-linearidade da interação onda-estrutura. Era expectável que houvesse um pico de amplitude para o período de pico, $T_p = 5\text{ s}$ ($f = 0.2\text{ Hz}$). Contudo tal não aconteceu, havendo até uma diminuição do RAO para essa frequência. A alteração da geometria do WEHC resultou numa eficiência média de 5% e uma potência média extraída de 6.47 KW. Os resultados demonstraram mais uma vez, que apesar da potência extraída ser superior para alturas de onda e períodos de onda superiores, a eficiência é mais baixa e o WEHC não consegue extrair eficazmente a potência disponível. Desta forma, nestas condições de agitação provavelmente não é viável o aumento do peso do dispositivo visto que não há melhorias significativas dos parâmetros avaliados, e implicaria um custo superior na produção do WEHC.

6.2 Sugestões de trabalhos futuros

O trabalho desenvolvido foi focado na influência que os parâmetros de simulação (tipo de agitação marítima, período e altura de onda) tem no comportamento hidrodinâmico do WEHC bidimensional com base nos estudos já desenvolvidos.

No futuro sugere-se um estudo tridimensional do dispositivo de forma a incluir alguns efeitos que foram desprezados tal como a difração das ondas, e a utilização de um coeficiente K que correspondesse ao valor real de pressão da bomba. Outra vantagem de proceder ao estudo tridimensional seria avaliar os efeitos da alteração do volume do dispositivo e as consequências na força de impulsão e na amplitude do movimento.

BIBLIOGRAFIA

- Altomare, C., A. J. Crespo, J. M. Dominguez, M. Gomez-Gesteira, T. Suzuki e T. Verwaest (2015). “Applicability of Smoothed Particle Hydrodynamics for estimation of sea wave impact on coastal structures”. Em: *Coastal Engineering* 96, pp. 1–12. ISSN: 03783839. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2014.11.001 (ver pp. 18, 19).
- Aqua (2012). *Aquaret Delivering knowledge and understanding*. URL: https://www.aquaret.com/index1a20.html?option=com_content&view=article&id=133&Itemid=276&lang=en (acedido em 2022-08-24) (ver p. 5).
- Bernarrdo, F. (2020). *Estudo numérico da eficiência de um conversor hiperbárico de energia das ondas (Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa)*. Rel. téc. (ver pp. xi, xiii, 27, 32–34, 37, 38, 57).
- Brito, M., R. B. Canelas, O. Garcia-Feal, J. M. Dominguez, A. J. Crespo, R. M. Ferreira, M. G. Neves e L. Teixeira (2020). “A numerical tool for modelling oscillating wave surge converter with nonlinear mechanical constraints”. Em: *Renewable Energy* 146, pp. 2024–2043. ISSN: 18790682. DOI: 10.1016/j.renene.2019.08.034 (ver pp. 20, 23, 32, 48).
- Brito, M. (2018). “Numerical modeling and experimental testing of an oscillating wave surge converter”. Tese de doutoramento. Universidade de Lisboa Instituto Superior Técnico (ver p. 46).
- Budar K.; Falnes, J. (1975). “A resonant point absorber of ocean-wave power.” Em: *Nature Publishing Group* 1975 (ver p. 41).
- Canelas, R. B., M. Brito, O. G. Feal, J. M. Domínguez e A. J. Crespo (2018). “Extending DualSPHysics with a Differential Variational Inequality: modeling fluid-mechanism interaction”. Em: *Applied Ocean Research* 76, pp. 88–97. ISSN: 01411187. DOI: 10.1016/j.apor.2018.04.015 (ver p. 17).
- Crespo, A. J., J. M. Dominguez, B. D. Rogers, M. Gomez-Gesteira, S. Longshaw, R. Canelas, R. Vacondio, A. Barreiro e O. Garcia-Feal (2015). “DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)”. Em: *Computer Physics Communications* 187, pp. 204–216. ISSN: 00104655. DOI: 10.1016/j.cpc.2014.10.004 (ver pp. 20, 23).

- Dean, R. G. e R. A. Dalrymple (1991). *Water wave mechanics for engineers and scientists*. Vol. 2. world scientific publishing company (ver p. 13).
- EMEC (2012). *Wave Devices*. URL: <https://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/> (acedido em 2022-08-24) (ver p. 5).
- Energias, P. (2009). *Tecnologias: Energia das ondas, águas profundas*. URL: <https://energiasrenovaveis.com> (acedido em 2022-08-24) (ver p. 9).
- Estefen, S. F., P. D. T. Esperança, E. Ricarte, P. R. Da Costa, M. M. Pinheiro, C. H. P. Clemente, D. Franco, E. Melo e J. A. De Souza (2008). *Experimental and numerical studies of the wave energy hyperbaric device for eletricity production*. Rel. téc. URL: <http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use> (ver pp. 11, 25).
- Estefen, S. F., P. B. Garcia-Rosa, E. Ricarte, P. Roberto Da Costa, M. M. Pinheiro, M. I. Lourenç, I. R. Machado e S. R. Maes (2012). *Wave energy hyperbaric converter: small scale models, prototype and control strategies*. Rel. téc. URL: <http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use> (ver p. 26).
- Estefen, S. F., P. Roberto Da Costa, E. Ricarte e M. M. Pinheiro (2007). *Wave Energy Hyperbaric Device for Electricity Production*. Rel. téc. URL: <http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use> (ver p. 25).
- Falnes, J. (2007). *A review of wave-energy extraction*. DOI: 10.1016/j.marstruc.2007.09.001 (ver p. 13).
- Farid Estefen, S., S. F. Estefen, X. Castello, M. I. Lourenco e R. M. Rossetto (2010). *Design Analyses Applied to a Hyperbaric Wave Energy Converter*. Rel. téc. URL: <https://www.researchgate.net/publication/266475967> (ver p. 26).
- Garcia-Rosa, P. B., I. R. Machado, J. Paulo, V. S. Da Cunha, F. Lizarralde, E. H. Watanabe e S. F. Estefen (2010). *Modelagem da dinamica de um conversor hiperbarico de energia das ondas em energia eletrica*. Rel. téc. (ver p. 26).
- Garcia-Rosa, P. B., J. P. Cunha, F. Lizarralde, S. F. Estefen e P. R. Costa (2009a). "Efficiency optimization in a wave energy hyperbaric converter". Em: pp. 68–75. DOI: 10.1109/ICCEP.2009.5212079 (ver pp. 11, 13).
- Garcia-Rosa, P. B., J. P. Cunha, F. Lizarralde, S. F. Estefen e P. R. Costa (2009b). "Efficiency optimization in a wave energy hyperbaric converter". Em: *2009 International Conference on Clean Electrical Power, ICCEP 2009*, pp. 68–75. ISBN: 9781424425440. DOI: 10.1109/ICCEP.2009.5212079 (ver p. 26).
- Gingold, R. A. e J. J. Monaghan (1977). "Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars". Em: *Monthly notices of the royal astronomical society* 181.3, pp. 375–389 (ver p. 17).
- Grant, O. S. (2011). *Finavera Aquabuoy*. URL: <https://www.oregonseagrant/5334544586> (acedido em 2022-08-24) (ver p. 7).
- Grid, T. L. (2012). *Rotating Mass*. URL: <https://theliquidgrid.com/marine-clean-technology/wave-energy-converters/> (acedido em 2022-08-24) (ver p. 10).
- Heller, V., J. Chaplin, F. Farley, M. Hann e G. Hearn (2010). "Physical model tests of the Anaconda wave erngy converter". Em: *1st IAHR Eurpoean Congress May* (ver p. 10).

- Isaacs, J. D., D. Castel e G. L. Wick (1976). *Utilization of the energy in ocean waves*. Rel. téc., pp. 175–187 (ver p. 13).
- Jakobsen, M. M., S. Beatty, G. Iglesias e M. M. Kramer (2016). “Characterization of loads on a hemispherical point absorber wave energy converter”. Em: *International Journal of Marine Energy* 13, pp. 1–15. ISSN: 22141669. DOI: 10.1016/j.ijome.2016.01.003 (ver p. 28).
- Kramer, M. ; L. ; Marquis e P. Frigaard (2011). *Performance Evaluation of the Wavestar Prototype*. Rel. téc., pp. 5–9 (ver p. 28).
- Leimkuhlert, B. J., S. Reich e R. D. Skeel (1996). *Integration methods for molecular dynamics*. Rel. téc. (ver p. 22).
- Les-Pins, J. (2011). *Coastal and Oceanic photography in full storm and in beautiful weather*. URL: http://www.tunliweb.no/SM/alb_havet.htm (acedido em 2022-08-24) (ver p. 8).
- Lucy, L. B. (1977). “A numerical approach to the testing of the fission hypothesis”. Em: *The astronomical journal* 82, pp. 1013–1024 (ver p. 17).
- Marquis, L., M. Kramer e P. Frigaard (2010). *First Power Production figures from the Wave Star Roshage Wave Energy Converter*. Rel. téc. (ver p. 28).
- Monaghan, J. J. (1989). “On the Problem of Penetration in Particle Methods”. Em: *J. Comput. Phys.* 82.1, pp. 1–15. ISSN: 0021-9991 (ver p. 20).
- Monaghan, J. J., ; A. Kos e N. Issa (2012). “Fluid Motion Generated by Impact”. Em: DOI: 10.1061/ASCE0733-950X2003129:6250 (ver p. 21).
- Monaghan e J J. (1992). *Smoothed particle hydrodynamics*. Rel. téc., pp. 543–74. URL: www.annualreviews.org (ver p. 21).
- Noctula (2014). *Central Ondas Ilha do Pico*. URL: <https://noctula.pt/energia-das-ondas/central-ondas-ilha-do-pico/> (acedido em 2022-08-24) (ver p. 8).
- OLEO (2012). *Oyster wave energy converter*. URL: <https://www.oleo.co.uk/case-studies/view/2022/09/oyster-wave-energy-converter> (acedido em 2022-08-24) (ver p. 7).
- Pecher, A. e J. P. Kofoed (2017). *Handbook of ocean wave energy*. Springer Nature (ver p. 12).
- Ransley, E. J., D. M. Greaves, A. Raby, D. Simmonds, M. M. Jakobsen e M. Kramer (2017). “RANS-VOF modelling of the Wavestar point absorber”. Em: *Renewable Energy* 109, pp. 49–65. ISSN: 18790682. DOI: 10.1016/j.renene.2017.02.079 (ver pp. 28, 29).
- Reis, P. (2015). *Características do sistema Pelamis para energia das ondas*. URL: <https://www.portal-energia.com/caracteristicas-do-sistema-pelamis-para-energia-das-ondas/> (acedido em 2022-08-24) (ver p. 6).
- Rodrigues, M. (2021). *Estudo numérico da hidrodinâmica do conversor hiperbárico de energia das ondas em agitação irregular (Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa)*. Rel. téc. (ver pp. xi, xiii, 27, 32, 57).
- Rusu, L. e F. Onea (2017). *The performance of some state-of-the-art wave energy converters in locations with the worldwide highest wave power*. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.123 (ver p. 28).

- Silva, D., P. Martinho e C. Guedes Soares (2018). "Wave energy distribution along the Portuguese continental coast based on a thirty three years hindcast". Em: *Renewable Energy* 127, pp. 1064–1075. ISSN: 18790682. DOI: 10.1016/j.renene.2018.05.037 (ver pp. 15, 16).
- Silva, T. (2019). *Estudo numérico de um conversor hiperbárico de energia das ondas (Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa)*. Rel. téc. (ver pp. xi, xiii, 26, 34, 57).
- Tetu, A. (2017). "Power take-off systems for WECs". Em: *Handbook of ocean wave energy*. Springer, Cham, pp. 203–220 (ver pp. 11, 12).
- Verlet, L. (1967). *Computer "Experiments" on Classical Fluids. I. Thermodynamical Properties of Lennard-Jones Molecules*. Rel. téc. (ver p. 22).
- Wang, C., Y. Wang, C. Peng e X. Meng (2016). "Smoothed Particle Hydrodynamics Simulation of Water-Soil Mixture Flows". Em: *Journal of Hydraulic Engineering* 142.10, p. 04016032. ISSN: 0733-9429. DOI: 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001163 (ver pp. 18, 19).
- Wang, L., J. Isberg e E. Tedeschi (2018). "Review of control strategies for wave energy conversion systems and their validation: the wave-to-wire approach". Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81.October 2016, pp. 366–379. ISSN: 18790690. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.074. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.074> (ver p. 5).
- Whittaker, T. e M. Folley (2012). "Nearshore oscillating wave surge converters and the development of Oyster". Em: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 370.1959, pp. 345–364. ISSN: 1364503X. DOI: 10.1098/rsta.2011.0152 (ver p. 5).
- Windt, C., J. Davidson, B. Akram e J. V. Ringwood (2018). *Performance Assessment of the Overset Grid Method for Numerical Wave Tank Experiments in the OPENFOAM Environment*. Rel. téc. (ver p. 29).
- Windt, C., J. Davidson, E. J. Ransley, D. Greaves, M. Jakobsen, M. Kramer e J. V. Ringwood (2020). "Validation of a CFD-based numerical wave tank model for the power production assessment of the wavestar ocean wave energy converter". Em: *Renewable Energy* 146, pp. 2499–2516. ISSN: 18790682. DOI: 10.1016/j.renene.2019.08.059 (ver pp. 27, 29, 30, 57).

CÓDIGO NUMÉRICO PARA TRATAMENTO DOS RESULTADOS EM REGIME REGULAR

```

##### Leitura dos dados #####
data = pd.read.csv(r'C:\DualSPHysics.v5.0\Resultados\AgitacaoRegular\Th\FloatingInfo.csv')

column = pd.DataFrame(data, columns = ['time[s]', 'pitch[deg]', 'fomega.y[rad/s]'])
rows = column.loc[column['time[s]']]
t = rows['time[s]']
theta = rows['pitch[deg]']
omega = rows['fomega.y[rad/s]']
col.heave = rows['pitch[deg]']
pmax, = find.peaks(col.heave, distance = 140)
col.heave = col.heave.to.numpy()
valmax = col.heave[pmax]
tmax = t.to.numpy()[pmax]

##### Cálculo do RAO #####
inv.heave = (rows['pitch[deg]']) * -1
pmin, = find.peaks(inv.heave, distance = 140)
inv.heave = inv.heave.to.numpy()
valmin = inv.heave[pmin] * -1
tmin = t.to.numpy()[pmin]
n = valmax[0:-1].size
n = n - 6
RAO = valmax[0:n] - valmin[0:n]
RAO = np.mean(RAO)/2

##### Cálculo da potência extraída #####
Pwec = PTO * abs(omega)
Pwec.mean = Pwec.mean()

```

APÊNDICE A. CÓDIGO NUMÉRICO PARA TRATAMENTO DOS RESULTADOS EM REGIME REGULAR

$Pwec.mean.all = Pwec.mean$

$Rao.all = RAO$

Cálculo da potência incidente e eficiência

$h = 30.0$

$\rho = 1000$

$g = 9.81$

$f = 1/Tp$

$w = 2 * \pi * f$

$k = \text{symbols}('k')$

$sol = \text{nsolve}(w**2 - g * k * \tanh(2 * k * h), 1000)$

$k = \text{float}(sol)$

$Cg = w / (2 * k) * (1 + 2 * k * h / (\sinh(2 * k * h)))$

$Pwave = 1/8 * \rho * g * H**2 * Cg$

$E = Pwec.mean.all / Pwave$

CÓDIGO NUMÉRICO PARA TRATAMENTO DOS RESULTADOS EM REGIME IRREGULAR

```
##### Leitura dos dados #####
data.wec = pd.read.csv(r'C : \DualSPHysics.v5.0\AgitacaoIrregular\T_h\FloatingInfo.csv')
data.wave = pd.read.csv(r'C : \DualSPHysics.v5.0\AgitacaoIrregular\T_h\Elevation.csv')

column = pd.DataFrame(data.wec, columns = ['time[s]', 'pitch[deg]', 'fomega.y[rad/s]'])
rows = column.loc[column['time[s]'] >= time]
t = rows['time[s]']
theta = rows['pitch[deg]']
omega = rows['fomega.y[rad/s]']
theta = theta.to_numpy()
column = pd.DataFrame(data.wave, columns = ['Time[s]', 'Elevation_0[m]',
'Elevation_1[m]', 'Elevation_2[m]'])
rows = column.loc[column['Time[s]'] >= time]
eta = rows['Elevation_0[m]']
time.step = 0.05
fs = 1/time.step

##### Cálculo dos espectros #####
f, Pxx.wave = signal.welch(eta, fs, 'flatop', 1024, scaling = 'spectrum', nfft = 2 * 1024)
f, Pxx.wec = signal.welch(theta, fs, 'flatop', 1024, scaling = 'spectrum', nfft = 2 * 1024)

##### Cálculo do RAO #####
RAO = np.sqrt(Pxx.wec)/np.sqrt(Pxx.wave)
Pwec = PTO * abs(omega)
Pwec.mean = Pwec.mean()

##### Cálculo das potências e CWR #####
h = 30.0
rho = 1000
```

APÊNDICE B. CÓDIGO NUMÉRICO PARA TRATAMENTO DOS RESULTADOS EM REGIME IRREGULAR

```
g = 9.81
w = 2 * math.pi * f
k = symbols('k')
sol = nsolve(w**2 - g * k * tanh(2 * k * h), 1000)
k = float(sol)
if k > 11 :
    Cg = w / (2 * k) * (1 + 0)
else :
    Cg = w / (2 * k) * (1 + 2 * k * h / (math.sinh(2 * k * h)))
Pwec.mean = np.linspace(Pwec.mean, Pwec.mean, num = t.size, dtype = float)
Cgf = np.zeros(f.size)
for i in range(1, f.size):
    Cgf[i] = power(f[i])
Winc = 1000 * 9.81 * np.trapz(Cgf * Pxx.wave)
Wout = Pwec.mean
CWR = Wout / Winc
```